



Laura Raquel Piloto Pereira

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Influência do fíler no comportamento mecânico de mastiques betuminosos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Urbanismo e Transportes

Orientador: Luís Manuel Trindade Quaresma,
Professor Auxiliar Convidado, FCT-UNL
Coorientadora: Ana Cristina Freire, Investigadora
Auxiliar, Departamento de Transportes do
LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu
Arguente: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo
Vogal: Engº Luís Manuel Trindade Quaresma

LOMBADA



Efeito do fíler no comportamento mecânico de mastiques betuminosos
Laura Piloto

2016

Efeito do Filer no Comportamento Mecânico de Mastiques Betuminosos

“Copyright” Laura Raquel Piloto Pereira, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em especial ao Núcleo de Infraestruturas de Transportes, por me ter acolhido e facultado os meios necessários para a realização da minha tese de mestrado.

Quero agradecer a todos os investigadores, doutores, técnicos e bolsiros do LNEC com os quais tive o prazer de conviver. Porém, não posso deixar de mencionar algumas pessoas.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o Eng.º Luís Trindade Quaresma, que tentou arranjar, dentro das suas possibilidades, um tema que se encaixasse com o meu “perfil” e que fosse uma mais valia, tanto a nível de aprendizagem como de experiência. Agradeço a sua amizade, apoio e incentivo.

Um agradecimento especial à minha coorientadora, Eng.ª Ana Cristina Freire, pela disponibilidade demonstrada, amizade, partilha de conhecimentos e ajuda na resolução de problemas que foram surgindo no decurso do presente trabalho.

Um agradecimento especial ao Eng.º Vítor Antunes, autor do estudo “Influência do filer no comportamento de mastiques betuminosos” do qual o presente estudo visa dar continuidade, pela amizade, apoio, disponibilidade e partilha de conhecimentos, os quais foram fundamentais para a elaboração do presente estudo.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Transportes do LNEC, em especial, ao Sr. José Reimão, ao Sr. Daniel Fernandes e ao Sr. Nuno Nunes, pela ajuda, disponibilidade e paciência demonstrada na realização dos ensaios de laboratório.

À Doutora Margarida Sá da Costa do Departamento de Materiais do LNEC pela sua simpatia, interesse pelo tema em estudo e pela vontade demonstrada em colaborar com o presente estudo.

Ao Sr. João Santos, técnico de laboratório do DM do LNEC, pela ajuda, simpatia e disponibilidade no decorrer dos ensaios realizados neste departamento.

Às empresas PROBIGALP, LUSICAL, SECIL e Alves Ribeiro, S.A. pelos materiais fornecidos, que permitiram a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas que me apoiaram, em particular, à minha querida Vanessa Vaz, ao António Silva (Bob), ao Cláudio Leitão, ao Tiago Ricardo, ao Nuno Alvarez e à Paula Gandum, pela amizade e encorajamento.

Aos meus chefes e colegas de trabalho, pela compressão, disponibilidade e incentivo.

À minha família, em especial, à minha irmã que fomentou o meu gosto pelo saber e que me incutiu a nunca desistir dos meus sonhos.

Por fim, não menos importante, ao Fábio pelo seu carinho e paciência, e à sua família pela amizade e disponibilidade.

RESUMO

Num pavimento flexível, os agregados finos que compõem a mistura betuminosa têm um papel importante, preenchendo os vazios existentes entre os agregados, e em conjunto com o ligante betuminoso formam o masticue betuminoso, responsável por envolver os agregados grossos e preencher os vazios do esqueleto mineral. O masticue é considerado muitas vezes o verdadeiro ligante, participando ativamente no comportamento das misturas betuminosas.

Tradicionalmente, a avaliação do comportamento mecânico dos pavimentos rodoviários flexíveis cinge-se ao estudo das misturas betuminosas a quente.

O presente trabalho visa avaliar o comportamento mecânico dos pavimentos flexíveis a uma escala mais micro, avaliando, deste modo, o comportamento mecânico do masticue betuminoso, considerando diferentes fileres e diferentes condições de ensaio. A quantidade de filer a aplicar nos mastiques betuminosos foi definida de acordo com o poder absorvente e massa volúmica, de cada filer.

Numa primeira fase, estudou-se o comportamento mecânico dos mastiques betuminosos através do ensaio de penetração. Seguidamente, foram realizados ensaios com aplicação de carga monotónica crescente, sem repetição de carregamento, aplicando-se um aumento gradual e linear da deformação ao longo do tempo até terminar o ensaio. Em particular, o ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente e o ensaio de ductilidade.

Foram utilizados os resultados dos ensaios de caracterização física e de interação físico química de fileres realizados no âmbito da dissertação de mestrado do Eng.º Vítor Antunes. Pretendendo-se avaliar a variabilidade dos parâmetros de caracterização mecânica dos mastiques betuminosos face aos parâmetros de caracterização física e de interação físico-química dos fileres, que os constituem.

Os resultados obtidos permitem constatar que o parâmetro que mais influencia o comportamento do masticue betuminoso aquando da comparação com os ensaios de compressão e de ductilidade é o índice de vazios de filer seco compactado ou vazios de Rigden.

Posteriormente, realizaram-se ensaios de flexão com aplicação de cargas cíclicas com controlo de extensão determinando-se as seguintes propriedades reológicas, módulo de rigidez complexo e ângulo de fase.

Os resultados de caracterização reológica mostraram que a adição de filer ao betume contribui para um endurecimento do masticue, através do aumento do módulo complexo e do decréscimo do ângulo de fase. Constatou-se também que, a influência da frequência de carregamento no módulo complexo é contrária à que se verifica no ângulo de fase.

Em suma, nos ensaios realizados verificou-se que o comportamento do masticue melhora com a diminuição da temperatura, com a diminuição do teor em betume e com o aumento da frequência de aplicação de cargas. Sendo que, a adição do filer altera o comportamento do betume, pois contribui para a diminuição da penetração a 25°C, diminuição da suscetibilidade

térmica, aumento da resistência a esforços de compressão e tração, aumento do módulo de rigidez e diminuição do ângulo de fase, tornando o ligante mais elástico e rígido.

Palavras-chave: filer; mastique; comportamento mecânico; ductilidade; rigidez.

ABSTRACT

In a flexible pavement, the fine aggregates play an important role in the behavior of the bituminous mixtures, filling the voids between the aggregates, and together with the bituminous binder they form the bituminous mastic, responsible for enveloping the coarse aggregates and filling the voids of the mineral skeleton. The mastic is often considered the true binder, participating actively in the behavior of the bituminous mixtures.

Traditionally, the assessment of the mechanical behavior of flexible road pavements is limited to the study of hot bituminous mixtures.

The present work aims to evaluate the mechanical behavior of flexible pavements on a more micro scale, thus evaluating the mechanical behavior of bituminous mastic, considering different fillers and different test conditions. The amount of filler applied in bituminous mastics was defined according to the absorptive power and density of each filler.

Initially, the mechanical behavior of bituminous mastics was studied through the penetration test. Subsequently, tests were carried out applying an increasing monotonic load, without repetition of loading, applying a gradual and linear increase of deformation over time till the test ended. In particular, the uniaxial compression test and ductility test were performed.

The results of the physical characterization and physical chemical interaction tests of the fires carried out in the Master's dissertation of Eng. Vítor Antunes were used. The aim of this study was to evaluate the variability of the parameters of the mechanical characterization of bituminous mastics as compared to the parameters of physical characterization and physicochemical interaction of the filler composites.

The results obtained show that the parameter that most influences the behavior of the bituminous mastic during the comparison with the compression and ductility tests is the index of voids of compacted dry or empty voids of Rigden.

Later, four point bending cyclic tests with controlled strain were performed allowing the determination of the rheological properties, complex stiffness modulus and phase angle.

The rheological characterization results showed that the addition of filler to the bitumen contributes to a mastic hardening by increasing the complex modulus and decreasing the phase angle. It was also found that the influence of the loading frequency on the complex modulus is contrary to that observed in the phase angle.

In summary, in the tests carried out it was verified that the behavior of the mastic improves with the decrease of the temperature, with the decrease of the bitumen content and with the increase of the frequency of application of loads. The addition of the filler modifies the behavior of the bitumen, as it contributes to the decrease of the penetration at 25°C, decrease of the thermal susceptibility, increase of the resistance to compressive and tensile stresses, increase of the rigidity modulus and decrease of the phase angle, making the binder more elastic and rigid.

Keywords: fillers; mastic; mechanical behavior; ductility; stiffness.

INDICE

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	xiii
Abreviaturas	xiii
Siglas	xiii
Símbolos.....	xiii
S.1 – Alfabeto latino.....	xiii
S.2 – Alfabeto grego.....	xiv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivo	1
1.3. Estrutura da Dissertação	2
2. Revisão da Literatura	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Mastique betuminoso.....	3
2.2.1. <i>Definição de Mastique Betuminoso</i>	3
2.2.2. <i>Composição e Comportamento do Mastique Betuminoso</i>	3
2.2.2.1. Ligante betuminoso	4
2.2.2.2. Filer	4
2.2.3. <i>Avaliação do comportamento dos mastiques betuminosos</i>	5
2.3. Propriedades mecânicas.....	7
2.3.1. <i>Reologia</i>	7
2.3.1.1. Viscosidade	7
2.3.1.2. Rigidez	10
2.3.1.3. Ensaio utilizados para determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase	13
2.3.1.4. Representação das propriedades reológicas	14
2.3.2. <i>Ductilidade</i>	18
2.4. Considerações Finais	21
3. Programa Experimental	23
3.1. Materiais estudados	23
3.1.1. <i>Fileres</i>	23
3.1.2. <i>Ligante betuminoso</i>	25
3.2. Fabrico do mastique betuminoso.....	26
3.2.1. <i>Composição dos mastiques</i>	26

3.2.2.	<i>Fabrico</i>	26
3.3.	Metodologias de ensaio do mastique	27
3.3.1.	<i>Tipo de ensaios</i>	27
3.3.2.	<i>Ensaio de penetração a 25°C</i>	28
3.3.3.	<i>Ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente</i>	28
3.3.3.1.	Preparação dos provetes de ensaio	29
3.3.3.2.	Procedimento de ensaio.....	30
3.3.4.	<i>Ensaio de força-ductilidade com aplicação de carga monotónica crescente</i>	31
3.3.4.1.	Preparação dos provetes de ensaio	31
3.3.4.2.	Procedimento de ensaio.....	32
3.3.5.	<i>Ensaio de flexão com aplicação de cargas cíclicas</i>	32
3.3.5.1.	Preparação dos provetes de ensaio	33
3.3.5.2.	Procedimento de ensaio.....	34
4.	Apresentação e Discussão de Resultados	35
4.1.	Ensaio de penetração a 25°C	36
4.2.	Ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente	39
4.2.1.	<i>Resultados por filer</i>	39
4.2.2.	<i>Análise comparativa dos resultados obtidos</i>	43
4.3.	Ensaio de força-ductilidade com aplicação de carga monotónica crescente.....	46
4.3.1.	<i>Resultados do betume</i>	47
4.3.2.	<i>Resultados por filer</i>	47
4.3.3.	<i>Análise comparativa dos resultados obtidos</i>	50
4.4.	Análise comparativa dos diferentes ensaios realizados	54
4.5.	Ensaio de flexão com aplicação de cargas cíclicas	55
4.5.1.	<i>Resultados por filer</i>	56
4.5.2.	<i>Análise comparativa dos resultados obtidos</i>	59
5.	Considerações Finais	63
5.1.	Conclusões.....	63
5.2.	Desenvolvimentos Futuros	64
	Referências Bibliográficas	67
	Referências Normativas	69
	Apêndice A – Gráficos obtidos no ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente	71
	Apêndice B – Gráficos obtidos no ensaio de força-ductilidade com aplicação de carga monotónica crescente	74

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustração da viscosidade de diferentes óleos (Adaptado de Widman, 2009).....	7
Figura 2.2 - Classificação de fluidos de acordo com a relação entre tensão e taxa de corte (Adaptado de Santos, 2011).....	8
Figura 2.3 - Módulo de rigidez e Ângulo de fase - desfasamento entre a tensão e a extensão na flexão alternada	11
Figura 2.4 - Curvas sinusoidais de tensão e extensão (Ângulos de fase de 0°, 45° e 90°)	12
Figura 2.5 - Curvas histeréticas de tensão-extensão (Ângulos de fase de 0°, 45° e 90°).....	12
Figura 2.6 - Comparação resultados de diferentes tipos de ensaios (Carbonneau et al., 2009)	14
Figura 2.7 - Exemplos de isócronas de diferentes betumes submetidos a uma frequência de 1 Hz: (a) isócronas do módulo complexo e (b) isócronas do ângulo de fase (adaptado de (Airey, 2004)).....	15
Figura 2.8 - Exemplos de isotérmicas de um betume: (a) isotérmicas do módulo complexo e (b) isotérmicas do ângulo de fase (adaptado de (Airey, 2002)).....	15
Figura 2.9 - Exemplo de aplicação do princípio da sobreposição tempo-temperatura para a construção de uma curva-mestra correspondente ao módulo complexo (adaptado de (Yussof, 2012)).....	16
Figura 2.10 - Exemplo de curvas-mestra de diferentes betumes (adaptado de (Airey, 2004)).....	17
Figura 2.11 - Exemplo de diagramas de Black de diferentes betumes (adaptado de (Airey, 2004)).....	17
Figura 2.12 - Exemplo de um diagrama de Cole-Cole (adaptado de (Yussof, 2012).....	18
Figura 2.13 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materias dúcteis e frágeis	18
Figura 2.14 - Exemplo de gráficos tensão-extensão de um mastique sujeito a diferentes configurações de ensaio (adaptado de (Silva, 2005)).....	19
Figura 2.15 - Comparação de energia de fratura dos resultados dos ensaios de IDT e DBDT [Adaptado de Koh e Roque (2010)].....	20
Figura 3.1 – Latas de betume de penetração 35/50 com capacidade de 5 litros	25
Figura 3.2 – Fabrico dos mastiques betuminosos	27
Figura 3.3 - Ilustração do equipamento e do ensaio de penetração a 25°C.....	28
Figura 3.4 - Procedimento de fabrico dos diversos provetes de mastique betuminoso para realização dos ensaios de compressão uniaxial monotónica	30
Figura 3.5 - Procedimento do ensaio de compressão uniaxial monotónica	31
Figura 3.6 - Preparação dos provetes para realização dos ensaios de ductilidade	32
Figura 3.7 - Várias fases do ensaio de ductilidade – exemplo de rotura frágil.....	32
Figura 3.8 - Várias fases do ensaio de ductilidade – exemplo de rotura dúctil.....	32
Figura 3.9 - Equipamento utilizado no ensaio de flexão	33
Figura 3.10 – Vigas de mastique betuminoso.....	34
Figura 3.11 – Princípios básicos da flexão em quatro pontos (adaptado de (Costa, 2013))	34
Figura 4.1 – Ensaios de caracterização física e de interação físico-química: (a) Vazios de Rigden; (b) Massa Volúmica; (c) Poder absorvente; (d) Temperatura de amolecimento	35
Figura 4.2 - Avaliação das variações de penetração obtidas para os diferentes mastiques produzidos com o betume de penetração “35/50”.....	37
Figura 4.3 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a variação da penetração a 25°C e (a) os vazios de Rigden; (b) o número de betume	38
Figura 4.4 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a variação da penetração a 25°C e (a) a relação $(f/b)v$ utilizada sobre a relação $(f/b)v$ máxima; (b) a variação da temperatura anel e bola.....	38
Figura 4.5 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de CEM I 52,5R	40
Figura 4.6 – Módulo secante no ramo elástico em função do tipo de filer	43
Figura 4.7 - Módulo secante no ramo viscoelástico em função do tipo de filer	43
Figura 4.8 - Coeficiente de correlação (R^2) entre (a) os módulos secantes a 5°C (b) os módulos secantes a 15°C.....	44
Figura 4.9 - Coeficiente de correlação (R^2) entre os vazios de Rigden e o módulo secante elástico a 15°C	45
Figura 4.10 - Coeficiente de correlação (R^2) entre o número de betume e o módulo secante elástico a 15°C	45
Figura 4.11 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a relação volumétrica utilizada em função da máxima e o módulo secante elástico a 15°C	45
Figura 4.12 - Ductilímetro, fotografia e esquema do dispositivo de tração.....	46
Figura 4.13 - Gráfico Força-Alongamento do betume de pavimentação B35/50	47
Figura 4.14 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de CEM I 52,5R.....	48
Figura 4.15 - Resistencia à tração para os diferentes mastiques estudados	51

Figura 4.16 - Energia de deformabilidade obtida para os diferentes mastiques estudados.....	51
Figura 4.17 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a resistencia à tração e a energia de deformabilidade (a) para a relação $(f/b)v_{max}/2$ (b) para a relação $(f/b)v_{max}$	52
Figura 4.18 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a energia de deformabilidade e os vazios de Rigden ..	53
Figura 4.19 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a energia de deformabilidade e a viscosidade aparente	53
Figura 4.20 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a energia de deformabilidade e a relação entre $a(f/b)v^2 / (f/b)v_{max}$	53
Figura 4.21 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a variação de penetração a 25°C e o módulo secante elástico a 15°C	54
Figura 4.22 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a variação de penetração a 25°C e a energia de fratura para a maior taxa de incorporação de filer.....	54
Figura 4.23 - Coeficiente de correlação (R^2) entre o módulo secante elástico a 15°C e a energia de fratura para a maior taxa de incorporação de filer.....	55
Figura 4.24 - Isotérmicas dos mastiques estudados em função do (a) ângulo de fase; (b) módulo complexo	56
Figura 4.25 - Diagrama de Black dos mastiques estudados.....	59
Figura 4.26 - Diagrama de Cole-Cole dos mastiques compostos por fileres artificiais, naturais e reciclados	60
Figura a.1 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de CL90 – H100	71
Figura a.2 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de CL70 - H200.....	71
Figura a.3 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de NHL5	71
Figura a.4 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Areia do Rio	72
Figura a.5 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Pó de Tijolo	72
Figura a.6 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Calcário	72
Figura a.7 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Recuperado	73
Figura a.8 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Cinzas Volantes	73
Figura a.9 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de RCD.....	73
Figura b.1 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de CL90 – H100	74
Figura b.2 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de CL70 – H200	74
Figura b.3 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de NHL5	75
Figura b.4 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Areia do Rio.....	75
Figura b.5 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Pó de Tijolo	75
Figura b.6 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Calcário.....	76
Figura b.7 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Recuperado	76
Figura b.8 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Cinzas Volantes	76
Figura b.9 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de RCD	77

INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Equações que descrevem o módulo de rigidez e o ângulo de fase de acordo com o tipo de carregamento	13
Tabela 3.1 - Identificação dos diferentes fileres no fabrico dos mastiques betuminosos	23
Tabela 3.2 - Propriedades físicas e químicas dos fileres (Antunes, 2013).....	25
Tabela 3.3 - Relações volumetricas e ponderiais utilizadas na formulação dos mastiques em estudo	26
Tabela 3.4 – Ensaios realizados no presente estudo	28
Tabela 4.1 – Propriedades físicas e interação físico-química dos diferentes fileres em estudo.....	35
Tabela 4.2 – Principais parâmetros e resultados do ensaio de penetração a 25°C	36
Tabela 4.3 – Principais parâmetros e resultados do ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente	39
Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente para os diferentes mastiques.....	41
Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente para os diferentes mastiques.....	46
Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de ductilidade do betume de pavimentação B35/50	47
Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de ductilidade	49
Tabela 4.8 – Principais parâmetros e resultados do ensaio de flexão	56
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de flexão	58

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

Máx	Máximo
Min	Mínimo
PA	Poder Absorvente

Siglas

4PBT	Four Point Bending Test
AC	Asphalt Concrete
DBDT	Dog Bone Direct Tension
DM - LNEC	Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil
DSR	Dynamic Shear Rheometer
DT – LNEC	Departamento de Transportes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil
EN	European Norm
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
IDT	Indirect Tension Test
IPQ	Instituto Português de Qualidade
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV	Manual de Conceção de Pavimentos
MBQ	Mistura Betuminosa a Quente
NP	Norma Portuguesa
SHRP	Strategic Highway Research Program
TTSP	Time Temperature Superposition Principle
UNL	Universidade Nova de Lisboa

Símbolos

S.1 – Alfabeto latino

E_1	módulo conservativo ou elástico
-------	---------------------------------

E_2	módulo dissipativo ou viscoso
E^* ou E_∞	módulo complexo ou de rigidez
f	Frequência de aplicação de carga
F	Força
(f/b)	Relação filer/betume
$(f/b)_p$	Relação filer/betume ponderal
$(f/b)_v$	Relação filer/betume volumétrica
(f/m)	Relação filer/mastique
$(f/m)_p$	Relação filer/mastique ponderal
$(f/m)_v$	Relação filer/mastique volumétrica
f_R	Frequência de referencia
J	Energia de deformabilidade
L	Comprimento
Pen_{25}	Penetração a 25°C
t	Tempo
T	Temperatura
T_{ab}	Temperatura anel e bola ou temperatura de amolecimento
T_{REF}	Temperatura de referência
V	Velocidade
W	Frequência angular
W	Energia potencial

S.2 – Alfabeto grego

Δpen_{25}	Variação da penetração a 25°C
ΔT_{ab}	Variação da temperatura anel e bola ou variação da temperatura de amolecimento
ε	Extensão
ε_f	Extensão final
ε_t	Extensão de transição
ρ	Massa volúmica
ρ_b	Massa volúmica do betume

ρ_f	Massa volúmica do filer
ρ_m	Massa volúmica do mastique
σ	Tensão
σ_f	Tensão final
σ_t	Tensão de transição
ϕ	Ângulo de fase

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Em Portugal, o tipo de pavimento rodoviário mais usual é o pavimento flexível, constituído por camadas granulares e betuminosas, dispostas horizontalmente. As camadas betuminosas são as que se encontram à superfície, apresentando uma maior resistência e um custo mais elevado quando comparado com as camadas granulares, colocadas inferiormente.

As camadas betuminosas são constituídas por um conjunto de agregados, ligante betuminoso, fíler e ar, doseados de uma forma ponderal. À combinação do ligante betuminoso com o fíler dá-se o nome de mastique betuminoso, o qual desempenha o papel de verdadeiro ligante na mistura betuminosa, preenchendo os vazios, envolvendo e ligando os restantes agregados e garantindo a compacidade, a impermeabilidade e a trabalhabilidade das misturas.

Salienta-se que, no presente trabalho, o mastique betuminoso que se pretende caracterizar não é considerado como um produto final, mas sim o conjunto fíler/betume constituinte de uma mistura betuminosa. No entanto, a sua caracterização laboratorial deve ser considerada com algumas reservas, uma vez que, estes quando produzidos em laboratório podem não ser suficientemente representativos dos materiais obtidos nas centrais de produção das misturas betuminosas.

O conhecimento do comportamento do mastique é fundamental, no que concerne ao comportamento da mistura betuminosa, devido à ligação entre o mastique e os agregados grossos. Essa ligação é caracterizada pela sua resistência mecânica, função da coesão interna do mastique e da interação na interface entre o mastique e os agregados, e pode ser afetada pelo envelhecimento do betume, provocando alterações na composição química e reológica do betume (Silva, 2005; Guerra, 2015).

Alguns investigadores, comprovam a importância do estudo do mastique face a um melhor entendimento do comportamento das misturas betuminosas.

Airey et al. (2006), Liao (2007) e Liao et al. (2012) realizaram ensaios de fadiga no reómetro de corte dinâmico e analisaram o efeito da adição de fíler no desempenho de fadiga do betume. Observaram que a adição de fíler no ligante, além de aumentar a sua rigidez, contribui para um pior desempenho à fadiga.

Outros estudos têm também avaliado a capacidade de autorregeneração do mastique, através da interrupção dos ciclos de carga repetidos, quer por meio de períodos de repouso de curta duração, constituindo o denominado carregamento intermitente em Daniel and Kim (2001), Osman (2004) e Van den bergh (2011), quer por meio de longos períodos de repouso, através de um carregamento descontínuo em Van den bergh (2011).

1.2. Objetivo

A presente dissertação tem como objetivo estudar a influência do fíler no comportamento mecânico do mastique betuminoso, com a realização e análise dos resultados de ensaios de compressão, ductilidade e flexão. Com este estudo pretende-se assim dar continuidade ao

estudo elaborado por Antunes (Antunes, 2013), no qual foram caracterizados, física e quimicamente nove tipos de fileres, complementando-se agora com a caracterização mecânica dos materiais em estudo.

1.3. Estrutura da Dissertação

Relativamente à organização deste trabalho, este encontra-se dividido em cinco capítulos, os quais apresentam-se subdivididos em subcapítulos e por daí em diante, permitindo deste modo, uma maior clareza dos assuntos abordados.

O capítulo 1, a introdução, apresenta o enquadramento do tema, fundamentando a importância deste estudo e servindo de base aos objetivos a atingir com o mesmo, explicitados posteriormente. Por fim, é descrita de forma sucinta a estrutura adotada na elaboração deste estudo.

O capítulo 2, revisão de literatura, dedica-se à revisão da literatura existente, iniciando por um assunto mais lato passando gradualmente para aspetos mais específicos.

Este capítulo também se apresenta subdividido em subcapítulos, os quais: pavimentos rodoviários, misturas betuminosas, mastiques betuminosos e propriedades mecânicas. O subcapítulo dos mastiques betuminosos, sendo o cerne deste trabalho, é tratado de uma forma mais aprofundada e minuciosa.

Para concluir este capítulo, tecem-se algumas considerações finais, remetendo alguns assuntos a analisar no capítulo 3.

O capítulo 3, programa experimental, expõe de forma direta os ensaios realizados e respetivos objetivos. Procedendo-se, da exposição das diversas etapas de cada ensaio, entre as quais, preparação dos materiais, formulação da mistura, conceção dos provetes, condicionamento dos provetes, ensaio propriamente dito.

No capítulo 4, apresentação e discussão de resultados, são apresentados os resultados inerentes a cada ensaio, sendo posteriormente analisadas as principais grandezas, com o objetivo de avaliar a influência destas no comportamento do mastique betuminoso, quando sujeito a esforços de compressão, ductilidade e flexão.

Para encerrar o capítulo 4, correlacionaram-se os resultados obtidos com alguns ensaios de caracterização física e interação físico-química do filer (Antunes, 2013).

No capítulo 5, considerações finais, de modo a findar este estudo, são enumeradas as principais conclusões por ele retiradas e apresentadas propostas para trabalhos futuros, tendo em vista a continuação deste e um possível paralelismo com a caracterização mecânica das misturas betuminosas.

Por último são expostas as referências bibliográficas e normativas que apoiaram este estudo, tanto a nível de escrita como na realização dos ensaios.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Introdução

No decorrer das últimas décadas houve um aumento da velocidade de circulação, sendo essencial uma melhoria das características funcionais e estruturais dos pavimentos, de modo a que, a segurança e comodidade da circulação não fiquem comprometidas.

Os pavimentos rodoviários mais utilizados em Portugal são os pavimentos flexíveis, que exibem sobretudo problemas associados a deformações permanentes ou ao fendilhamento por fadiga.

As deformações permanentes, como o nome indica, são aquelas em que o material permanece deformado. Quando um corpo é carregado ele tende a deformar e a sua deformação pode ser dividida em duas partes, uma parte recuperável (deformação elástica) e outra irre recuperável (deformação plástica). A deformação permanente corresponde, portanto, a alterações nas dimensões de um corpo sem que este retorne à forma inicial.

Estas deformações ocorrem geralmente após a entrada em serviço dos pavimentos, por processos de consolidação ou por rotura plástica por corte, podendo, no entanto, estar associadas a solicitações resultantes da passagem dos rodados dos veículos aquando da ocorrência de elevadas temperaturas. (Antunes, 2013)

O fendilhamento por fadiga, verifica-se depois do processo de envelhecimento do pavimento, ou seja, após este ter sido submetido a cargas cíclicas provocadas pelo tráfego. No entanto, o surgimento precoce destas fendas está associado à utilização de materiais inadequados (Branco, et al., 2006).

As fendas originadas pelo processo de fadiga têm como base o desenvolvimento de microfissuras no mástico, o que estará relacionado com as características do betume utilizado, com as características do filer e com a interação físico-química que ocorre entre estes dois componentes. (Antunes, 2013)

2.2. Mastique betuminoso

2.2.1. Definição de Mastique Betuminoso

O mastique betuminoso é composto por agregado fino, filer, ligante betuminoso e ar, em contrapartida, para realização dos ensaios laboratoriais do presente estudo admite-se que o mesmo é constituído apenas por filer, ligante betuminoso e ar.

2.2.2. Composição e Comportamento do Mastique Betuminoso

O mastique é geralmente admitido como o ligante real das misturas betuminosas, possuindo um comportamento viscoelástico, exibindo simultaneamente propriedades viscosas e elásticas. Esta combinação para além de envolver e manter ligados os agregados mais grossos, preenche os vazios existentes no esqueleto mineral, garantindo compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade às misturas.

Neste contexto para uma melhor definição do masticue é necessário clarificar os seguintes conceitos: ligante betuminoso, fíler e relação fíler/betume.

2.2.2.1. *Ligante betuminoso*

Em trabalhos de pavimentação rodoviária o ligante betuminoso mais usado é o betume.

Segundo a norma EN 12597 (CEN, 2014), o betume puro é um material praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, obtido sob a forma de resíduo a partir da destilação do petróleo bruto. Este tipo de betume é, geralmente, classificado através do valor obtido no ensaio de penetração a 25 °C - EN 1426 (CEN, 2015) - que permite classificar indiretamente a viscosidade ou a dureza a uma dada temperatura, e do valor da temperatura de amolecimento obtido pelo método de anel e bola - EN 1427 (CEN, 2015) - que permite classificar o comportamento do betume a elevadas temperaturas.

O betume é um material viscoelástico e a sua consistência varia com a temperatura. Este assume um comportamento do tipo sólido elástico para elevadas frequências ou baixas temperaturas e comporta-se como um líquido viscoso quando sujeito a grandes períodos de carga ou temperaturas elevadas.

No que diz respeito à composição química o betume é, essencialmente, uma mistura complexa de moléculas de hidrocarbonetos de massas moleculares distintas, divididas em dois grandes grupos distintos, denominados asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos, são materiais complexos aromáticos de peso molecular elevado e muito polares, têm larga influência nas características reológicas do betume, uma vez que, à medida que o seu conteúdo aumenta o betume torna-se mais duro (maior rigidez), mais viscoso, com menor penetração e com uma temperatura de amolecimento mais elevada. Os maltenos são a parte mais leve do betume e podem ser divididos em aromáticos, saturados e resinas, estas últimas são extremamente polares o que as torna extremamente adesivas (é a fração que inicialmente adere aos agregados) (Branco, et al., 2006).

Devido ao incremento das solicitações aplicadas aos pavimentos rodoviários têm sido aplicados betumes com características melhoradas, através da sua modificação durante o processo de fabrico com a adição de um ou mais agentes químicos (borracha natural, polímeros sintéticos, enxofre e certos compostos organometálicos), a fim de reduzir a suscetibilidade térmica (variação da rigidez com a temperatura), aumentar a flexibilidade/resistência à fadiga, aumentar a durabilidade (através de uma maior resistência ao envelhecimento) e por fim, melhorar a adesividade agregado-ligante (Antunes, 2013)

Os aditivos mais utilizados nos ligantes betuminosos são os polímeros termoplásticos, mais concretamente os elastómeros e os plastómeros, uma vez que reduzem a perda de rigidez do betume com o aumento da temperatura e reduzem o aumento da rigidez do betume com a redução da temperatura.

2.2.2.2. *Fíler*

Designa-se por fíler, segundo a norma NP EN 13043 (IPQ, 2004), todo o agregado cuja maior parte passa pelo peneiro de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção

para lhes conferir certas propriedades. Esta definição é comum às várias referências normativas referentes aos agregados.

O filer é um material selecionado que pode ser natural, artificial, de origem inorgânica e mineral, podendo provir de duas formas distintas, nomeadamente:

- Material que provém das frações mais finas dos agregados, em geral provenientes de britagem, e que, aquando do fabrico das misturas, podem ser separados das restantes frações do agregado através de extratores de poeiras – a este filer denomina-se por filer recuperado ou de recuperação;
- Material produzido em separado numa instalação industrial segundo um processo controlado – a este filer dá-se o nome de filer comercial.

No âmbito deste trabalho considera-se uma terceira forma, ou seja, material proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD), previamente britados e peneirados, para obtenção da granulometria desejada, como por exemplo o filer de pó de tijolo ou o filer de RCD.

O filer, quando incorporado nas misturas betuminosas pode apresentar dois tipos de comportamento, o comportamento do tipo de material inerte, quando preenche os vazios entre os agregados mais grossos da mistura, conferindo-lhes uma maior resistência, e outro comportamento enquanto material ativo, resultante das suas características superficiais (forma, textura, porosidade) e finura, e da sua composição química, que determinam o valor da magnitude e da intensidade, com que a adsorção ocorre, respetivamente, fenómeno que advém da interação filer-betume. Este tipo de adsorção deve-se às forças de Van der Waals. (Matos et al. 2012; Antunes 2013)

2.2.3. Avaliação do comportamento dos mastiques betuminosos

É citado na bibliografia (Bardini et al., 2012) que a adição de filer altera o comportamento reológico do betume, pois contribui para o aumento da temperatura de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento da resistência a esforços de corte, aumento do módulo de rigidez e da resistência a tração e flexão, tornando o ligante mais elástico e rígido. Constatou-se que o teor de filer tem mais influência que o tipo de filer adicionado, apesar de ambos influenciarem bastante a resposta do ângulo de fase do mástico quando submetido a ensaios de cargas repetidas. Contudo, uma excessiva quantidade de filer adicionada ao mástico betuminoso pode gerar um comportamento inadequado e quebradiço do sistema filer-betume.

As propriedades do mástico são influenciadas pelas propriedades reológicas do betume e pela forma e estrutura das partículas que constituem o filer. O filer tem como função preencher os vazios entre os agregados mais grossos da mistura betuminosa, sendo importante conhecer a sua irregularidade geométrica, a sua textura superficial, porosidade e as suas propriedades físico-químicas. (Santos, 2012)

O comportamento mecânico dos vários mastiques representativos da mistura betuminosa de desgaste pode ser avaliado recorrendo a ensaios monotónicos de compressão, corte e tração, a ensaios cíclicos para determinação do módulo de rigidez, da resistência ao fendilhamento por fadiga e da resistência às deformações permanentes dos mastiques betuminosos, tendo-

se concluído que o parâmetro de composição mais influente no comportamento do masticue é o teor em betume. A temperatura e a velocidade ou frequência de aplicação de cargas são outros fatores que influenciam significativamente o comportamento do masticue. (Silva 2005)

Para a maioria dos ensaios mencionados anteriormente, o comportamento do masticue melhora com a diminuição do teor em betume, com a utilização de betumes mais duros, com a diminuição da temperatura e com o aumento da velocidade ou frequência de aplicação de cargas. (Silva, 2005)

Por outro lado, as características dos fileres que apresentam uma maior influência, não só no comportamento dos mastiques betuminosos, mas também no desempenho das misturas betuminosas, são: a forma, a angulosidade das partículas e a textura da superfície. Estas características influenciam o arranjo entre partículas, fazendo variar os vazios entre as partículas de filer, a forma como o betume as envolve e é absorvido pelas mesmas. (Teixeira, 2015)

Muitos estudos reconhecem a influência destas características no comportamento do masticue betuminoso (Anderson & Goetz, 1973; Anderson & Tarris, 1982; Kandhal et al., 1998; Mogawer, 1996; Ishai et al., 1980 e Silva et al., 2005, Antunes, 2013).

É importante frisar, que alguns fileres apresentam heterogeneidade quanto à forma e à textura das partículas que o constituem, uma vez que são compostos por diferentes materiais, dificultando, deste modo, a existência de uma classificação rigorosa destas propriedades. (Antunes, 2013)

A superfície específica do filer influencia o comportamento do masticue betuminoso, aumentando o valor da temperatura de amolecimento ou temperatura “anel e bola”;

A textura da superfície é responsável pela grandeza das forças de atrito que se desenvolvem entre as partículas. Esta propriedade e a forma das partículas do filer influenciam a percentagem ótima em betume, o modo como as partículas se distribuem no masticue betuminoso, influenciando assim as características do masticue betuminoso.

As partículas com formas do tipo filamentos fazem aumentar a porosidade do filer, melhoram a resistência mecânica e, por outro lado, podem aumentar a adesividade ao agregado.

As partículas lamelares tendem a sobrepor-se e a facilitar a entrada de água enquanto que partículas arredondadas tendem a diminuir o efeito rigidificante do filer e a produzir fileres com maiores porosidades entre partículas.

Os fileres de formas irregulares e angulosas aumentam a viscosidade do masticue betuminoso e o seu ponto de amolecimento, diminuindo o valor da penetração e da ductilidade (Antunes, 2013). Sendo que, quanto menor e mais angulosa for a partícula maior será a sua superfície e consequentemente maior será a quantidade de betume adsorvida.

Os vazios do filer seco compactado, ou seja, a porosidade do filer compactado, são fortemente influenciados pela forma das partículas. Esta característica é responsável pela forma como as partículas de filer se distribuem, condicionando a razão volumétrica máxima filer/betume.

Um índice de vazios de Rigden elevado conduz a um volume de betume absorvido maior e, conseqüentemente, a mastiques demasiados rígidos e com pouco betume livre para revestimento da superfície do agregado da mistura betuminosa.

A quantidade de betume necessária para que o mástico possua determinada viscosidade é assim proporcional à porosidade do filer seco compactado, à superfície específica do filer e à capacidade do filer se deixar “molhar” pelo betume.

2.3. Propriedades mecânicas

2.3.1. Reologia

O termo reologia, introduzido inicialmente por Eugene Cook Bingham, encontra-se atualmente definido no meio científico e aceite pela American Society of Rheology desde 1929, como sendo o estudo da deformação e escoamento da matéria (Barnes, et al., 1989). Este termo surgiu da incapacidade das leis clássicas, lei de Hooke (teoria da elasticidade) e de Newton (teoria dos fluidos newtonianos), de descreverem o comportamento de certos materiais. Assim, a reologia deve ser entendida como a ciência que estuda o desempenho mecânico dos materiais cujo comportamento se situa entre o puramente elástico e o comportamento dos fluidos Newtonianos.

Dado que o mástico betuminoso apresenta um comportamento de um sólido para temperaturas baixas e de um fluido para elevadas temperaturas, será apresentado neste capítulo o estudo da rigidez e da viscosidade. Dando maior ênfase ao estudo da rigidez, uma vez que, será este o principal foco do trabalho.

2.3.1.1. Viscosidade

A viscosidade é o conceito da reologia mais conhecido sendo uma das propriedades definidora dos betumes. Para uma melhor compreensão deste conceito, na Figura 2.1 são ilustrados óleos com diferentes viscosidades.

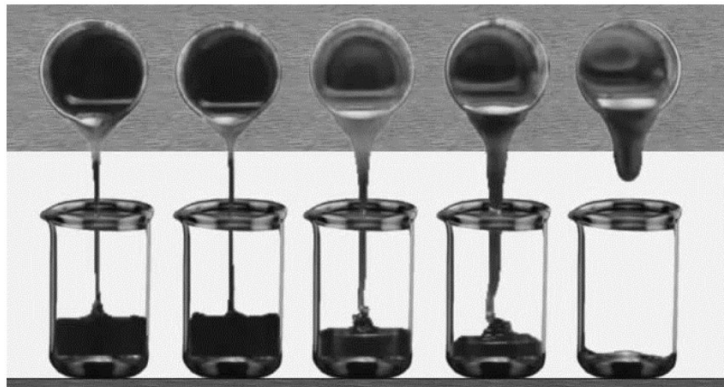


Figura 2.1 - Ilustração da viscosidade de diferentes óleos (Adaptado de Widman, 2009)

A viscosidade é uma propriedade dos gases e fluidos, definida como a resistência ao movimento, sem turbulência, por parte do fluido e está relacionada com as propriedades dinâmicas desse mesmo fluido.

Esta propriedade está relacionada com o “atrito interno” do material, se um fluido tiver um elevado valor de viscosidade, a resistência ao movimento desse mesmo fluido também é alta, assim como o seu atrito interno; no caso de um material com elevada fluidez (valor da viscosidade baixo) este flui com mais facilidade, sendo o atrito interno menor.

Existem diversas classificações para os fluidos, a apresentada na Figura 2.2 recorre à relação entre a tensão de corte (relação entre a força tangencial necessária para um objeto se mover e a área lateral desse mesmo objeto) e a taxa de corte (relação da velocidade relativa de um fluido quando este está em movimento e a extensão desse mesmo fluido), sendo deste modo divididos em dois tipos, comportamento newtoniano e comportamento não-newtoniano.

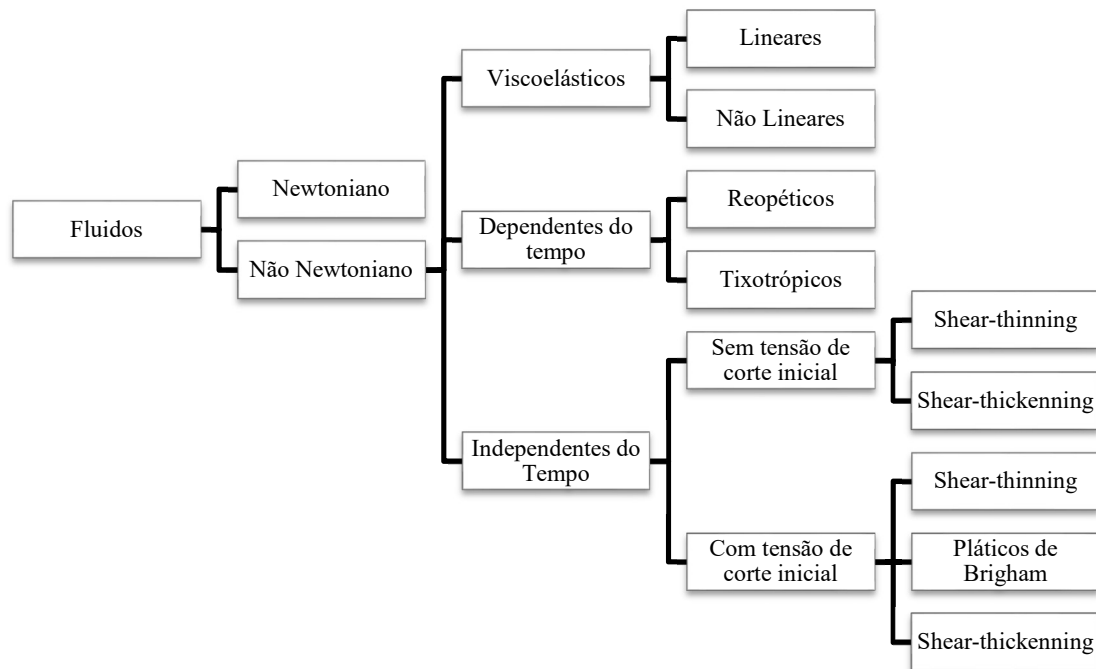


Figura 2.2 - Classificação de fluidos de acordo com a relação entre tensão e taxa de corte (Adaptado de Santos, 2011)

A análise a que será sujeita cada um destes elementos presentes na figura 2.17 será mais exhaustiva no caso dos fluidos viscoelásticos, ou seja, no caso dos fluidos que possuem características tanto de um material elástico como de um material viscoso e no caso dos fluidos tixotrópicos, ou seja, que possuem uma viscosidade tanto menor quanto maior a taxa de corte, uma vez que, estes são os comportamentos típicos de um mastique betuminoso para temperaturas e tempo de carregamento intermedias e altas, respetivamente, por essa razão possuem um interesse relevante para este trabalho. Os restantes elementos serão analisados sumariamente.

Relativamente à distinção dos comportamentos newtonianos e não newtonianos, o comportamento newtoniano distingue-se do não newtoniano, visto que, a uma dada temperatura, a sua viscosidade é independente do gradiente de velocidade, ou seja, apresenta uma viscosidade constante com a taxa de corte, apresentando ao mesmo tempo uma relação

linear entre a tensão de corte e a taxa de corte. Posto isto, o comportamento não-newtoniano caracteriza-se por uma relação não linear entre a tensão de corte e a taxa de corte, resultando em valores de viscosidade variáveis.

Devido ao facto de a viscosidade da gama de fluidos não newtonianos ser dependente de determinadas variáveis e por esse motivo deixar de ser um valor constante, passando a ser uma propriedade fortemente dependente das condições em que o fluido se encontra, faz com que seja fundamental a sua subdivisão, de modo a clarificar cada comportamento.

Posto isto, os fluidos não newtonianos são divididos do seguinte modo:

- Não-Newtonianos viscoelásticos;
- Não-Newtonianos dependentes do tempo;
- Não-Newtonianos independentes do tempo.

No que respeita ao comportamento de materiais Não-Newtonianos viscoelásticos, diz-se que um material tem comportamento viscoelástico quando exhibe, em simultâneo, características elásticas e viscosas. No caso de um escoamento permanente, não existindo alterações das condições no tempo, o gradiente de velocidade é constante e pode ser representado pela razão entre a tensão tangencial e o coeficiente de viscosidade (viscosidade dinâmica), tal como se define para um fluido newtoniano. A presença de comportamento elástico verifica-se no caso de se alterar a tensão tangencial.

Um fluido viscoelástico quando é sujeito a uma tensão, o seu componente sólido elástico distende instantaneamente na mesma proporção de magnitude da tensão aplicada. Devido à imposição da tensão constante à qual o fluido se encontra sujeito a distensão observada é crescente continuamente, no entanto esta pode ocorrer a uma velocidade maior no início e com o tempo a velocidade de distensão vai diminuindo gradualmente. A variação da velocidade de distensão descrita deve-se à combinação entre a distensão elástica e a deformação viscosa, pois a elástica atingindo o seu limite máximo obriga a que toda a subsequente deformação seja viscosa e desta forma não recuperável. (Barbosa, 2012)

Analisando agora o grupo dos fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo de carregamento, onde, como expectável, caracterizam-se por uma mudança da viscosidade em função do tempo de carregamento sob condições constantes da taxa de corte. Este grupo divide-se em dois tipos, os tixotrópicos e os reopéticos. No primeiro constata-se uma diminuição gradual da viscosidade ao longo do tempo de carregamento sob uma tensão de corte ou taxa de corte constante, nos fluidos reopéticos verifica-se o inverso, ou seja, um aumento da viscosidade sob as mesmas condições.

A variação da viscosidade com a taxa de corte, referida anteriormente, pode ser obtida experimentalmente, para elevadas temperaturas, através de viscosímetros rotativos ou, para temperaturas intermédias ou elevadas, por reómetros de corte, que devem, no entanto, ser capazes de aplicar uma gama alargada de valores de taxa de corte (Teixeira, 2015).

Por último, são apresentadas algumas conclusões, relativamente à viscosidade de mastiques betuminosos, retiradas em estudos anteriores, recorrendo ao uso do viscosímetro rotativo de Brookfiel, exceto o estudo de Guerra (2015) que recorreu ao reómetro de corte dinâmico (DSR).

Matos (2012), concluiu que a adição de filler a betumes leva a um aumento da sua viscosidade, ou de outro modo, para relações filler/betume superiores a viscosidade do masticue aumenta. Relativamente ao comportamento reológico dos mastiques, estes exibem um comportamento reológico não Newtoniano do tipo shear-thinning.

Miranda (2014), referiu que a viscosidade quer do betume quer do masticue é fortemente influenciada pela temperatura. No tocante à incorporação de filler ao betume, conclui-se que quanto maior a taxa de incorporação de filler maior o valor da viscosidade para a mesma temperatura, independentemente da origem do filler. Sendo que, para taxas de incorporação de 20% (massa) os valores de viscosidade aumentam cerca de duas a três vezes em relação ao valor da viscosidade do betume puro, isto para praticamente todos os mastiques estudados, com exceção do filler produzido com masticue com cal hidratada.

Guerra (2015), observou que na caracterização reológica dos mastiques diluídos não se verifica influência do tipo de ligante betuminoso e verifica-se pouca variação no efeito de rigidez do filler quanto ao tipo de filler, devido à ausência da interação hidrodinâmica entre partículas.

Por fim, Teixeira (2015), confirmou que a viscosidade relativa do masticue betuminoso depende, não só do tipo e concentração do filler no masticue, mas também da temperatura do masticue betuminoso. Por esse motivo, procurou obter um modelo matemático que pudesse representar uma melhoria da equação estabelecida por Pearce em 2004, não tendo, no entanto, sido possível obter um ajustamento robusto entre as diversas variáveis. Assim, aconselha-se a utilização desta equação, mas com alguma prudência para valores da temperatura inferiores a 140 °C.

2.3.1.2. Rigidez

Como referido anteriormente, os mastiques betuminosos utilizados nas misturas betuminosas a quente tem um comportamento mecânico que varia consoante a frequência de cargas e a temperatura a que está sujeito, apresentando deste modo três diferentes comportamentos, viscoso, viscoelástico e elástico, para as seguintes condições, temperaturas e tempos de carregamento elevados, intermédios e baixos, respetivamente.

Para uma melhor caracterização dos seus diferentes comportamentos é necessário conhecer os seguintes parâmetros, módulo de rigidez e ângulo de fase, estando estes parâmetros dependentes da temperatura e da frequência de aplicação de cargas, como expectável. No entanto, no caso do módulo de rigidez este depende também da forma da aplicação de cargas.

O módulo de rigidez é definido como a relação entre as amplitudes das tensões instaladas e das deformações produzidas. (Neves & Correia, 2006)

Na Figura 2.3 é apresentada a configuração geral da deformação em função do tempo como consequência da aplicação de uma carga, sendo o desfasamento entre ambos denominado de ângulo de fase. Este parâmetro permite inferir se o comportamento do masticue é predominantemente elástico, ângulo de fase nulo, ou viscoso, quando toma valores perto de 90°. Portanto, o valor do ângulo de fase é tanto maior quanto mais plástico e contrariamente, será tanto menor quanto mais elástico.

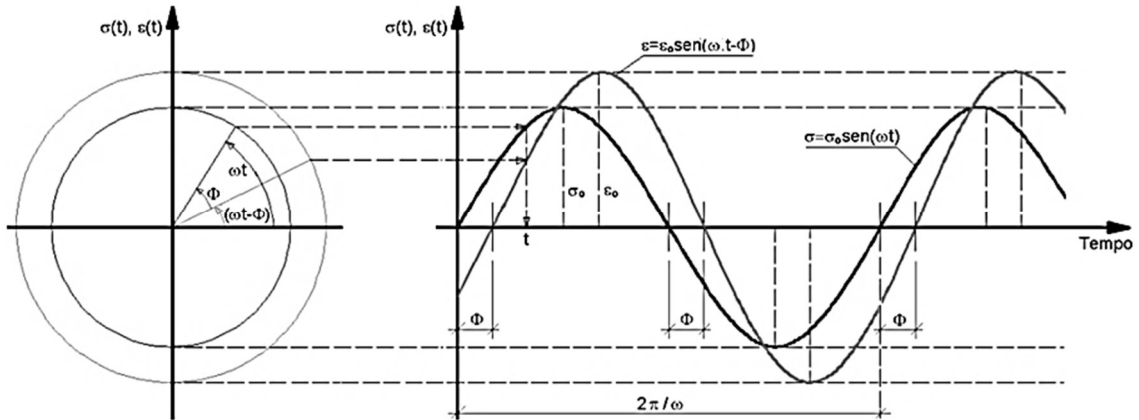


Figura 2.3 - Módulo de rigidez e Ângulo de fase - desfasamento entre a tensão e a extensão na flexão alternada

Para a obtenção destes parâmetros recorre-se, geralmente, a ensaios com aplicação de cargas repetidas com variação sinusoidal no tempo (t), o que será descrito posteriormente. Na figura 2.6 está esquematizado um exemplo de um carregamento sinusoidal com aplicação de um valor de tensão (σ) com frequência angular (ω) e dada por:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad [1]$$

$$\omega = 2\pi f \quad [2]$$

Da qual resulta uma extensão (ε), com desfasamento φ (ângulo de fase) para uma mesma frequência e dada por:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad [3]$$

Desta forma, o módulo complexo (E^*) é caracterizado pela Equação 2.4:

$$E^* = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \varphi + i \sin \varphi) = |E^*| (\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad [4]$$

A equação pode ser ainda decomposta em duas componentes:

- Uma no domínio real “E1”, que corresponde à fase elástica, ou seja, à componente de energia armazenada no material durante o carregamento e que é libertada depois com a descarga, de deformação recuperada;

- E uma outra componente imaginária “E2”, correspondente à fase plástica, ou seja, à componente de energia dissipada por atrito interno, de deformação irreversível ou residual;

$$E_1 = |E^*| \cos \varphi \quad [5]$$

$$E_2 = |E^*| \sin \varphi \quad [6]$$

O valor absoluto do módulo complexo ($|E^*|$), correntemente designado por módulo de deformabilidade, módulo dinâmico ou módulo de rigidez (S_m) é dado pela Equação 2.7:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad [7]$$

E o ângulo de fase (φ) é dado pela Equação 2.8:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad [8]$$

Na Figura 2.4, representa-se o andamento típico das sinusoides de tensão (a vermelho) e de extensão (a azul), características dos ensaios de aplicação de cargas repetidas, que ilustra o comportamento elástico ($\varphi = 0^\circ$), comportamento viscoelástico ($\varphi = 45^\circ$) e comportamento viscoso ($\varphi = 90^\circ$) do material. As correspondentes curvas histeréticas tensão-extensão apresentam-se na Figura 2.5.

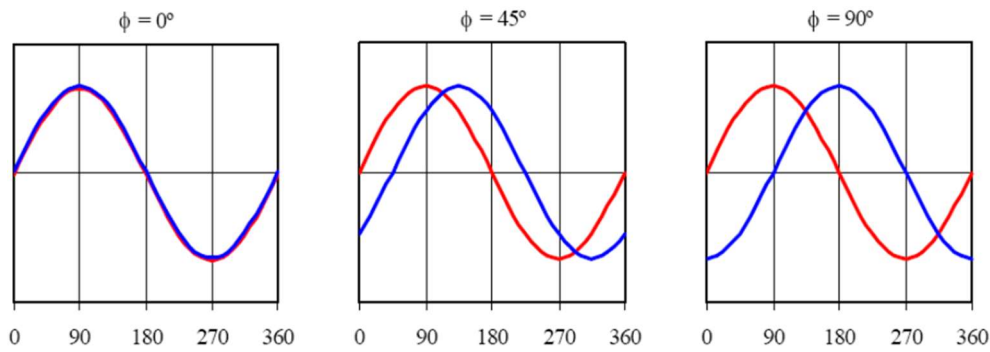


Figura 2.4 - Curvas sinusoidais de tensão e extensão (Ângulos de fase de 0° , 45° e 90°)

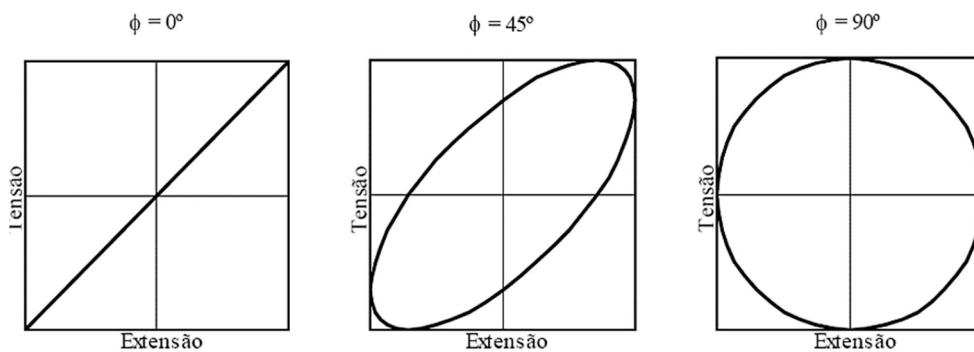


Figura 2.5 - Curvas histeréticas de tensão-extensão (Ângulos de fase de 0° , 45° e 90°)

Por outro lado, devido ao comportamento viscoelástico, uma certa quantidade de energia é dissipada e gera calor, em cada ciclo. A fórmula da energia dissipada (W_C) no ciclo C é dada pela equação 2.9:

$$W_C = \pi \sigma_0^2 \left(\frac{1}{|E^*| \sin \varphi} \right) \quad [9]$$

Quanto menor a energia dissipada mais elástica será o comportamento do betume. A equação anterior permite-nos concluir que um betume apresenta um comportamento tanto mais elástico quanto maior a expressão $|E^*|/\sin \varphi$. Este termo é referenciado pelo programa SHRP por Harrigan et al., 1994 como indicador da suscetibilidade de um betume às deformações permanentes.

Todas as expressões apresentadas dizem respeito a um carregamento que provoca, nas secções da amostra, tensões normais e que originam extensões normais a esses planos, a forma mais corrente de apresentação das propriedades mecânicas. Contudo, quando se realizam ensaios de corte repetido para determinação do módulo, obtém-se o módulo de corte

complexo G^* . É possível, no entanto de adaptar as expressões enunciadas anteriormente para o caso do carregamento por corte.

Assumindo um comportamento linear viscoelástico e isotrópico, e tendo em consideração que a componente imaginária do coeficiente de Poisson é praticamente nula pode relacionar-se o módulo complexo normal (E^*) com o módulo complexo de corte (G^*) da seguinte forma:

$$G^* = \frac{E^*}{2(1+\nu)} \quad [10]$$

As expressões passam assim a ter as configurações apresentadas na tabela 2.1.

Equação	Carregamento normal ou axial	Carregamento tangencial ou de corte
1	$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$	$\tau = \tau_0 \sin(\omega t)$
3	$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$	$\delta = \delta_0 \sin(\omega t - \varphi)$
4	$E^* = E^* (\cos \varphi + i \sin \varphi)$	$G^* = G^* (\cos \varphi + i \sin \varphi)$
5	$E_1 = E^* \cos \varphi$	$G_1 = G^* \cos \varphi$
6	$E_2 = E^* \sin \varphi$	$G_2 = G^* \sin \varphi$
7	$ E^* = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$	$ G^* = \sqrt{G_1^2 + G_2^2}$
8	$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{E_2}{E_1} \right)$	$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{G_2}{G_1} \right)$
9	$\omega_c = \pi \sigma_0^2 \left(\frac{1}{ E^* \sin \varphi} \right)$	$\omega_c = \pi \tau_0^2 \left(\frac{1}{ G^* \sin \varphi} \right)$

Tabela 2.1 - Equações que descrevem o módulo de rigidez e o ângulo de fase de acordo com o tipo de carregamento

2.3.1.3. Ensaios utilizados para determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase

A avaliação do módulo de rigidez e do ângulo de fase é frequentemente realizada em provetes submetidos a cargas repetidas com variação sinusoidal no tempo, ou outro tipo de impulso, com tensão ou extensão imposta. (Neves & Correia 2006)

Para a determinação destas características existem vários procedimentos correntes, a temperatura constante, podendo variar o tipo de equipamento, o tipo de provete e o tipo de força aplicada (tração/compressão uniaxial; corte; flexão e tração indireta). As condições de ensaio devem procurar reproduzir, o melhor possível, as condições das solicitações induzidas pela passagem de tráfego.

Dado que existem diferentes tipos de ensaio para avaliar a mesma grandeza, torna-se imperativo comparar os seus resultados, tendo em atenção as diferentes condições de ensaio, que poderão condicionar os resultados obtidos.

Tayebali et al. (1994) realizaram ensaios de flexão, axiais e de tração indireta, concluindo que a rigidez obtida com ensaios de tração indireta assume valores superiores à rigidez obtida com ensaios de flexão e axiais. Este facto pode dever-se à necessidade de arbitrar um valor para o coeficiente de Poisson, quando se calcula o módulo de rigidez utilizando ensaios de tração indireta.

Mais tarde, Di Benedetto and De La Roche (1998), questionaram a fiabilidade dos resultados obtidos por ensaios de corte comparativamente com os resultados de ensaios de flexão, sendo que mais uma vez, observaram-se diferenças entre os mesmos, porém os resultados em flexão demonstraram ser mais consistentes.

Seguindo a norma europeia EN 12697-26 (CEN, 2004), Carbonneau et al., confirmaram o que já antes tinha sido constatado, ou seja, para uma mesma mistura os resultados podem diferir. Deste modo, torna-se imperativo que o seu valor seja sempre acompanhado do método de ensaio e das condições de ensaio utilizadas na sua determinação. Na figura 2.6, proveniente do estudo de Carbonneau et al., podem-se observar as diferenças obtidas por quatro ensaios com equipamentos diferentes sobre a mesma mistura.

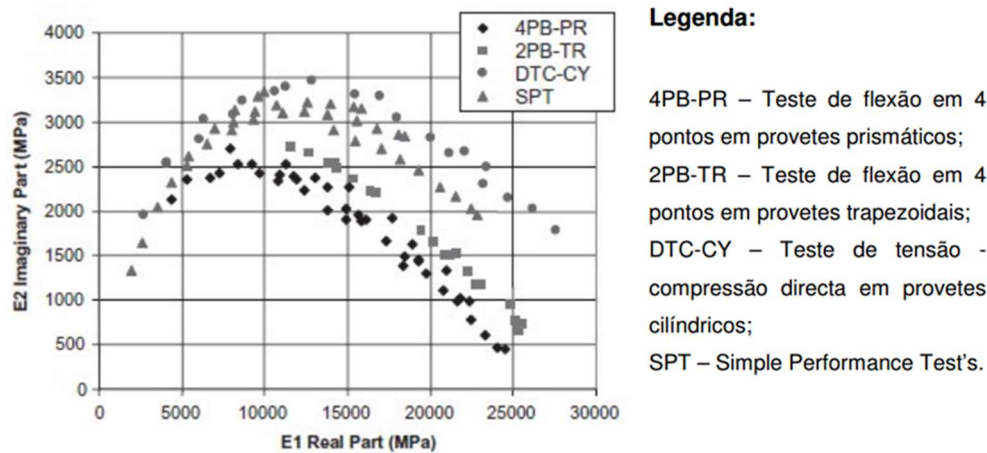


Figura 2.6 - Comparação resultados de diferentes tipos de ensaios (Carbonneau et al., 2009)

Em relação à reprodutibilidade para a determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase, deve ser sempre mencionado o ensaio utilizado para a sua determinação, pois se para o ângulo de fase se consegue uma boa reprodutibilidade independentemente do ensaio utilizado, para o módulo de rigidez isso não acontece e existem desvios significativos (Di Benedetto et al., 2001).

Já em relação à repetibilidade, o módulo de rigidez é um bom indicador das características mecânicas de uma mistura betuminosa, pois se o processo for feito de maneira cuidadosa o desvio dos valores pode atingir apenas um valor baixo de 5% (Di Benedetto et al., 2001).

2.3.1.4. Representação das propriedades reológicas

O módulo de deformabilidade e o ângulo de fase podem ser representados graficamente recorrendo a vários métodos. Podem usar-se as curvas isócronas, as curvas isotérmicas, as curvas mestras, o diagrama de Black ou o diagrama de Cole-Cole.

Nas curvas isócronas, representa-se a relação entre os módulos (ou os ângulos de fase) e a temperatura, podendo assim avaliar-se a influência da temperatura nas propriedades viscoelásticas, para diferentes frequências de ensaio ou para diferentes materiais

(Eurobitume, 1996; Pereira, 2014). Neste tipo de análise, como se pode verificar no exemplo ilustrado na Figura 2.7, são geralmente retiradas as seguintes conclusões:

- À medida que a temperatura aumenta o módulo complexo diminui;
- À medida que a temperatura aumenta o ângulo de fase também aumenta.

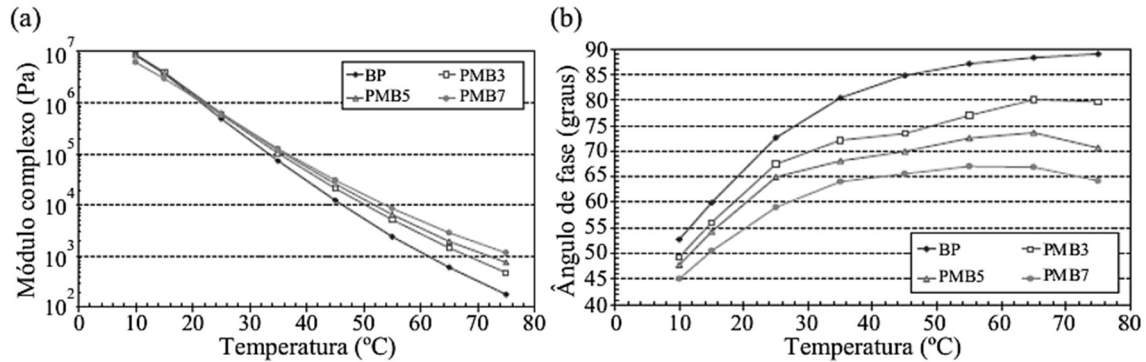


Figura 2.7 - Exemplos de isócronas de diferentes betumes submetidos a uma frequência de 1 Hz: (a) isócronas do módulo complexo e (b) isócronas do ângulo de fase (adaptado de (Airey, 2004))

Na Figura 2.8 temos curvas isotérmicas, que tal como as curvas isócronas, permitem uma representação gráfica de propriedades viscoelásticas. No entanto, ao contrário das isócronas esta forma de representação realiza-se em função da frequência (ou tempo de carregamento) e a uma temperatura constante. (Eurobitume, 1996; Pereira, 2014). As conclusões por elas retiradas são análogas às referidas anteriormente, quer isto dizer que:

- À medida que a frequência aumenta o mesmo se verifica em relação ao módulo complexo;
- Globalmente, o ângulo de fase diminui com o aumento da frequência;
- Em alguns casos, para uma mesma frequência, o ângulo de fase é maior a uma temperatura mais elevada.

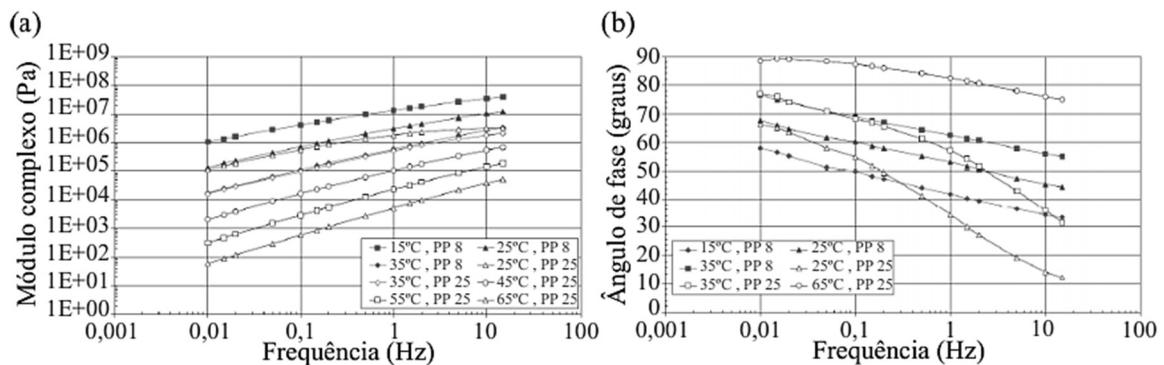


Figura 2.8 - Exemplos de isotérmicas de um betume: (a) isotérmicas do módulo complexo e (b) isotérmicas do ângulo de fase (adaptado de (Airey, 2002))

Em suma, as isócronas e as isotérmicas permitem estabelecer a variação da rigidez e do ângulo de fase com a temperatura e a frequência de carregamento, respetivamente.

As curvas mestras, resultam da sobreposição de medições realizadas a diferentes temperaturas e frequências, formando uma curva contínua, Figura 2.9. A curva assenta no princípio da sobreposição tempo-temperatura (TTSP – Time Temperature Superposition Principle), e relaciona o módulo de deformabilidade (ou o ângulo de fase) com a frequência reduzida (f_R). Segundo este princípio, as propriedades reológicas do material são influenciadas de igual modo por elevadas frequências e baixas temperaturas.

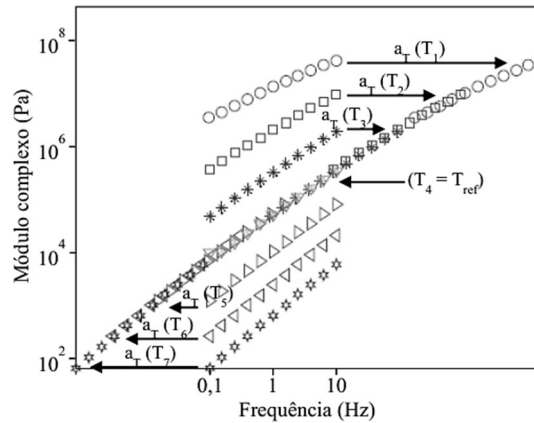


Figura 2.9 - Exemplo de aplicação do princípio da sobreposição tempo-temperatura para a construção de uma curva-mestra correspondente ao módulo complexo (adaptado de (Yussof, 2012))

As curvas são obtidas através de um fator de deslocamento, correspondente a um deslocamento horizontal, obtendo-se assim uma curva-mestra para uma dada temperatura de referência (T_{REF}). Os fatores de deslocamento utilizados, podem ser apresentados numa tabela ou num gráfico, e são obtidos através da equação de Wiliam, Landel e Ferry, equação essa que depende da temperatura, da temperatura de referência e de duas constantes empíricas que dependem do material.

Outro aspeto relevante, está relacionado com a forma das mesmas, ou seja, uma curva suave é um bom indicador da equivalência tempo-temperatura, ao contrário de uma curva irregular ou dispersa, que indica uma falha no princípio de sobreposição tempo-temperatura. (Airey, 1997; Read and Whiteoak, 2003; Yussof, 2012)

Por fim, na Figura 2.10 são apresentados exemplos de curvas mestras de alguns betumes de pavimentação, um betume puro e três betumes modificados com polímeros SBS, posto isto, são comumente retiradas as seguintes conclusões:

- O módulo complexo de um betume puro é bastante semelhante ao de um betume modificado com polímeros SBS. No entanto, para baixas frequências o módulo complexo do betume modificado tende a ser maior do que o do betume puro enquanto que para altas frequências se verifica o oposto;
- O ângulo de fase apresenta uma grande variação dependendo do processo de fabrico do betume. Contudo, esta diferença é mais notória para baixas frequências, onde o betume puro apresenta um valor mais elevado para o ângulo de fase, sendo esta variação inexistente ou até mesmo contrária para frequências muito elevadas.

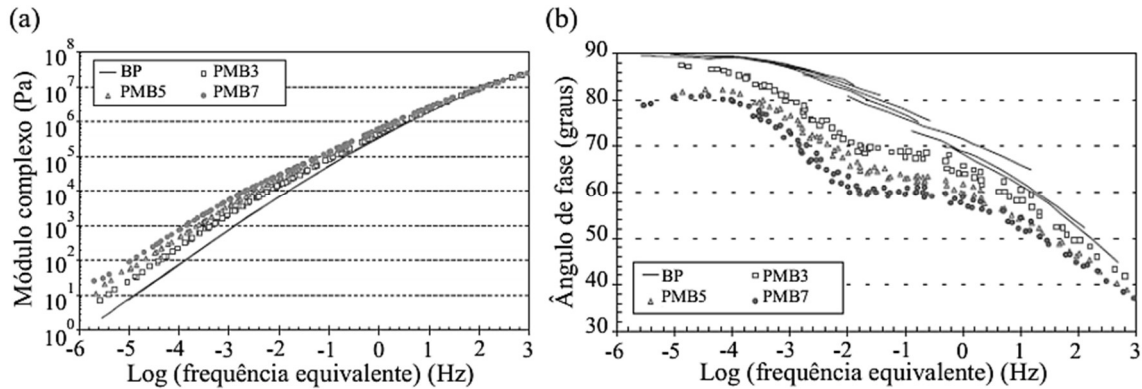


Figura 2.10 - Exemplo de curvas-mestra de diferentes betumes (adaptado de (Airey, 2004))

O diagrama de Black é usado para representar o módulo complexo em função do ângulo de fase, sendo que, nem a temperatura nem a frequência de carregamento (tempo de carregamento) incorporam os eixos do gráfico.

Na Figura 2.11 temos um exemplo de um digrama de Black que, tal como na Figura 2.13, apresenta um betume puro e três betumes modificados por polímeros SBS com diferentes taxas de incorporação.

A forma regular ou irregular da curva, tal como nas curvas mestras, é um indicador do cumprimento da sobreposição tempo-temperatura. (Eurobitume, 1996; Silva, 2005). Na presença de polímeros observa-se, geralmente, falha do princípio de sobreposição tempo-temperatura.

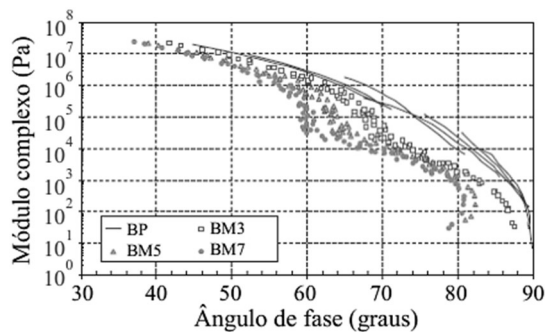


Figura 2.11 - Exemplo de diagramas de Black de diferentes betumes (adaptado de (Airey, 2004))

Por último, a representação gráfica no diagrama de Cole-Cole, Figura 2.12, ilustra a relação entre as componentes reais e imaginárias do módulo de rigidez, permitindo deste modo analisar o balanço viscoelástico do betume. Nesta representação, assim como referido na anterior, a temperatura e a frequência (tempo de carregamento) não incorporam os eixos do gráfico (Eurobitume, 1996; Airey, 1997; Silva, 2005).

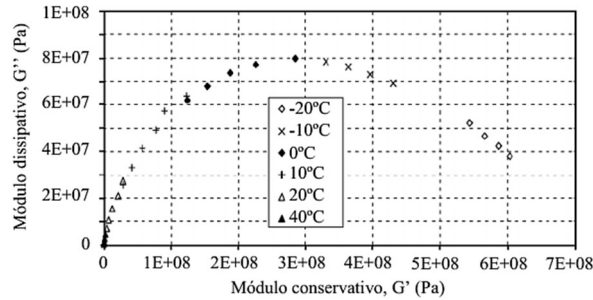


Figura 2.12 - Exemplo de um diagrama de Cole-Cole (adaptado de (Yussof, 2012))

2.3.2. Ductilidade

Outra propriedade mecânica relevante no comportamento dos mastiques é a ductilidade, uma vez que representa uma medida de grau de deformação plástica que o material suporta até à rotura.

Nos pavimentos rodoviários é necessário que os materiais betuminosos possuam alguma ductilidade, de modo a que consigam acomodar algumas variações dimensionais a que possam estar sujeito, caso contrário, poderam romper por tração ou apresentar ondulações à superfície, devido a uma baixa ductilidade ou a uma ductilidade excessiva, respectivamente.

Para avaliar esta propriedade recorre-se a ensaios de ductilidade, no caso dos betumes e a ensaios de tração directa, no caso das misturas betuminosas. Os principais resultados obtidos nestes ensaios são a tensão e o alongamento na ruptura.

A figura 2.13 representa o gráfico típico do ensaio de tração, onde podemos observar a diferença de comportamento entre materiais dúcteis e materiais frágeis. Assim, um material dúctil antes da rotura apresenta uma deformação plástica significativa, enquanto que um material frágil exibe um comportamento elástico até à rotura.

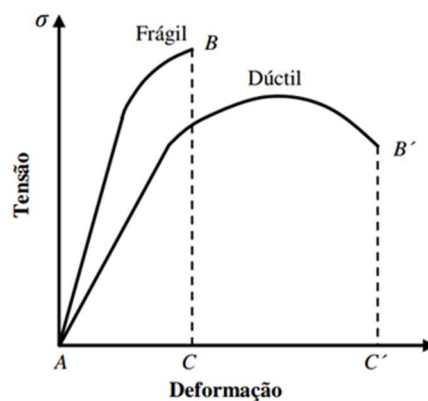


Figura 2.13 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materiais dúcteis e frágeis

Silva, 2005, realizou ensaios monotónicos de tração tendo como variáveis: o tipo de fíler, o tipo de betume, o tipo de condicionamento, o teor em betume do mástico, a velocidade de carregamento e a temperatura.

Na figura 2.14, é apresentado um gráfico resultante desse mesmo estudo, que permite observar o comportamento de um mastique antes e após rotura para diferentes condições de ensaio.

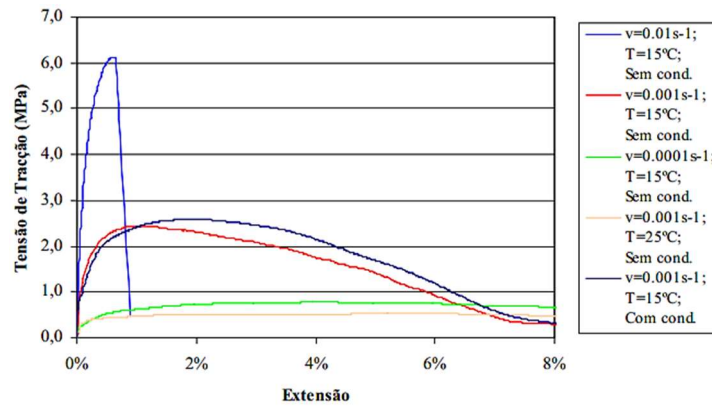


Figura 2.14 - Exemplo de gráficos tensão-extensão de um mastique sujeito a diferentes configurações de ensaio (adaptado de (Silva, 2005))

As conclusões retiradas por (Silva, 2005), referentes ao ensaio de tração monotónica, foram as seguintes:

- A resistência máxima de tração é obtida para uma extensão relativamente reduzida;
- A resistência do mastique aumenta para velocidades elevadas e diminui com o aumento da temperatura;
- O comportamento do mastique é frágil a uma velocidade de aplicação de carga elevada;
- O comportamento do mastique é sobretudo viscoelástico a uma velocidade de aplicação de carga moderada;
- O comportamento do mastique é plástico para uma velocidade de aplicação de carga reduzida ou a temperaturas elevadas;
- A temperatura é uma das variáveis que mais influencia o comportamento do mastique, verificando-se que a resistência à tração diminui significativamente quando a temperatura aumenta;
- A variação da resistência com a velocidade de aplicação de cargas é muito semelhante para os diferentes mastiques estudados, de onde se conclui que deve-se optar por um teor em betume menor e por um betume mais duro.

Em vista da importância da resistência de fratura em pavimentos betuminosos, uma vez que, este é um dos defeitos mais comuns que afetam a vida útil de um pavimento flexível, reduzindo a sua capacidade estrutural, muitas pesquisas desde o início da década de 1970 começaram a aplicar a mecânica das fraturas para analisar o comportamento de fadiga dos materiais betuminosos.

A abordagem convencional para fadiga, baseada em deformação, não considera o efeito do fendilhamento. Dada a complexidade da propagação de fendas, tem havido dificuldade em incorporar a mecânica das fraturas na área da pavimentação.

Segundo Koh e Roque (2010), para avaliar e prever o desempenho do pavimento flexível e desenvolver modelos apropriados em relação à resistência ao fendilhamento é necessário determinar os limites de fratura na tração, deformação de fratura e energia de fratura.

A energia de fratura é definida como a quantidade de energia necessária para criar uma unidade de área de uma fenda e é uma propriedade importante relacionada com a resistência à fadiga de ligantes betuminosos (Romeo, 2008). Além disso, a energia de fratura é uma propriedade fundamental, independente do estado de tensões, condições de carregamento e geometria do provete.

Koh e Roque (2010), realizam ensaios de tração direta “dog-bone” (Dog Bone Direct Tension - DBDT) e compararam com o ensaio de tração indireta do Superpave (Indirect Tension Test – IDT), e verificaram que apesar do parâmetro de resistência à tração e o parâmetro de deformação na rutura apresentarem valores diferentes, o valor da energia de fratura era muito próximo em ambos os ensaios, para materiais similares, como ilustrado na Figura 2.15. O que confirma o referido anteriormente, a respeito da energia de fratura ser uma propriedade fundamental.

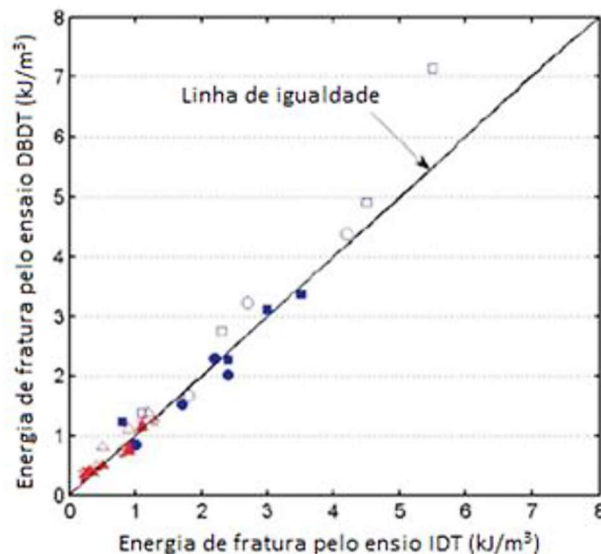


Figura 2.15 - Comparação de energia de fratura dos resultados dos ensaios de IDT e DBDT [Adaptado de Koh e Roque (2010)]

Braham et al. (2007) investigaram a energia de fratura de misturas asfálticas, determinada através do ensaio de tração em formato de disco (“disk-shaped compact tension test” – DC(T)). Um dos efeitos estudados, foi o efeito da temperatura na energia de fratura, tendo concluído que para temperaturas baixas e medias o material apresenta um comportamento frágil, enquanto que para temperaturas altas o material apresenta um comportamento mais dúctil.

2.4. Considerações Finais

Neste capítulo foi referida a importância e o interesse, demonstrado nas últimas décadas, no estudo do comportamento do mástico betuminoso e dos seus constituintes.

O comportamento do mástico é bastante influenciado pelas características intrínsecas dos seus materiais, filler e betume, como tal foram realizados diversos estudos permitindo avaliar o impacto dessas características na resposta do mástico quando solicitada por solicitações externas.

O presente trabalho deu continuidade a um estudo anterior (Antunes, 2013) em que foi feita uma avaliação essencialmente física e química de mastiques utilizando diversos filleres, onde constatou que as propriedades dos mastiques betuminosos dependem das propriedades específicas dos filleres, mas também da afinidade que determinados betumes possuem com determinados filleres; assim, a ligação entre o betume e as partículas de filler depende de interações físico-químicas, não se podendo ter como base apenas o estudo de propriedades físicas dos materiais para aferição do comportamento dos mastiques betuminosos.

No presente capítulo é, também, abordado o comportamento do mástico betuminoso em termos do seu comportamento reológico, função do tipo e teor de filler e da temperatura a que o mástico está sujeito. Dada a inexistência de metodologias de ensaio normalizadas para a maior parte das propriedades a avaliar nos mastiques betuminosos optou por utilizar metodologias de ensaio existentes para caracterização dos betumes, tais como, determinação da viscosidade através do viscosímetro de Brookfield o que pode permitir prever com alguma razoabilidade o desempenho das misturas betuminosas (Teixeira, 2015).

O reómetro de corte dinâmico (DSR) permite avaliar o comportamento reológico e a resistência à fadiga dos mastiques (Guerra, 2015) mas é usualmente admitido que o comportamento de misturas betuminosas quando em serviço num pavimento é mais próximo de um comportamento em flexão. Deste modo, existe o interesse de empregar outras metodologias de ensaio para um melhor entendimento do efeito do filler e do ligante betuminoso no comportamento reológico e mecânico de mastiques em condições de serviço.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo apresenta o programa experimental, nomeadamente os materiais estudados, formulação e produção dos mastiques betuminosos, a descrição dos ensaios laboratoriais realizados, preparação dos provetes e procedimentos de ensaio.

3.1. Materiais estudados

Dado que o presente estudo tem como propósito dar continuidade a estudo anterior (Antunes, 2013) foram utilizados, essencialmente, os mesmos materiais.

3.1.1. Fíleres

Neste estudo foram utilizados dez fíleres, quatro artificiais, três naturais e três reciclados, como apresentado na Tabela 3.1:

Fíler	Designação	Tipo
CEM I 52,5R	Cimento Portland tipo I 52,5 R	Artificiais
CL90-H100	Cal hidratada cálcica com mais de 90% de hidróxidos de cálcio	Artificiais
H200-CL70	Cal hidratada cálcica com mais de 70% de hidróxidos de cálcio	Artificiais
NHL5	Cal hidráulica natural	Artificiais
Areia de Rio	Fíler de areia do rio	Naturais
Pó de Tijolo	Fíler de pó de tijolo	Reciclados
Calcário	Fíler comercial calcário	Naturais
Recuperado	Fíler recuperado	Naturais
Cinzas Volantes	Fíler de cinzas volantes	Reciclados
RCD	Resíduos de construção e demolição	Reciclados

Tabela 3.1 - Identificação dos diferentes fíleres no fabrico dos mastiques betuminosos

De forma sucinta, os fíleres artificiais são os de origem mineral fabricados por processos industriais envolvendo modificações térmicas ou outras. Foram estudados os seguintes fíleres artificiais:

- O cimento Portland, constituído essencialmente por clínquer ($\geq 95\%$), com uma resistência mecânica à compressão mínima, aos 28 dias de idade, de 52,5 MPa, a que corresponde a mais alta classe de resistência existente, e com características de endurecimento mais rápido. Este material encontra-se regulamentado através da norma europeia EN 197-1 (CEN, 2011);
- As cal hidratadas cálcicas, CL90 e CL70, obtidas da rocha calcária, contêm menos de 5% de carbonato de magnésio e mais de 90% e 70% de hidróxidos de cálcio, respetivamente. Este material encontra-se regulamentado através da norma europeia EN 459-1 (CEN, 2015);
- E a cal hidráulica natural, com uma resistência mecânica à compressão mínima, aos 28 dias de idade, de 5 MPa, a que corresponde a mais alta classe de resistência existente. Este material encontra-se regulamentado através da norma europeia EN 459-1 (CEN, 2010);

Os fileres naturais resultam de britagem e moagem de rocha, a sua produção requiere unicamente processos mecânicos.

Neste estudo foram considerados o filer calcário, o filer recuperado e o filer areia do rio. O primeiro, como o próprio nome sugere, provem da britagem de rocha calcária e trata-se de um filer comercial com uma elevada procura para o fabrico de misturas betuminosas. O segundo provém da britagem de agregados de natureza basáltica e calcária. O último, foi introduzido neste estudo pois apresenta um elevado teor em sílica como alguns materiais de natureza granítica utilizados em estradas.

Por ultimo, os fileres reciclados resultam de processamento de material inorgânico, como por exemplo, material utilizado anteriormente na construção. O estudo destes materiais teve em vista a redução da deposição de materiais inertes em aterros, conferindo-lhes outros usos.

Os fileres reciclados, pó de tijolo e RCD, resultam da moagem de desperdícios de telha e de agregado de “betão britado”, respetivamente. As cinzas volantes são um subproduto, ou seja, um resíduo que resulta de uma operação industrial.

Estes fileres, à exceção do CL 70-H200, foram caracterizados fisicamente, quimicamente e mecanicamente por interação físico-química no estudo elaborado por Antunes (Antunes 2013), onde foram avaliadas as seguintes propriedades, enumeradas na Tabela 3.2.

Antunes, (Antunes, 2013), também quantificou a temperatura de amolecimento dos mastiques betuminosos e a sua variação comparativamente com o betume que lhe deu origem.

Propriedade	Método de Ensaio	Unid.	CEM	CL90	NHL 5	Areia do rio	Pó de Tijolo	Calcá rio	Recup erado	Cinzas	RCD
Teor em sílica pura	Adaptação da norma NP EN 196-2 (IPQ, 2006)	%	21	0,8	19,2	98,2	77,0	6,3	32,5	50,8	35,2
Teor em óxido de cálcio		%	62	72,5	51,0	2,8	0,5	33,6	19,6	2,8	19,6
pH		-	13	12,8	12,7	10,1	9,6	12,5	11,5	8,8	11,5
Superfície específica	NP EN 196-6 (IPQ, 2010)	m ² /Kg	4,34	21,22	6,71	3,80	6,50	5,63	3,47	3,46	5,25
VAM	NP EN 933-9 (IPQ, 2011) anexo A	g	1,7	1,7	1,7	3,3	3,3	3,3	5,0	1,7	5,0
Passado #0,063mm	EN 933-10 (CEN, 2009)	%	99	100	79	84	87	80	85	93	82
Passado #0,20mm		%	100	100	93	100	100	93	93	100	100
Passado #2,0mm		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Vazios de Rigden	NP EN 1097-4 (IPQ, 2012)	%	45%	71%	52%	36%	45%	36%	38%	36%	40%
Teor em água	NP EN 1097-5 (IPQ, 2011)	%	0,21	1,36	0,79	0,00	0,22	0,05	0,36	0,00	0,87
Massa volúmica	NP EN 1097-7 (IPQ, 2012)	Mg/m ³	3,29	2,32	2,72	2,64	2,71	2,72	2,76	2,51	2,63

Suscetibilidade à água	EN 1744-4 (CEN, 2005)	%	0,1	0,9	0,3	0,3	1,2	0,2	0,0	0,6	1,0
Nº de betume	NP EN 13179-2 (IPQ, 2010)	-	40	120	48	26	36	28	30	23	36
Poder absorvente	NF P 98-256-1 (AFNOR, 1991)	g	35	21	29	60	35	55	44	59	44
(f/b)max	-	-	0,92	0,53	0,76	1,56	0,85	1,41	1,15	1,43	1,15
ΔT_{ab}	NP EN 13179-1 (IPQ, 2010)	°C	20	12	18	10	14	11	10	7	12

Tabela 3.2 - Propriedades físicas e químicas dos fileres (Antunes, 2013)

3.1.2. Ligante betuminoso

Neste trabalho, foi selecionado um dos quatro betumes utilizados em trabalho anterior (Antunes, 2013), o betume de pavimentação 35/50 (Figura 3.1). Pretendeu-se com esta seleção utilizar o betume que em Portugal tem uma maior utilização no fabrico de misturas betuminosas a quente.



Figura 3.1 – Latas de betume de penetração 35/50 com capacidade de 5 litros

Antes da preparação dos provetes de mastiche betuminoso, procedeu-se a uma preparação de subamostras de betume, dividindo as latas de 5 litros noutras com menor capacidade. É de frisar, que este procedimento é feito de modo análogo para todos os ensaios presentes neste trabalho.

A lata com o betume de penetração nominal 35/50 foi aberta e colocada em estufa durante 3 horas a uma temperatura de $85 \pm 5^\circ\text{C}$ acima da temperatura de amolecimento (50°C), tendo-se adotado uma temperatura de 140°C .

Retirou-se a lata da estufa e, após uma correta homogeneização do seu conteúdo, verteu-se o betume em latas com menor capacidade.

3.2. Fabrico do mastique betuminoso

3.2.1. Composição dos mastiques

Neste estudo produziram-se vinte mastiques betuminosos, formulados com os dez fileres referidos anteriormente e com o betume de penetração 35/50, usando duas relações volumétricas filer-betume (f/b)v de 0,3 e de 0,6, exceto no caso das cais hidratadas cálcicas onde foram usadas as relações (f/b)v de 0,15 e 0,3.

Na Tabela 3.3, são enumeradas as relações volumétricas adotadas neste estudo, em função de cada filer. No entanto, uma vez que em alguns estudos em vez de se considerarem relações volumétricas consideram-se relações ponderais, optou-se por discriminar na presente tabela as seguintes relações: relação volumétrica filer/betume (f/b)v; relação volumétrica filer/mastique (f/m)v; relação ponderal filer/betume (f/b)p e relação ponderal filer/mastique (f/m)p.

Relações		CEM I 52,5R	CL 90 - H100	CL70 - H200	NHL5	Areia do rio	Pó de Tijolo	Calcá- rio	Recup- erado	Cinzas Volant- es	RCD
<i>Formulação adotada em todos os ensaios deste estudo</i>	(f/b)v	0,60	0,30	0,30	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
	(f/m)v	0,38	0,23	0,23	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
	(f/b)p	1,91	0,68	0,68	1,58	1,54	1,58	1,58	1,61	1,46	1,53
	(f/m)p	0,66	0,40	0,40	0,61	0,61	0,61	0,61	0,62	0,59	0,60
<i>Formulação adotada no ensaio de ductilidade</i>	(f/b)v	0,30	0,15	0,15	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	(f/m)v	0,23	0,13	0,13	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
	(f/b)p	0,96	0,34	0,34	0,79	0,77	0,79	0,79	0,80	0,73	0,77
	(f/m)p	0,49	0,25	0,25	0,44	0,43	0,44	0,44	0,45	0,42	0,43

Tabela 3.3 - Relações volumétricas e ponderais utilizadas na formulação dos mastiques em estudo

Na primeira formulação apresentada na Tabela 3.8 a maioria dos mastiques exhibe uma relação volumétrica filer/betume de 0,6, contudo, nos casos em que essa relação era superior ou muito próxima da razão f/b máxima adotou-se (f/b)v de 0,3, pois a relação de 0,6 conduzia à produção de um mastique muito duro ou à própria inviabilização da mistura de todo o material.

Relativamente à segunda formulação, teve como objetivo aferir o impacto do acréscimo do teor em betume no tipo de comportamento do mastique betuminoso, como tal optou-se por reduzir a primeira formulação para metade.

3.2.2. Fabrico

Considerando as características dos fileres e do ligante betuminoso, foi utilizado o seguinte protocolo experimental:

- Definição das quantidades de filer e betume, tendo em conta as respetivas massas volúmicas, a razão volumétrica adotada e o volume do molde;

- Colocação do filer e do betume numa estufa à temperatura de 150 °C com o objetivo de facilitar a mistura dos mesmos;
- Colocação do recipiente com betume sobre a manta de aquecimento;
- Após homogeneizar o betume, incorporação lenta do filer para minimizar o aparecimento de bolhas de ar no preparado, como ilustrado na Figura 3.2;
- Colocação da mistura no respetivo molde.



Figura 3.2 – Fabrico dos mastiques betuminosos

3.3. Metodologias de ensaio do mastique

3.3.1. Tipo de ensaios

A normalização europeia não prevê metodologias de ensaio para a caracterização mecânica do mastique betuminoso, como tal, foi necessário definir as configurações de ensaio a utilizar para caracterizar o seu comportamento. Assim, foram utilizados neste trabalho métodos de ensaio normalizados no âmbito da caracterização de betumes e da caracterização de misturas betuminosas, realizando-se, sempre que necessário, alterações e/ou adaptações para atender ao comportamento específico do mastique betuminoso.

É de frisar, a impossibilidade de recorrer a inúmeros ensaios de caracterização mecânica das misturas betuminosas, dado o comportamento extremamente deformável que o mastique betuminoso exhibe, mesmo a temperaturas na ordem dos 25°C.

Posto isto, e tendo em conta o equipamento disponível, foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais (Tabela 3.4):

Ensaio Realizado	Norma Utilizada	Objetivos
<i>Ensaio de penetração a 25°C (Ensaio empírico)</i>	EN 1426 (CEN, 2015)	Avaliar o impacto da adição de filer na consistência do betume à temperatura de serviço.
<i>Ensaio monotónico de compressão uniaxial</i>	-	Recorrendo a um conjunto de estados de tensão uniforme pretende-se avaliar o comportamento do mastique relativamente a forças de compressão.

<i>Ensaio de ductilidade - método força-deslocamento</i>	NP EN 13589 (IPQ, 2013); EN 13703 (CEN, 2003)	Aferir o tipo de rotura de cada mastique consoante a sua natureza, a percentagem de filer e a temperatura a que esteja sujeito.
<i>Ensaio cíclico de flexão - viga de 4 pontos</i>	EN 12697-26 (CEN, 2004)	Avaliar as propriedades reológicas dos mastiques, mais concretamente, módulo complexo e ângulo de fase.

Tabela 3.4 – Ensaios realizados no presente estudo

3.3.2. Ensaio de penetração a 25°C

O betume e os mastiques foram caracterizados através do ensaio de penetração a 25°C. Este ensaio, especificado na EN 1426 (CEN, 2015), permite avaliar de forma indireta a viscosidade do material à temperatura de serviço.

O ensaio inicia-se com o enchimento de uma cápsula de penetração até uma altura que, uma vez arrefecida à temperatura ambiente, seja dez milímetros superior à penetração expectável. De seguida, é coberta com um vidro de relógio, para evitar a formação de bolhas de ar e para proteger do pó. A amostra é deixada a arrefecer durante 90 minutos à temperatura ambiente, sendo posteriormente colocada num banho de água a 25°C durante mais 90 minutos, com o objetivo de homogeneizar a sua temperatura. Por fim, realiza-se a determinação da penetração a 25°C com o penetrómetro. São realizadas três penetrações, utilizando três agulhas de penetração diferentes, distanciadas entre si no máximo 10mm e distanciadas das paredes no máximo 10mm. O valor da penetração corresponde à média aritmética dos três valores obtidos, expresso em décimas de milímetros. Na Figura 3.3, apresenta-se o equipamento usado na realização do ensaio, assim como, a penetração de um dos mastiques.

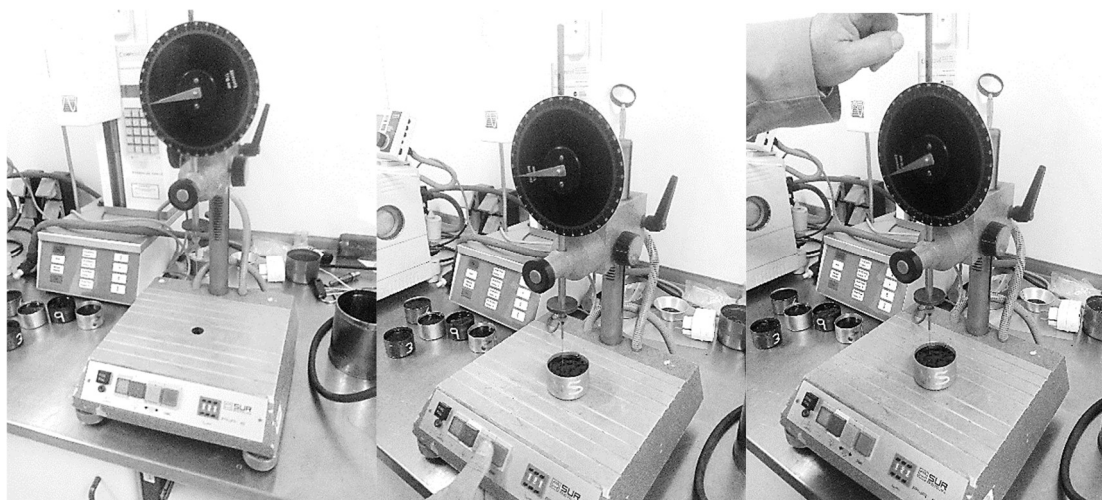


Figura 3.3 - Ilustração do equipamento e do ensaio de penetração a 25°C

3.3.3. Ensaios de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente

O procedimento deste ensaio foi estabelecido tendo em conta os pressupostos associados à realização de um ensaio de carga e as considerações feitas por Silva, 2005.

Assim sendo, na realização do ensaio de compressão uniaxial foi aplicada uma carga monotónica crescente. Este ensaio foi realizado em controlo de deslocamento, impondo um

aumento de deformação (ou extensão) a uma “velocidade de deformação” igual a 800 $\mu\text{m/s}$, correspondente a um aumento de extensão igual a 0,01/s.

Foram utilizadas duas configurações de ensaio diferentes, variando apenas a temperatura de ensaio, onde para cada uma delas foram ensaiados quatro provetes, permitindo deste modo avaliar o comportamento do masticue a diferentes temperaturas. As temperaturas selecionadas foram de 5 °C e 15°C, dado que a temperaturas superiores a 20 °C os provetes de masticue têm uma tendência para se deformarem excessivamente, impedindo a avaliação do comportamento do masticue e influenciando a resposta obtida.

Salienta-se que se optou pela realização de ensaios a duas temperaturas para comparação entre o comportamento plástico e o comportamento elástico não linear.

3.3.3.1. Preparação dos provetes de ensaio

Dado que se está perante um processo experimental, foram identificados alguns procedimentos no fabrico do masticue que importa destacar, uma vez que, podem condicionar o resultado final da mistura.

Antes de se verter a mistura para os moldes, no ensaio de compressão, é necessário colocá-la na estufa, a 150 °C durante 10 min. Depois de retirada da estufa, é colocada sobre a manta de aquecimento e procede-se à sua homogeneização manual com a ajuda de um utensílio próprio, o que leva a um tempo de fabrico dos masticues betuminosos entre os 20 e 30 minutos, dependendo do tipo de fíler.

A mistura é vertida para um molde com 40x30x5cm³ que foi adaptado e subdividido de modo a permitir a obtenção de 8 provetes com 5x5x8cm³ (Figura 3.23). Para uma fácil desmoldagem, o molde metálico foi previamente lubrificado com glicerina, funcionando esta como descofrante.

Os provetes são deixados a arrefecer durante, aproximadamente, 1 hora à temperatura ambiente, sendo por fim, colocados numa sala a temperatura condicionada.

Após cerca de 16 a 18 horas em sala condicionada a uma temperatura de 18°C procedeu-se ao rasamento dos provetes (Figura 3.4) com uma espátula quente seguida da sua desmoldagem. De modo a evitar a deformação dos provetes, estes foram colocados num banho à temperatura de ensaio.

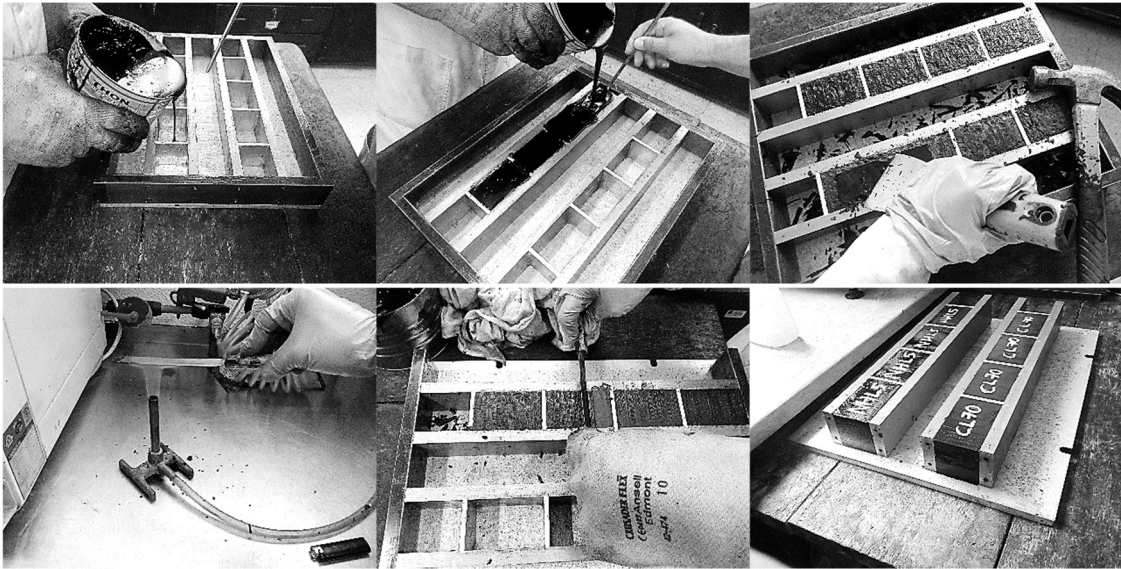


Figura 3.4 - Procedimento de fabrico dos diversos provetes de mastique betuminoso para realização dos ensaios de compressão uniaxial monotónica

3.3.3.2. Procedimento de ensaio

Os provetes foram colocados entre os pratos da máquina, na posição vertical (Figura 3.5). Os pratos e os topos do provete foram sempre limpos para que existisse atrito entre ambos de forma a que o provete não se deslocasse e a carga não começasse a ser aplicada de forma excêntrica.

Procedeu-se à realização do ensaio com a aplicação gradual e linear da força ou deformação ao longo tempo até terminar o ensaio.

O critério de paragem do ensaio consistiu na cessação do ensaio quando fosse atingindo uma deformação igual a um terço da sua altura, não sendo um número inteiro considerou-se uma deformação no valor de 30 mm.

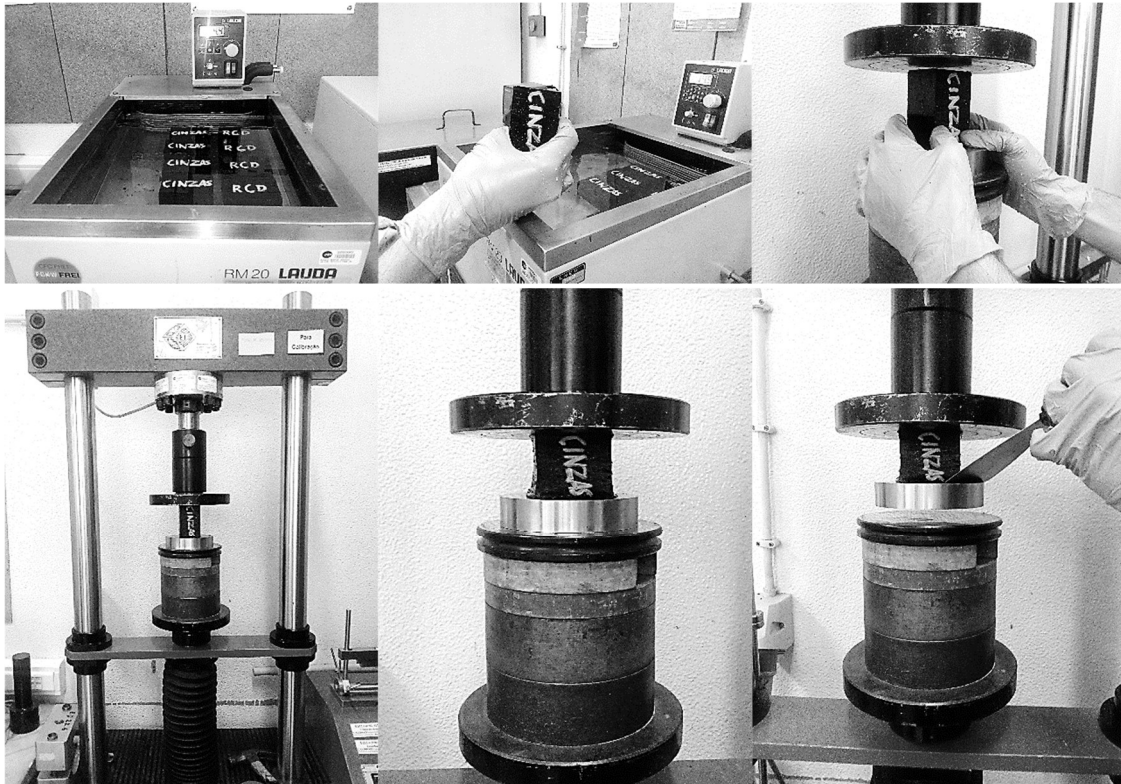


Figura 3.5 - Procedimento do ensaio de compressão uniaxial monotónica

3.3.4. Ensaio de força-ductilidade com aplicação de carga monotónica crescente

O procedimento de ensaio utilizado no estudo das propriedades de tração, dos diferentes mastiques betuminosos e do ligante betuminoso que lhes deu origem, foi realizado conforme preconizado na NP EN 13589 (IPQ, 2013), tendo sido ajustado o valor da temperatura de ensaio tendo em conta o comportamento do mástico. Assim sendo, adotou-se a temperatura de 25°C, uma velocidade constante de 50mm/min e um estiramento até aos 400mm.

Neste ensaio utilizaram-se duas formulações no fabrico do mástico betuminoso, com o objetivo de aferir o impacto do acréscimo/decrécimo do teor em betume no tipo de comportamento à rotura e na resistência à tração dos mastiques.

3.3.4.1. *Preparação dos provetes de ensaio*

Primeiramente os moldes (Figura 3.6) foram revestidos com uma camada fina de desmoldante, composto por glicerina e por pó talco mineral (dextrina). De seguida, foi vertida, através de movimentos para a frente e para trás na direção longitudinal, a quantidade necessária da amostra de mástico, de modo a preencher os moldes obtendo-se um menisco convexo.

Posto isto, os provetes foram deixados, durante uma hora à temperatura ambiente, sendo posteriormente rasados através de uma faca aquecida. Por fim, foram colocados num banho de água à temperatura de ensaio durante 90min garantindo a homogeneização da temperatura.

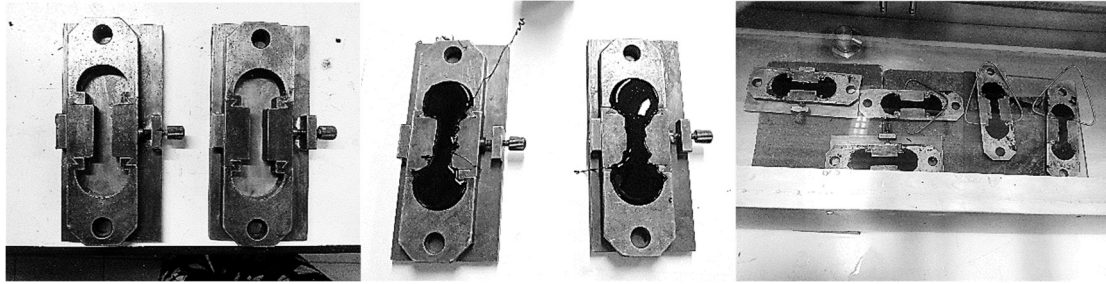


Figura 3.6 - Preparação dos provetes para realização dos ensaios de ductilidade

3.3.4.2. Procedimento de ensaio

Antes de se dar início ao ensaio foram retiradas as bases dos moldes, colocando-se de seguida os provetes nas placas de tração onde foram retiradas as laterais dos moldes. Finalizando estes passos, foi dado início ao ensaio.

Nas Figura 3.7 e 3.8 podem observar-se as várias fases do ensaio até à rotura do provete.

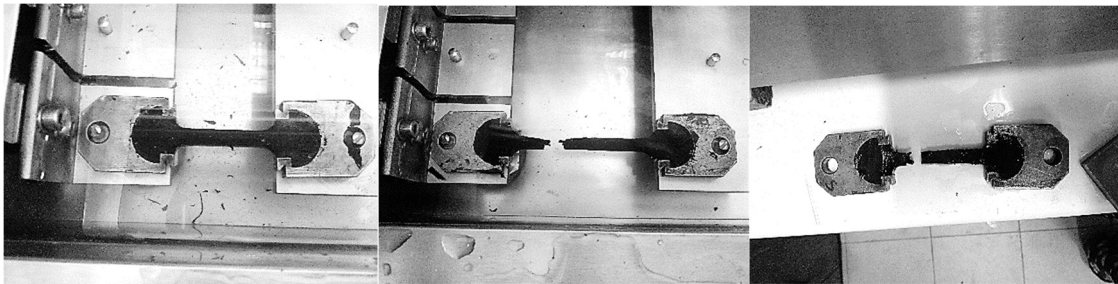


Figura 3.7 - Várias fases do ensaio de ductilidade – exemplo de rotura frágil



Figura 3.8 - Várias fases do ensaio de ductilidade – exemplo de rotura dúctil

O mastique presente na Figura 3.7 é um exemplo de uma rotura frágil, apresentando rotura antes dos 400mm de alongamento, em oposição, o mastique da Figura 3.8 é um exemplo de um material com rotura dúctil.

3.3.5. Ensaio de flexão com aplicação de cargas cíclicas

Os procedimentos de ensaio utilizados nos ensaios de vigas em flexão repetida em quatro pontos (4PB-PR) foram realizados conforme preconizado na EN 12697-26 (CEN, 2004), com as devidas adaptações, para determinação do módulo de rigidez do mastique betuminoso.

O módulo de deformabilidade e o ângulo de fase das misturas dependem da temperatura de serviço. Por isso, os valores escolhidos para a temperatura de ensaio devem abranger as temperaturas de serviço observadas em Portugal continental em pavimentos rodoviários flexíveis. Dada a impossibilidade de realizar os ensaios a 25°C, temperatura de referência prevista no Manual de Concepção de Pavimentos (JAE, 1995), devido à falta de consistência exibida pelo mastiche a essa temperatura, optou-se por uma que fosse representativa da banda de temperaturas de serviço mais baixas, de 15°C.

Assim, os ensaios foram realizados em controlo de extensão, para uma extensão de 50×10^{-6} , à temperatura de 15 °C, tendo sido aplicado um carregamento cíclico, 200 ciclos, sinusoidal, com as frequências de 1, 2, 4, 8, 10 e 30 Hz.

O equipamento utilizado, Figura 3.9, para a realização deste ensaio foi a máquina de ensaios com aplicação de cargas repetidas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil que se encontra inserida numa camara climatizada, permitindo desse modo a realização de ensaios a temperaturas controladas. Este equipamento para além dos quatro pontos, é composto por dois transdutores de deslocamentos, uma célula de carga, pelo sistema de cargas cíclicas, instalado nos apoios internos. Todos esses componentes estão conectados a uma unidade de processamento, que por sua vez está ligada a um computador, onde está instalado o software que controla o ensaio de flexão.

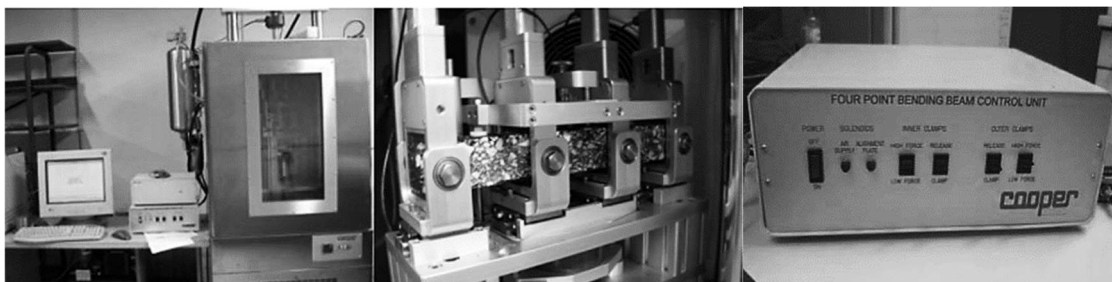


Figura 3.9 - Equipamento utilizado no ensaio de flexão

3.3.5.1. Preparação dos provetes de ensaio

Salienta-se, primeiramente, que o fabrico do mastiche betuminoso é feito de modo análogo ao mastiche produzido para o ensaio de compressão, demorando sensivelmente o mesmo tempo.

Posto isto, a mistura do mastiche foi colocada num molde com $40 \times 30 \times 5 \text{ cm}^3$ que foi adaptado e subdividido de modo a permitir a obtenção de 2 vigas com $5 \times 5 \times 40 \text{ cm}^3$ (Figura 3.10). Para uma fácil desmoldagem, o molde metálico foi previamente lubrificado com glicerina, funcionando esta como descofrante.

Após cerca de 16 a 18 horas na sala condicionada a uma temperatura de 18°C procedeu-se ao rasamento dos provetes com uma espátula quente seguida da sua desmoldagem. De modo a evitar a deformação das vigas, estas foram colocadas num banho à temperatura de ensaio.

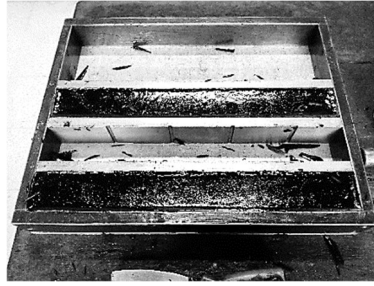


Figura 3.10 – Vigas de mastique betuminoso

3.3.5.2. Procedimento de ensaio

O ensaio realizado consiste em colocar um provete prismático, num equipamento composto por quatro pontos de apoio, em que os apoios internos e externos estão localizados simetricamente em relação ao centro da viga. Como ilustrado na Figura 3.11, a amostra deve ser sujeita em quatro pontos a flexão cíclica (periódica), com livre rotação e translação, tanto nos apoios onde as cargas são aplicadas, como nos apoios de reação. Os apoios internos e externos, devem ser concebidos de modo a permitirem a rotação e translação horizontal, sendo que os apoios internos também possibilitam o deslocamento vertical.

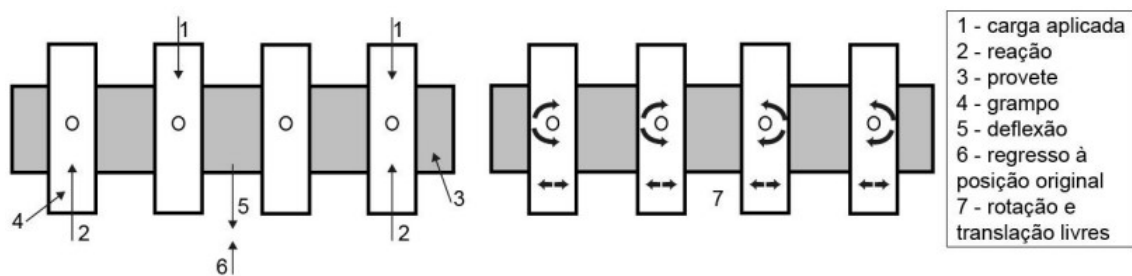


Figura 3.11 – Princípios básicos da flexão em quatro pontos (adaptado de (Costa, 2013))

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica, e comparados com os resultados dos ensaios de caracterização física e interação físico-química dos fileres obtidos por Antunes (Antunes 2013), que se apresentam na Tabela 4.1, de modo a avaliar o efeito das propriedades do filer no comportamento mecânico do mastique.

Propriedade	Método de Ensaio	Unid.	CEM	CL90	CL70	NHL 5	Areia do rio	Pó de Tijolo	Calcário	Recuperado	Cinzas	RCD
Vazios de Rigden	NP EN 1097-4 (IPQ, 2012)	%	45%	71%	61%	52%	36%	45%	36%	38%	36%	40%
Superfície específica	NP EN 196-6 (IPQ, 2010)	m ² /Kg	4,34	21,22	-	6,71	3,80	6,50	5,63	3,47	3,46	5,25
Nº de betume	NP EN 13179-2 (IPQ, 2010)	-	40	120	90	48	26	36	28	30	23	36
Massa Volúmica	NP EN 1097-7 (IPQ, 2012)	Mg/m ³	3,29	2,32	2,33	2,72	2,64	2,71	2,72	2,76	2,51	2,63
Poder absorvente	NF P 98-256-1 (AFNOR, 1991)	g	35	21	20	29	60	35	55	44	59	44
$[(f/b)_v]/[(f/b)_{max}]$	-	-	0,66	0,55	0,58	0,80	0,39	0,66	0,42	0,53	0,39	0,53
ΔTab	NP EN 13179-1 (IPQ, 2010)	°C	20	12	12	18	10	14	11	10	7	12

Tabela 4.1 – Propriedades físicas e interação físico-química dos diferentes fileres em estudo.

Os resultados da cal hidratada cálcica “CL70 H200” foram efetuados no decorrer deste estudo, uma vez que, o mesmo não foi estudado na tese de mestrado de Antunes (Antunes, 2013).

Na Figura 4.1 estão representados alguns dos ensaios de caracterização física e de interação físico-química realizados neste estudo.



Figura 4.1 – Ensaio de caracterização física e de interação físico-química: (a) Vazios de Rigden; (b) Massa Volúmica; (c) Poder absorvente; (d) Temperatura de amolecimento

É de salientar que, os valores relativos à propriedade superfície específica foram obtidos pelo método de Blaine. Esta propriedade, quando avaliada através de outro tipo de ensaio, por exemplo por adsorção gasosa, conduz a valores significativamente diferentes.

4.1. Ensaio de penetração a 25°C

De uma forma sucinta, este ensaio permite determinar a consistência do betume e dos mastiques betuminosos por meio de uma agulha de referência que penetra verticalmente numa amostra, segundo as condições apresentadas na Tabela 4.2.

O resultado da medição é a média de três penetrações sucessivas na mesma amostra de ensaio, distadas no mínimo de 10mm. As três determinações são consideradas válidas se o desvio entre as mesmas não exceder um valor limite expresso na norma de ensaio EN 1426. O valor da penetração é expresso em décimas de milímetro e arredondado ao número inteiro mais próximo.

Na Tabela 4.2, são referidas as condições de ensaio necessários para a execução do ensaio e os principais resultados obtidos.

Parâmetros do ensaio	Principais resultados do ensaio
(f/b) _v = 0,6 (exceto nas CL's)	pen25 (valor de penetração a 25°C do B35/50 e dos diferentes mastiques)
T = 25°C	
t = 5s (tempo de carregamento)	Δpen25 (variação da penetração a 25°C)
m = 100g (massa da agulha)	

Tabela 4.2 – Principais parâmetros e resultados do ensaio de penetração a 25°C

Posteriormente calculou-se a variação de penetração entre a penetração a 25°C do mástico e a penetração a 25°C do betume que lhe deu origem. Assim, foi possível verificar o efeito do fíler na consistência do betume à temperatura de serviço.

Quanto maior for a variação, mais duro é o mástico e conseqüentemente mais rígido e mais frágil.

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados obtidos para a variação de penetrações dos mastiques em relação ao betume virgem utilizado na sua produção.

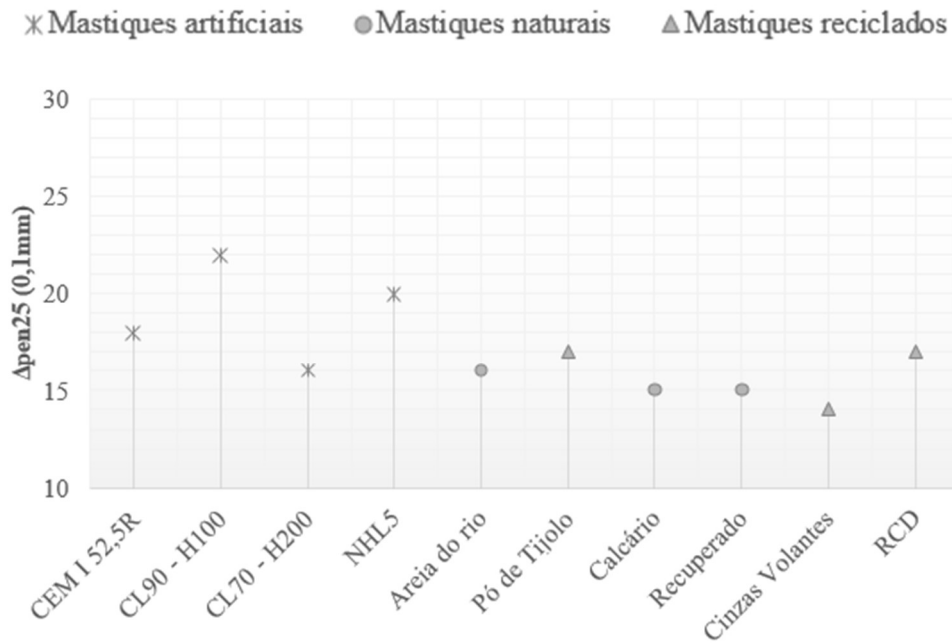


Figura 4.2 - Avaliação das variações de penetração obtidas para os diferentes mastiques produzidos com o betume de penetração “35/50”

Da análise da Figura 4.2 é possível observar que o mastique que apresentou uma maior variação da penetração, ou seja, uma consistência mais dura, foi o realizado com a “CL90 – H100”, com a relação volumétrica f/b de 0,3. É também possível apurar que, apesar de se utilizar metade da concentração volumétrica para a “cal hidratada cálcica”, esta possui um valor de penetração semelhante a outros materiais, como é o caso dos mastiques com “CEM I 52,5R” e com “cal hidráulica natural”.

Por outro lado, o mastique com “CL70 – H200”, com a relação volumétrica f/b de 0,3, exhibe um comportamento semelhante aos restantes mastiques, apresentando deste modo uma consistência mais mole. Sendo que, os mastiques produzidos com “Calcário” e com “Cinzas Volantes” são os que apresentam uma menor variação de penetração.

Relativamente aos mastiques consoante a sua natureza, os que apresentam um comportamento mais semelhante são os mastiques naturais.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, são apresentadas as curvas de correlação entre a variação da penetração a 25°C e as propriedades referidas na Tabela 4.1 que apresentam uma melhor correlação. É possível constatar que as cais hidratadas cálcicas apresentam propriedades muito distintas relativamente aos restantes fileres ensaiados, facto esse que advém da diferença existente entre as relações volumétricas filer/betume adotadas. Como tal, optou-se por fazer uma análise de regressão com exclusão das cais hidratadas cálcicas.

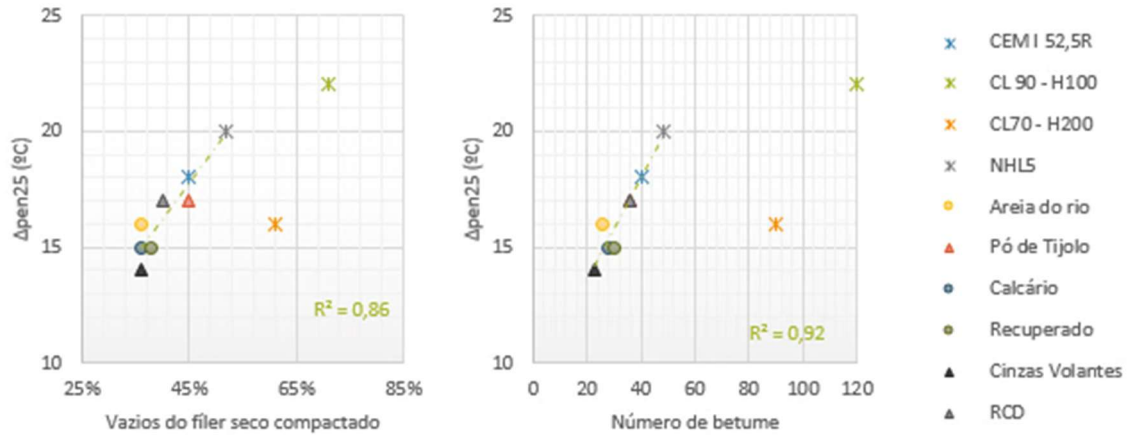


Figura 4.3 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a variação da penetração a 25°C e (a) os vazios de Rigden; (b) o número de betume

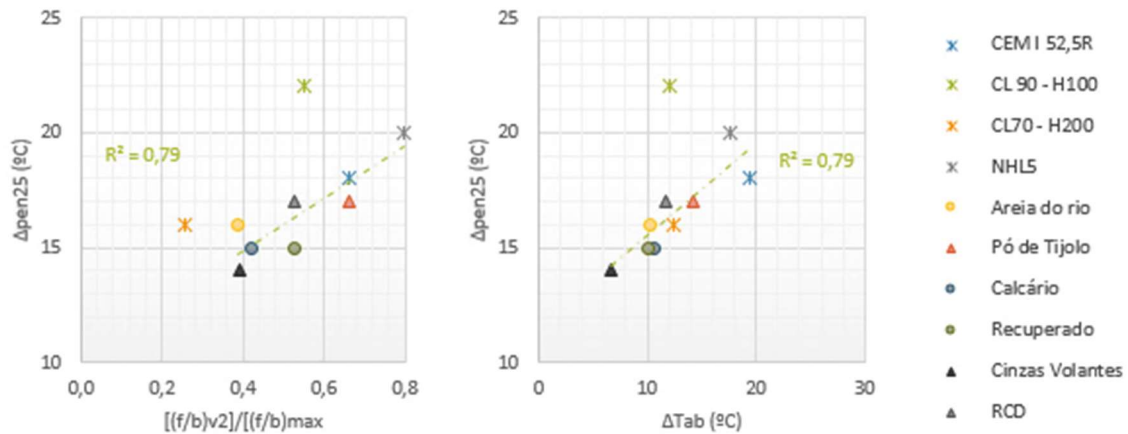


Figura 4.4 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a variação da penetração a 25°C e (a) a relação $(f/b)v$ utilizada sobre a relação $(f/b)v$ máxima; (b) a variação da temperatura anel e bola

Das propriedades apresentadas anteriormente a que apresenta uma melhor correlação com o ensaio de penetração é a viscosidade aparente ou número de betume. Estes dois ensaios recorrem ao mesmo equipamento, o penetrómetro. Contudo, os materiais ensaiados não são os mesmos, uma vez que, no ensaio de penetração foi ensaiado uma mistura composta por filer e betume e no ensaio da viscosidade aparente (número de betume) foi ensaiado uma mistura de filer e água.

No primeiro avalia-se a consistência através do valor de penetração da amostra, no segundo avalia-se a quantidade, de uma forma indireta, do betume necessário para que o mastique tenha uma certa consistência. Posto isto, a correlação obtida traduz que a formulação utilizada no fabrico do mastique apresenta uma consistência próxima da desejada aquando da realização do ensaio de viscosidade aparente.

Como expectável, a segunda melhor correlação trata-se da regressão com a propriedade vazios de Rigden. Sendo que, o princípio do ensaio desta propriedade é idêntico ao associado ao numero de betume.

Contudo também se verifica uma boa correlação dos resultados do ensaio de penetração com as outras propriedades apresentadas na Figura 4.4.

Pressupõe-se que quanto mais duro for o mástico, menor será o valor da penetração a uma dada temperatura, ou seja, possuirá uma maior variação de penetração relativamente ao betume que lhe deu origem; e quanto mais duro for o mástico maior será a temperatura de amolecimento obtida, logo maior será a variação das temperaturas anel e bola.

4.2. Ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente

As temperaturas de ensaio adotadas para realização dos ensaios de compressão uniaxial monotónica foram 5°C e 15 °C, dado que, para temperaturas superiores a 20 °C os provetes de mástico têm uma tendência para se deformarem excessivamente, dificultando a determinação do comportamento do mástico e influenciando a resposta obtida. Por outro lado, optou-se por realizar o ensaio a duas temperaturas, uma vez que, este material é bastante influenciado pela temperatura, exibindo variações de comportamento acentuadas para pequenas variações de temperatura.

Apesar de ser um ensaio acessível, no que concerne, ao equipamento e compreensão do ensaio, este apresenta como principal limitação a não simulação da ação dinâmica do tráfego, uma vez que, é aplicada uma carga monotónica crescente. (Gardete 2006).

Na Tabela 4.3, são referidas as condições de ensaio necessárias para a execução do ensaio e os principais resultados obtidos.

Parâmetros do ensaio	Principais resultados do ensaio
$(f/b)_v = 0,6$ (exceto nas CL's)	σ_t ; ϵ_t (tensão e extensão de transição)
$V = 0,8\text{mm/s}$	σ_f (tensão final)
$T = 5$ e 15°C	E_1 ; E_2 (módulo secante no ramo elástico e módulo secante no ramo viscoelástico)
critério de paragem: $\Delta L = -30\text{mm}$	

Tabela 4.3 – Principais parâmetros e resultados do ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente

4.2.1. Resultados por fíler

Na análise individual de cada mástico, no que concerne ao ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente, deu-se maior enfoque à influência da temperatura nas diferentes grandezas obtidas. Uma vez que, os pavimentos estão sujeitos a variações de temperatura e esta variável tem um grande impacto no comportamento de materiais betuminosos.

Como tal, representou-se em gráficos tensão-deformação os resultados dos provetes de “mástico betuminoso” a cada temperatura. Sendo de seguida, apresentada uma tabela onde figuram as diferentes grandezas obtidas através deste ensaio em função da temperatura de ensaio.

Na Figura 4.5 é apresentada, para as duas temperaturas ensaiadas, as curvas tensão/extensão de oito provetes de mastique de cimento de Portland, quatro provetes para cada temperatura. Dada a semelhança existente no andamento das curvas tensão/extensão dos diferentes mastiques optou-se por apresentar os restantes gráficos em apêndice.

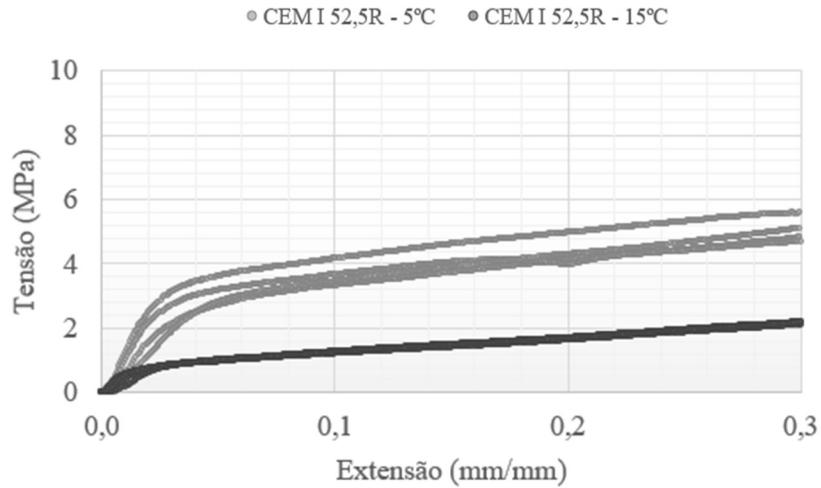


Figura 4.5 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de CEM I 52,5R

Na Tabela 4.4 resumem-se os valores obtidos da interpretação dos resultados inerentes aos ensaios de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente.

Fíleres	f/b (relação volumétrica)	Temperatura (°C)	$\sigma_t = F/A$ (MPa)	$\epsilon_t = \Delta L/L$ (mm)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
CEM I 52,5R	0,6	5°C	2,67	0,03	106,80	7,24
		15°C	0,66	0,02	62,78	4,88
CL 90 - H100	0,3	5°C	3,19	0,04	130,68	6,50
		15°C	0,44	0,02	38,58	3,54
CL 70 - H200	0,3	5°C	3,06	0,03	145,95	5,75
		15°C	0,38	0,02	38,44	2,59
NHL 5	0,6	5°C	4,52	0,03	235,78	7,94
		15°C	0,78	0,02	88,75	5,91
Areia do Rio	0,6	5°C	2,88	0,02	165,42	7,22
		15°C	0,45	0,02	51,35	3,15
Pó de Tijolo	0,6	5°C	3,89	0,02	274,67	9,04
		15°C	0,52	0,01	73,43	4,72
Calcário	0,6	5°C	3,47	0,02	207,59	7,36
		15°C	0,48	0,01	54,41	3,09
Recuperado	0,6	5°C	4,20	0,02	249,53	7,89
		15°C	0,51	0,01	59,41	3,77
Cinzas Volantes	0,6	5°C	2,90	0,03	171,46	5,87
		15°C	0,50	0,02	46,75	2,65
RCD	0,6	5°C	3,50	0,02	205,24	7,99
		15°C	0,51	0,01	60,36	3,75

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente para os diferentes mastiques

Face aos resultados obtidos nos ensaios é possível estabelecer as seguintes observações:

- O andamento das curvas representadas na Figura 4.5 e nas Figuras a.1 a a.9 (apresentadas no apêndice), permitem confirmar o comportamento viscoelástico deste tipo de materiais;
- Todas as grandezas avaliadas apresentam um decréscimo com o aumento da temperatura;
- Os mastiques, tanto a 5°C como a 15°C, sujeitos a uma carga uniaxial monotónica crescente, possuem um comportamento predominantemente plástico, pois apesar do valor de E1 ser bastante superior ao de E2, a variação de comportamentos verifica-se no início do carregamento;
- De um modo geral, é possível observar que para temperaturas superiores a variabilidade do módulo inicia-se mais cedo, ou seja, os mastiques apresentam um comportamento elástico não linear durante um período de tempo mais curto (na medida que, este ensaio é realizado a uma velocidade constante);

- Em alguns mastiques é visível alguma variabilidade de resultados a 5°C podendo estar associado à dificuldade de preservar a temperatura de ensaio;
- O mastique composto por cimento de Portland (Figura 4.5) apresenta, para todas as grandezas avaliadas, um decréscimo com o aumento da temperatura. Sendo que, com o aumento da temperatura o mastique apresenta uma menor resistência à compressão, suportando tensões de compressão menores a 15°C e um menor módulo de deformabilidade;
- Como no mastique anterior, o mastique composto por CL90-H100 (Figura a.1) verifica uma diminuição de todas as grandezas com o aumento da temperatura, contudo, neste mastique a influência da temperatura é mais notória, podendo-se concluir que é mais suscetível a variações de temperatura;
- O mastique CL 70 – H 200 (Figura a.2) apresenta, como espectável, um comportamento bastante similar à do mastique composto pela CL90-H100;
- O mastique composto por NHL5 (Figura a.3) apresenta valores superiores de tensões e módulos de deformabilidade, comparativamente com os mastiques referidos anteriormente. Ressalta-se, por outro lado, a variabilidade de resultados denotados a 5°C;
- No mastique de areia do rio (Figura a.4), um dos provetes ensaiados a 5°C apresenta diferenças, essencialmente, ao nível da resistência à compressão. E uma vez que todos os provetes provem da mesma mistura de mastique betuminoso, deduz-se que esta diferença de comportamento esteja associada a alguma falha no decorrer do ensaio;
- O mastique composto por pó de tijolo (Figura a.5) apesar de exibir valores de tensões inferiores comparativamente ao mastique composto por NHL5, este possui valores de módulos de deformabilidade superiores, isto deve-se ao facto do mastique composto por pó de tijolo apresentar um comportamento elástico durante uma extensão menor, ou seja, este mastique exibe uma variação de comportamento mais rápida, induzindo, deste modo, a um surgimento mais rápido de deformações permanentes;
- O mastique de calcário (Figura a.6) é o que apresenta uma melhor repetibilidade de resultados quando comparado com os estudados anteriormente. Apresentando, de um modo geral, um comportamento similar aos demais;
- O mastique de filer recuperado (Figura a.7) apresenta um desfasamento no que diz respeito ao início do seu comportamento elástico não linear, resultando num desfasamento dos valores das grandezas avaliadas, relativamente aos resultados a 5°C.
- O mastique composto por cinzas volantes (Figura a.8) tem um comportamento semelhante ao mastique composto por calcário, porém apresenta valores inferiores de resistência à compressão e módulos secantes;
- Por fim, o mastique de RCD (Figura a.9), possui também ele um comportamento viscoelástico, exibindo numa primeira fase um comportamento elástico, seguido de um comportamento viscoso, o que leva à existência de deformações permanentes.

4.2.2. Análise comparativa dos resultados obtidos

Para concluir esta análise, fez-se um apanhado dos valores médios do módulo secante no ramo elástico e no ramo viscoelástico, para ambas as temperaturas, Figura 4.6 e Figura 4.7, respetivamente.

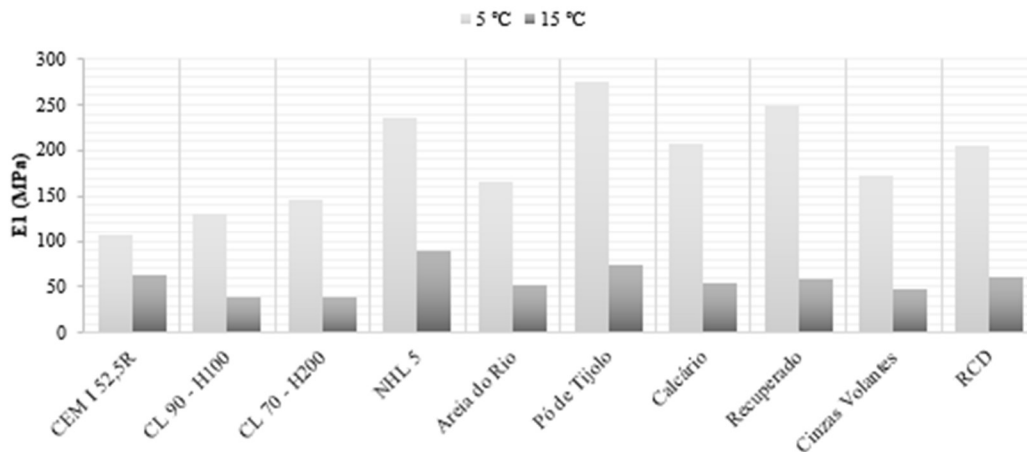


Figura 4.6 – Módulo secante no ramo elástico em função do tipo de filer

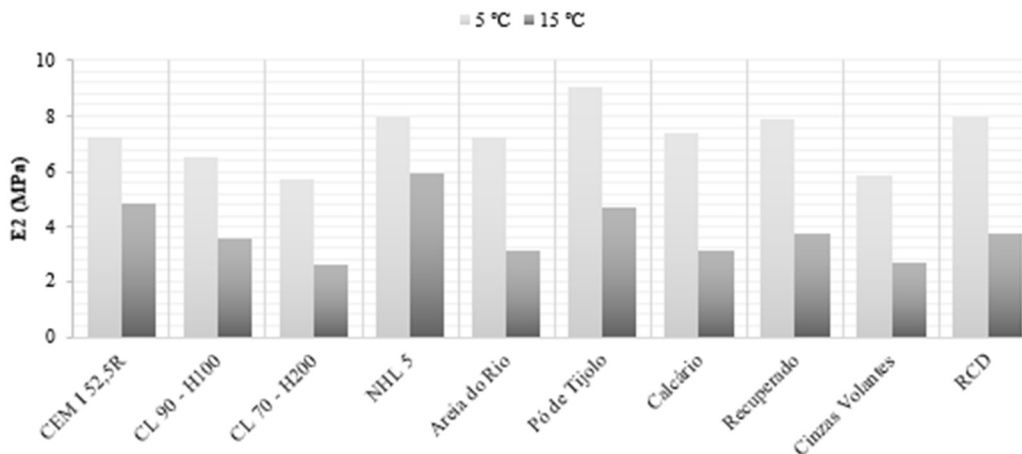


Figura 4.7 - Módulo secante no ramo viscoelástico em função do tipo de filer

Os resultados obtidos permitem estabelecer alguns comentários:

- Os mastiques que apresentam um melhor comportamento, quando sujeitos a carregamentos monotónicos de compressão, são os compostos por, de um modo geral, fileres reciclados, ou em termos de análise individual, são os mastiques compostos pelos seguintes fileres: cal hidráulica natural (NHL5), pó de tijolo, recuperado e resíduos de demolição e construção (RCD).

- Os mastiques compostos por fileres reciclados apresentam características bastante similares. Não obstante, o mástico de pó de tijolo apresenta valores superiores para ambas as temperaturas;
- Salienta-se que, relativamente aos mastiques compostos por fileres artificiais, destacam-se dois mastiques, o mástico de cimento de Portland (CEM I 52,5R) e o mástico de cal hidráulica natural (NHL5), o primeiro pelo seu poder rigidificante com o aumento da temperatura, o segundo também pelo seu poder rigidificante, mas neste caso independentemente da temperatura.

Tanto a cal hidráulica como o cimento de Portland são fileres artificiais quimicamente ativos, e quando misturados com água ganham presa e endurecem por reações e processos de hidratação. Contudo, a cal hidráulica natural apresenta um poder rigidificante independentemente da temperatura a que esteja sujeita, eventualmente devido às altas temperaturas a que esteve sujeita aquando do seu processo de fabrico.

- Por último, os valores referentes ao módulo secante no ramo elástico são bastante superiores aos valores inerentes ao ramo viscoelástico, o que significa que os mastiques, quando sujeitos a esforços de compressão uniaxial monotónica, não suportam grandes aumentos de tensão aquando do seu comportamento viscoelástico.

Na Figura 4.8 é apresentada a correlação entre as duas grandezas referidas anteriormente, em função da temperatura de ensaio, onde é possível verificar que existe uma relação entre o módulo secante no ramo elástico e o módulo secante no ramo viscoelástico para a temperatura de 15°C.

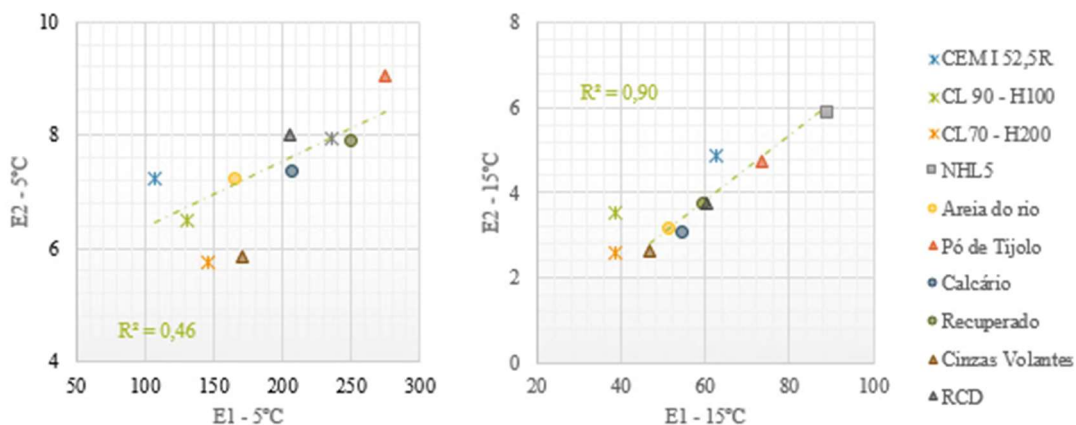


Figura 4.8 - Coeficiente de correlação (R^2) entre (a) os módulos secantes a 5°C (b) os módulos secantes a 15°C

Por conseguinte, nas Figuras 4.9 a 4.11 são apresentadas as curvas de correlação entre os módulos secantes 15°C e as propriedades referidas na Tabela 4.1 que apresentam uma melhor correlação.

Contudo, dada a boa correlação entre os módulos secantes a 15°C subentende-se que, tanto o módulo secante no ramo elástico como o módulo secante no ramo viscoelástico, obtêm o mesmo tipo de relação com as propriedades referidas na Tabela 4.1.

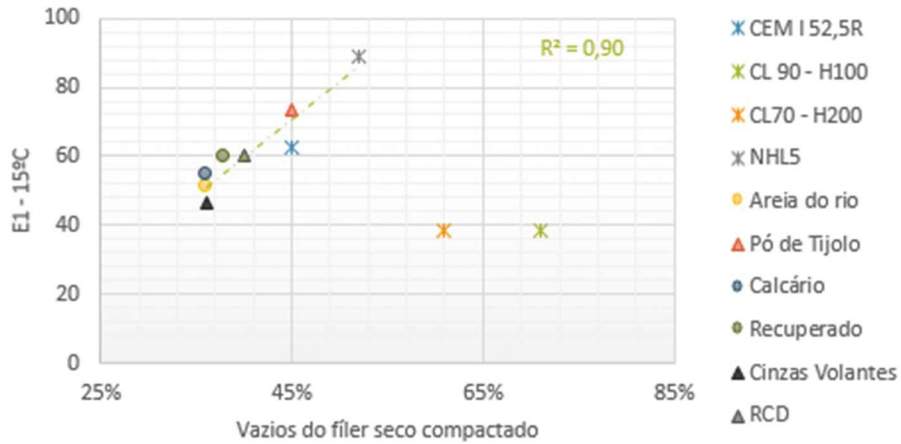


Figura 4.9 - Coeficiente de correlação (R^2) entre os vazios de Rigden e o módulo secante elástico a 15°C

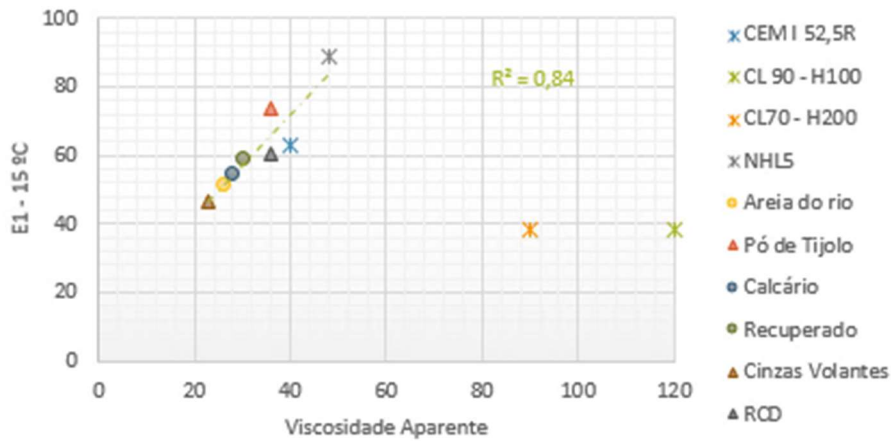


Figura 4.10 - Coeficiente de correlação (R^2) entre o número de betume e o módulo secante elástico a 15°C

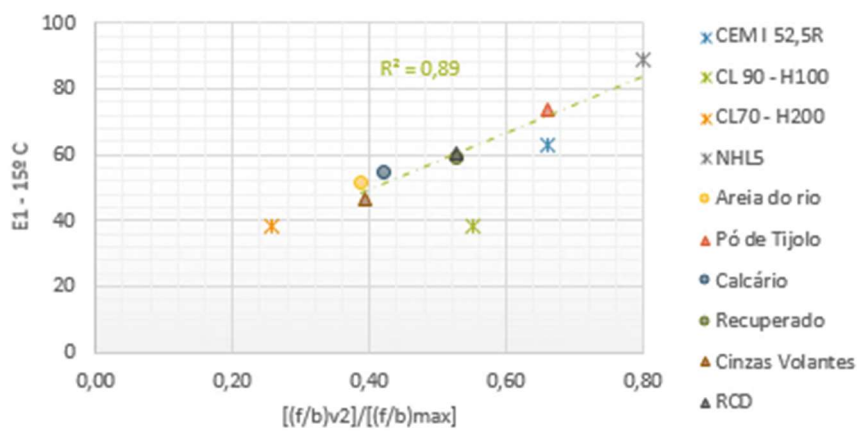


Figura 4.11 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a relação volumetrica utilizada em função da máxima e o módulo secante elástico a 15°C

Das grandezas anteriormente apresentadas as que apresentam uma melhor correlação com o ensaio de compressão são os vazios de Rigden (vazios do fíler seco compactado) e a relação $(f/b)v_2 / (f/b)v_{max}$.

O índice de vazios do fíler seco compactado é um dos principais fatores que condiciona a razão volumétrica máxima fíler/betume e por esse motivo ambas as propriedades apresentam uma boa correlação com o módulo secante obtido no ensaio de compressão.

Considerando que, quanto maior a percentagem de vazios maior será a quantidade de betume necessária para preencher os vazios e atendendo a que os mastiques foram produzidos com a mesma relação fíler/betume, por conseguinte, os fíleres com uma percentagem de vazios de Rigden superior apresentem uma maior resistência à compressão, uma vez que, possuem um maior esqueleto mineral, ou seja, uma maior rigidez.

4.3. Ensaio de força-ductilidade com aplicação de carga monotónica crescente

Os provetes de mástico, imersos em água, são tracionados à temperatura de 25 °C com velocidade constante 50 mm/min até ser atingida a fratura ou a extensão de 1333%, definida na norma de ensaio NP EN 13589 (IPQ, 2013). Assim como os provetes de betume B35/50 que servem de referência.

Na Figura 4.12, podemos observar o ductilímetro e o dispositivo de tração onde são colocados os provetes.

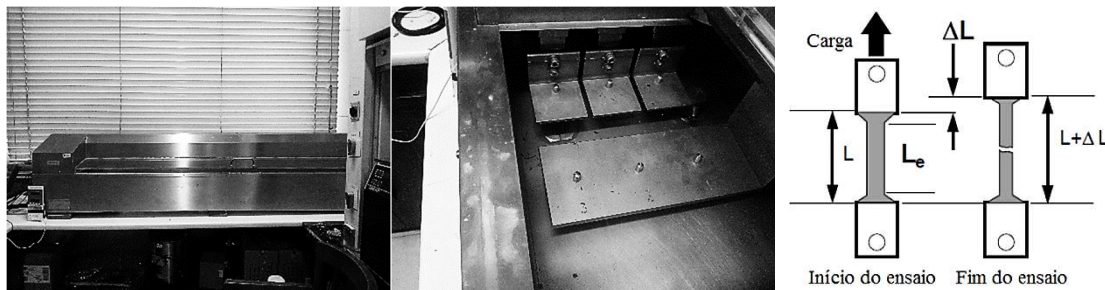


Figura 4.12 - Ductilímetro, fotografia e esquema do dispositivo de tração

É registada a força de tração e a deformação correspondente. Posteriormente, procede-se ao cálculo da energia de deformabilidade (J) (J/cm^2), definida na norma EN 13703.

Tanto os parâmetros de ensaio como os resultados obtidos aparecem sintetizados na Tabela 4.5.

Parâmetros do ensaio	Principais resultados do ensaio
T = 25°C	F _{máx} (força máxima)
V = 50mm/min	L _{máx} (alongamento máximo)
$(f/b)v_{max/2} = 0,3$; $(f/b)_{max} = 0,6$	J (energia de deformabilidade)
critério de paragem: L = 400mm	Tipo de Fratura (frágil ou dúctil)

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente para os diferentes mastiques

4.3.1. Resultados do betume

Como referido anteriormente, foi empregue o método força-ductilidade em provetes de betume de penetração nominal 35/50, para deste modo poder-se avaliar a influência da adição dos fileres em estudo, a este betume.

Na Figura 4.13 e na Tabela 4.6, são apresentados os resultados dos dois provetes de B35/50 ensaiados no ductilímetro.

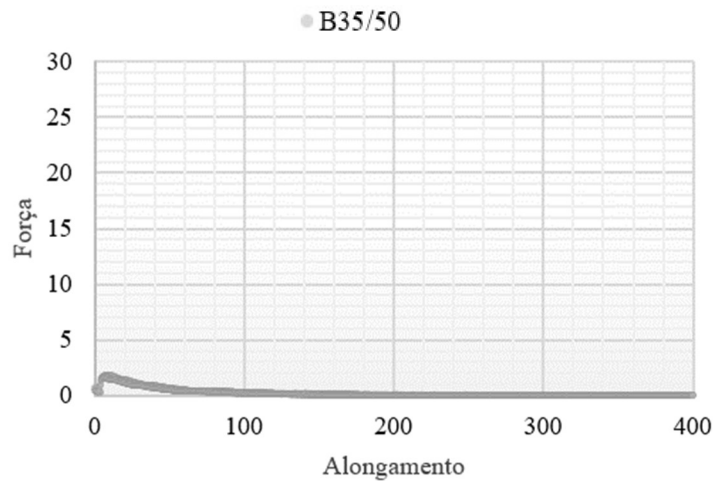


Figura 4.13 - Gráfico Força-Alongamento do betume de pavimentação B35/50

(f/b)v	(f/m)p	Fmáx (N)	Lmáx (mm)	Tipo de fratura	J(J/cm ²)
-	-	1,75	400,00	Dúctil	0,010

Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de ductilidade do betume de pavimentação B35/50

O betume de penetração 35/50, ensaiado à tração a 25°C, possui um comportamento dúctil apresentando, no entanto, uma reduzida resistência à tração.

4.3.2. Resultados por filer

Na análise individual de cada mastique, no que concerne ao ensaio de ductilidade, deu-se maior enfoque à influência da dosagem de filer nas diferentes grandezas obtidas dado que a adição de filer ao betume torna o ligante betuminoso mais “quebradiço”.

Como tal, representou-se em gráficos força-alongamento os resultados dos ensaios de ductilidade de acordo com a relação volumétrica filer/betume utilizada na formulação dos mastiques betuminosos em estudo. Sendo de seguida, apresentada uma tabela (Tabela 4.7) onde figuram as diferentes grandezas obtidas através deste ensaio em função da relação (f/b)v.

É de salientar que para além das grandezas habitualmente resultantes deste ensaio, efetuou-se o estudo da energia de deformabilidade, que consiste na energia necessária para o aparecimento da primeira fenda.

Posto isto, na Figuras 4.14 é apresentada, para as duas relações volumétricas fíler/betume, as curvas tensão/extensão de quatro provetes ensaiados no ensaio de ductilidade, dois por cada relação.

Dada a semelhança existente no andamento das curvas dos diferentes mastiques optou-se por apresentar os restantes gráficos em apêndice.

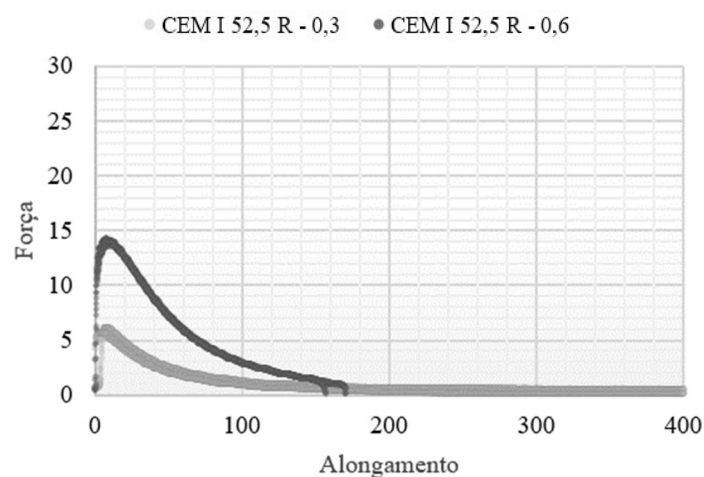


Figura 4.14 - Gráfico Força-Alongamento do mástico de CEM I 52,5R

Na Tabela 4.7, como referido anteriormente, resumem-se os valores obtidos da interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de ductilidade.

Fíleres	(f/b)v	(f/m)p	F _{máx} (N)	L _{máx} (mm)	Tipo de fratura	J(J/cm ²)
CEM I 52,5R	0,30	49%	6,00	400,00	Dúctil	0,023
	0,60	66%	14,15	163,50	Frágil	0,098
CL 90 - H100	0,15	25%	6,30	277,55	Frágil	0,025
	0,30	40%	11,90	324,60	Frágil	0,101
CL 70 - H200	0,15	25%	3,75	400,00	Dúctil	0,019
	0,30	40%	7,90	400,00	Dúctil	0,042
NHL 5	0,30	44%	6,30	400,00	Dúctil	0,031
	0,60	61%	23,20	72,95	Frágil	0,200
Areia do Rio	0,30	43%	5,20	400,00	Dúctil	0,023
	0,60	61%	12,25	400,00	Dúctil	0,076
Pó de Tijolo	0,30	44%	5,45	400,00	Dúctil	0,025
	0,60	61%	14,15	186,30	Frágil	0,100
Calcário	0,30	44%	3,75	400,00	Dúctil	0,023
	0,60	61%	9,25	400,00	Dúctil	0,045
Recuperado	0,30	45%	5,10	400,00	Dúctil	0,029
	0,60	62%	10,40	342,45	Frágil	0,074
Cinzas Volantes	0,30	42%	4,30	400,00	Dúctil	0,014
	0,60	59%	10,50	400,00	Dúctil	0,063
RCD	0,30	43%	4,75	400,00	Dúctil	0,019
	0,60	60%	12,55	374,00	Frágil	0,070

Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de ductilidade

Face aos valores obtidos é possível estabelecer as seguintes observações:

- De um modo geral, é possível observar que para menores taxas de incorporação de filer, os mastiques apresentam um comportamento dúctil, tal como o betume 35/50;
- A resistência à tração e a energia de fratura aumentam para taxas de incorporação de filer superiores;
- As curvas força/alongamento representadas na Figuras 4.14 e nas Figuras b.1 a b.9 (apresentadas no apêndice), para os diferentes mastiques, apresentam a mesma configuração, sendo que o ponto correspondente à força máxima coincide com o aparecimento da primeira fissura no mastic betuminoso;
- Como se pode observar na Figura 4.14 e na Tabela 4.7, o mastic de cimento Portland com uma maior taxa de incorporação de filer apresenta uma rotura frágil, isto é, qualquer rotura que aconteça antes de 1333% do estiramento (antes dos 400mm). De outro modo, ao adicionarmos mais filer ao ligante betuminoso este torna-se mais frágil e, por conseguinte, mais resistente;
- Como se pode observar na Figura b.1 e na Tabela 4.7, o mastic composto pela CL90-H100, para as duas taxas de incorporação de filer, apresenta alteração do tipo de rotura

comparativamente ao B35/50, quer isto dizer, que este filer, mesmo em pequenas quantidades, altera as propriedades de tração do ligante betuminoso;

- A análise aos valores obtidos para o mastique composto por CL70 – H200 (Figura b.2) permite observar que, ao contrário do que se verifica com a outra cal hidratada cálcica, a CL70-H200 não altera as propriedades de tração do ligante betuminoso, no que concerne ao tipo de rotura. No entanto, possui valores de resistência à tração bastante baixos;
- O mastique de cal hidráulica natural (Figura b.3), com uma taxa de incorporação de 61%, apresenta uma elevada resistência à tração, contudo, esta formulação atinge a rotura para um valor de estiramento muito reduzido e apresenta fraca repetibilidade de resultados. É de frisar que, relativamente ao valor de resistência à tração do mastique com uma taxa de incorporação inferior de NHL5, não se verifica um valor superior comparativamente aos mastiques mencionados anteriormente;
- O mastique de areia do rio (Figura b.4), com uma taxa de incorporação de 61%, apresenta uma fraca repetibilidade de resultados após a força de tração máxima. Não obstante, para as duas taxas de incorporação, este mastique apresenta uma rotura da mesma natureza que o B35/50;
- A rotura do mastique de pó de tijolo (Figura b.5), ocorrida para a formulação com mais filer, deu-se em valores de estiramento diferentes, no entanto, ambas as roturas são de natureza frágil, uma vez que, ocorreram antes dos quatrocentos milímetros de alongamento;
- O mastique de calcário (Figura b.6), apresenta uma rotura de natureza dúctil e em contrapartida, uma diminuta resistência à tração;
- No que diz respeito, ao tipo de rotura, o mastique de filer recuperado (Figura b.7), apesar de ser composto por um filer que possui uma natureza semelhante à do filer comercial calcário, exhibe para a taxa de incorporação mais elevada uma rotura de natureza frágil;
- O mastique de cinzas volantes (Figura b.8) exhibe uma rotura de natureza dúctil, ou seja, apresenta uma deformação apreciável antes da rotura;
- Relativamente ao mastique de RCD (Figura b.9) é notório que apesar de ostentar uma rotura frágil, para a taxa de incorporação de 60%, esta ocorre muito próxima dos 1333% de estiramento.

4.3.3. Análise comparativa dos resultados obtidos

Para concluir esta análise, fez-se um apanhado dos valores médios da força máxima e da energia de fratura, para as duas relações volumétricas. (Figura 4.15 e Figura 4.16)

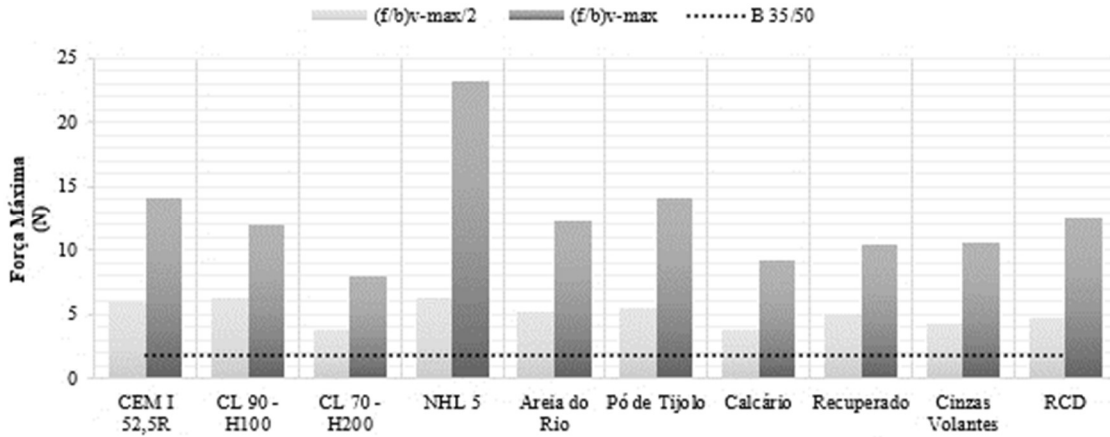


Figura 4.15 - Resistencia à tração para os diferentes mastiques estudados

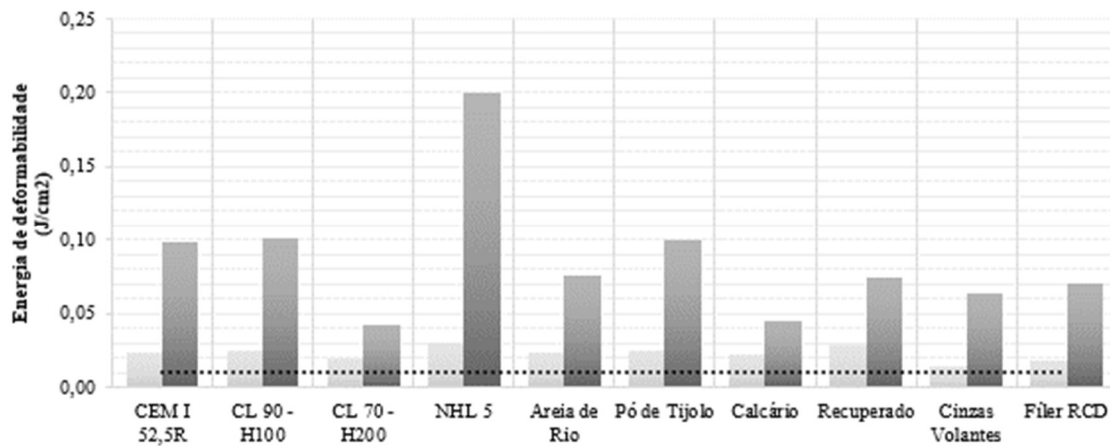


Figura 4.16 - Energia de deformabilidade obtida para os diferentes mastiques estudados

Os gráficos das figuras anteriores permitem evidenciar que:

- Os mastiques fabricados com a menor relação filer/betume possuem uma menor variabilidade de resultados em função do filer, ou seja, o comportamento destes mastiques é predominantemente influenciado pelas propriedades do ligante betuminoso. Apresentando, no geral, um comportamento bastante similar ao do betume 35/50;
- Para a menor taxa de incorporação de filer, é interessante salientar o efeito da adição da CL 90 – H100 ao ligante betuminoso, sendo que com a sua incorporação houve um acréscimo de 4,55 N na resistência à tração do material. Salienta-se que este mastic, ao contrário dos restantes fileres, possui uma relação $(f/b)v$ de 0,15;
- Para a menor taxa de incorporação, os mastiques dispõem-se do seguinte modo, conforme a sua resistência à tração: mastic NHL5, mastic CL90, mastic CEM, mastic pó de tijolo, mastic areia do rio, mastic recuperado, mastic RCD, mastic cinzas volantes, mastic calcário e mastic CL70 (por ordem decrescente);
- Para a maior taxa de incorporação, destaca-se o mastic composto pela cal hidráulica, que apresenta um acréscimo de 21,45 na resistência à tração. Os restantes mastiques

dispõem-se do seguinte modo, conforme a sua resistência à tração: mastique CEM, mastique pó de tijolo, mastique RCD, mastique areia do rio, mastique CL90, mastique cinzas volantes, mastique recuperado, mastique calcário e mastique CL70 (por ordem decrescente);

- Relativamente ao comportamento do mastique antes da rotura, verifica-se que os mastiques CL70, areia do rio, calcário e cinzas volantes, apresentam, para as duas taxas de incorporação estudadas, um comportamento dúctil;
- Para a maior taxa de incorporação de filer, a maioria dos materiais frágeis são mais tenazes que os materiais dúcteis, apresentando desse modo uma capacidade maior de absorver energia até à sua fratura;
- Por último, salienta-se o mastique composto pela cal hidráulica, pois apresenta os valores mais elevados de energia absorvida até ao aparecimento da primeira fenda, para ambas as taxas de incorporação.

Na Figura 4.17 é apresentada a correlação entre as duas grandezas referidas anteriormente, em função da relação volumétrica utilizada no fabrico dos mastiques, onde é possível verificar que existe uma muito boa correlação entre a força máxima que o mastique suporta e a energia de deformabilidade para a relação $(f/b)v_{max}$.

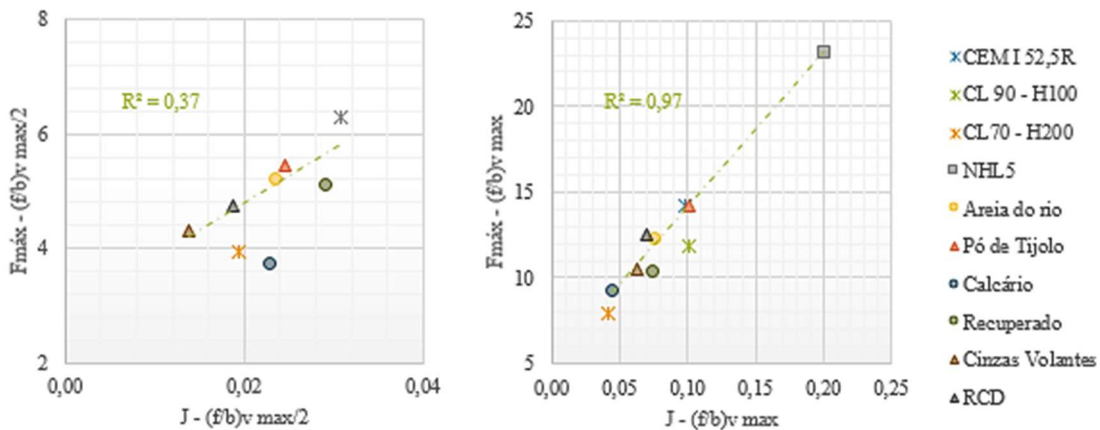


Figura 4.17 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a resistência à tração e a energia de deformabilidade (a) para a relação $(f/b)v_{max}/2$ (b) para a relação $(f/b)v_{max}$

Nas Figuras 4.18 a 4.20 são apresentadas as curvas de correlação entre a energia de deformabilidade para a maior dosagem de filer e as propriedades referidas na Tabela 4.1 que apresentam uma melhor correlação.

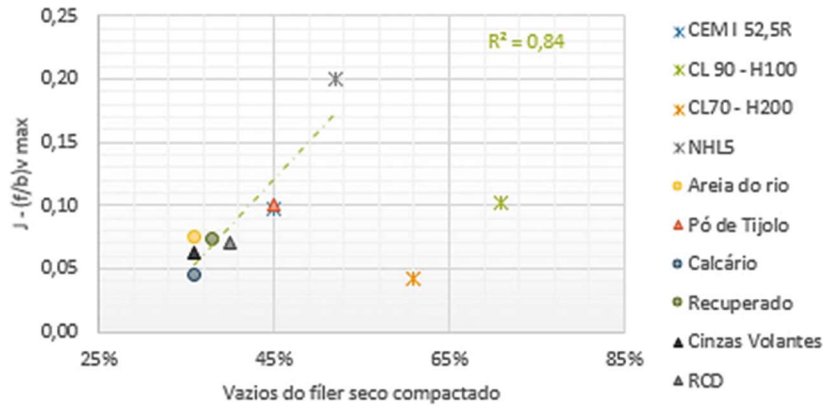


Figura 4.18 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a energia de deformabilidade e os vazios de Rigden

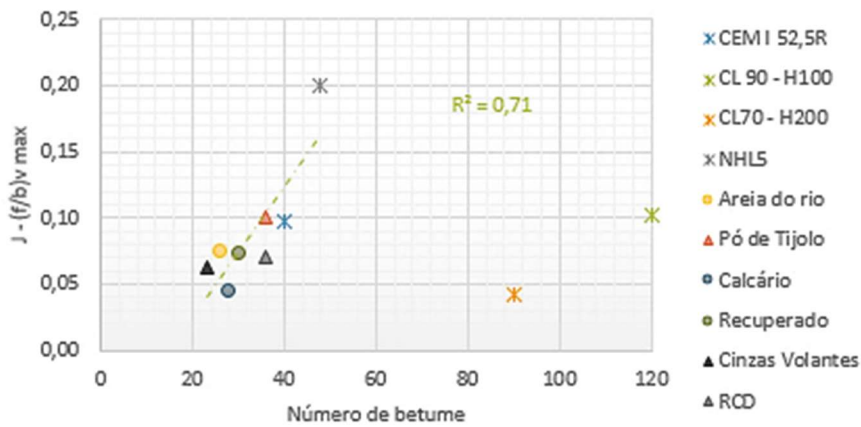


Figura 4.19 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a energia de deformabilidade e a viscosidade aparente

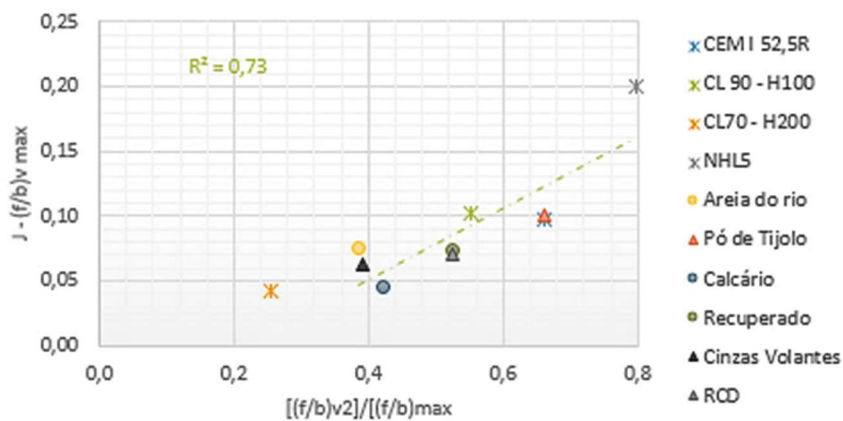


Figura 4.20 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a energia de deformabilidade e a relação entre a $(f/b)v^2 / (f/b)v \text{ max}$

Das propriedades apresentadas anteriormente a que apresenta uma melhor correlação com o ensaio de ductilidade é os vazios de Rigden (vazios do filer seco compactado).

Na Figura 4.17 conclui-se que existe uma relação entre a energia de deformabilidade e resistência à tração, assim sendo, e atendendo a que os mastiques foram produzidos com a mesma relação fíler betume, de modo análogo ao que se verificou no ensaio de compressão, os mastiques com uma maior percentagem de vazios de Rigden apresentam uma maior resistência à tração tal como uma maior energia de deformabilidade, em virtude de possuírem um maior esqueleto mineral.

Contudo também se verifica uma boa correlação dos resultados do ensaio de ductilidade com as propriedades apresentadas nas Figura 4.19 e 4.20.

4.4. Análise comparativa dos diferentes ensaios realizados

Nas Figuras 4.21 a 4.23, são apresentadas as curvas de correlação entre os ensaios de penetração a 25°C, ensaio de compressão e ensaio de ductilidade.

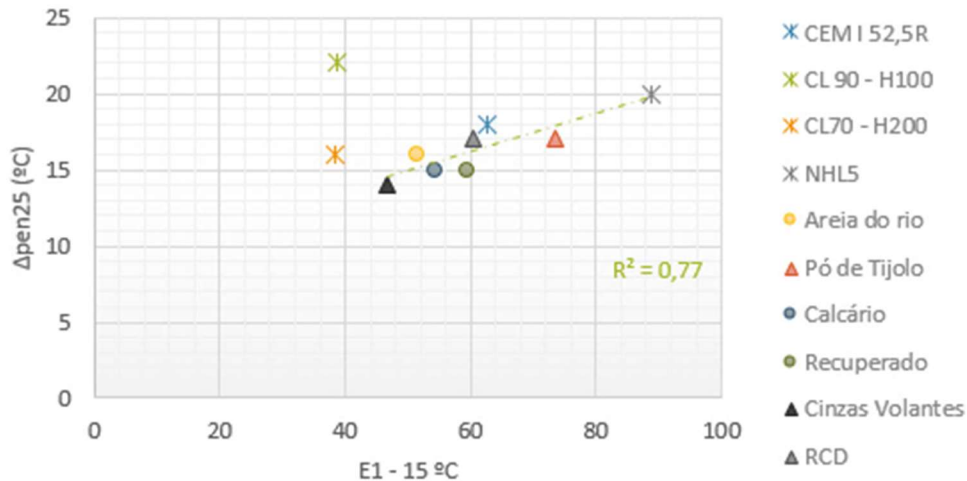


Figura 4.21 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a variação de penetração a 25°C e o módulo secante elástico a 15°C

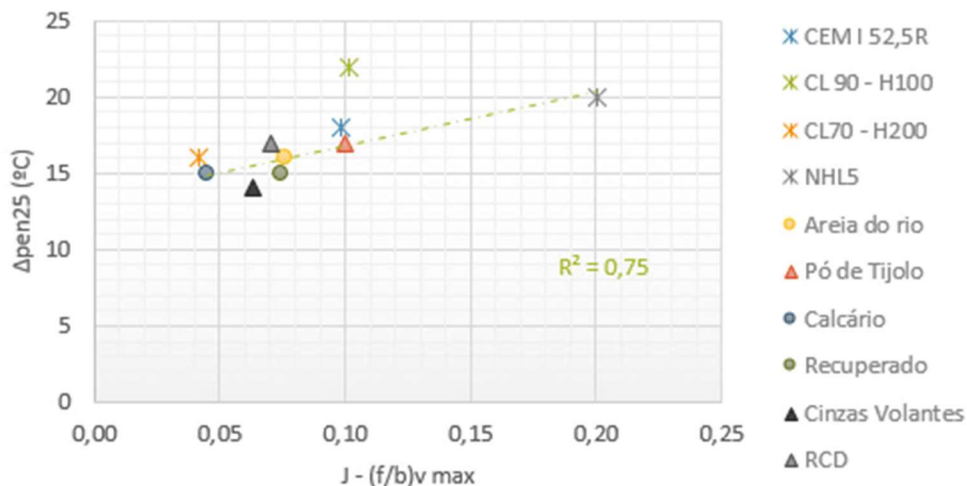


Figura 4.22 - Coeficiente de correlação (R^2) entre a variação de penetração a 25°C e a energia de fratura para a maior taxa de incorporação de fíler

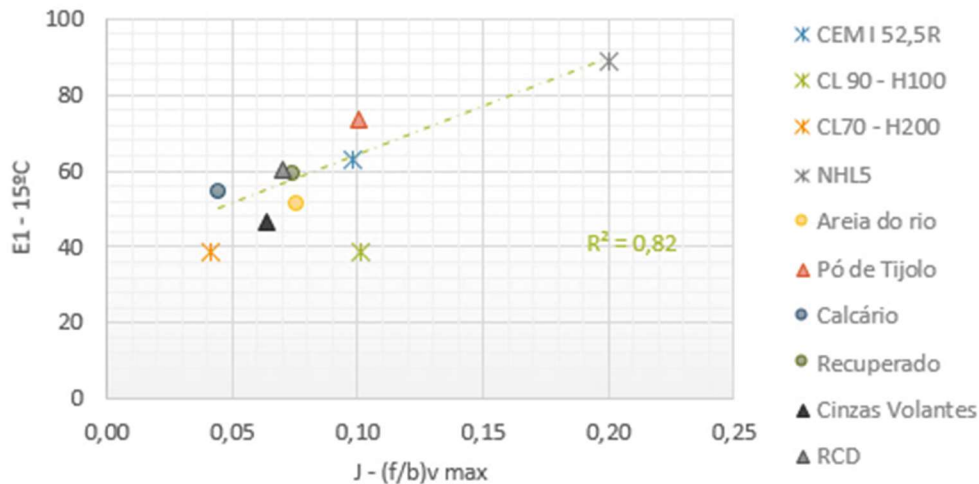


Figura 4.23 - Coeficiente de correlação (R^2) entre o módulo secante elástico a 15°C e a energia de fratura para a maior taxa de incorporação de filer

Das relações apresentadas anteriormente a que apresenta uma melhor correlação é o ensaio de compressão com o ensaio de ductilidade. As semelhanças existentes entre estes dois ensaios são a velocidade de ensaio (50mm/min) e o modo de carregamento (carregamento monotónico), além de que, as grandezas apresentadas na correlação da Figura 4.23 dizem respeito à mesma relação volumétrica filer/betume.

Relativamente às correlações realizadas entre os ensaios, de compressão e de ductilidade, com as propriedades de caracterização física e interação físico-química dos fileres, salienta-se que ambas apresentaram uma melhor correlação com os vazios de Rigden. Verificando, por outro lado, uma boa correlação com as propriedades número de betume e $(f/b)v^2 / (f/b)v \max$.

Contudo também se verifica uma boa correlação dos resultados do ensaio penetração com os ensaios de compressão e de ductilidade, Figuras 4.21 e 4.22.

4.5. Ensaios de flexão com aplicação de cargas cíclicas

No ensaio de flexão em quatro pontos, a parte central da viga, entre os pontos de aplicação da carga, encontra-se sujeita a um momento fletor constante, o que constitui uma vantagem visto o ensaio ser realizado a uma extensão controlada, neste caso, no valor de $50E-6 \mu\text{m/m}$.

No que respeita às restantes condições de ensaio, a avaliação da rigidez foi realizada a uma temperatura de 15°C, com um varrimento de frequências de 1 a 30Hz.

Na Tabela 4.8 apresentam-se as condições de ensaio aplicadas bem como os principais resultados obtidos.

Parâmetros do ensaio	Principais resultados do ensaio
T = 15 °C	E1; E2 (componente elástica e viscosa do E*)
$\epsilon = 50 E-6 \mu\text{m/m}$	E* (módulo complexo)
$(f/b)v = 0,6$ (exceto nas CL's)	ϕ (ângulo de fase)

$f = 1, 2, 4, 8, 10, 30$ Hz
200 ciclos

Tabela 4.8 – Principais parâmetros e resultados do ensaio de flexão

Este ensaio é não destrutivo, pois é realizado no domínio das pequenas deformações, como tal, as extensões aplicadas são em média pequenas e, portanto, pode considerar-se que se está a trabalhar em regime elástico, onde todas as deformações são recuperadas.

4.5.1. Resultados por filer

Na análise individual dos resultados obtidos, por tipo de filer, optou-se por utilizar curvas isotérmicas para representação dos resultados. Estas curvas permitem compreender a influência da frequência de carregamento, tanto no módulo complexo como no ângulo de fase do mastique betuminoso em estudo.

O módulo de rigidez e o ângulo de fase são apresentados em função de frequência de aplicação de carga. Na Figura 4.24 são apresentadas, para as duas propriedades reológicas estudadas, as curvas isotérmicas dos diferentes mastiques e do betume de pavimentação que lhes deu origem (Pereira, 2014), podendo observar-se que as curvas que relacionam o módulo de rigidez e o ângulo de fase com a frequência de aplicação de carga apresentam a relação linear logarítmo-logarítmo habitualmente encontrada nas misturas betuminosas.

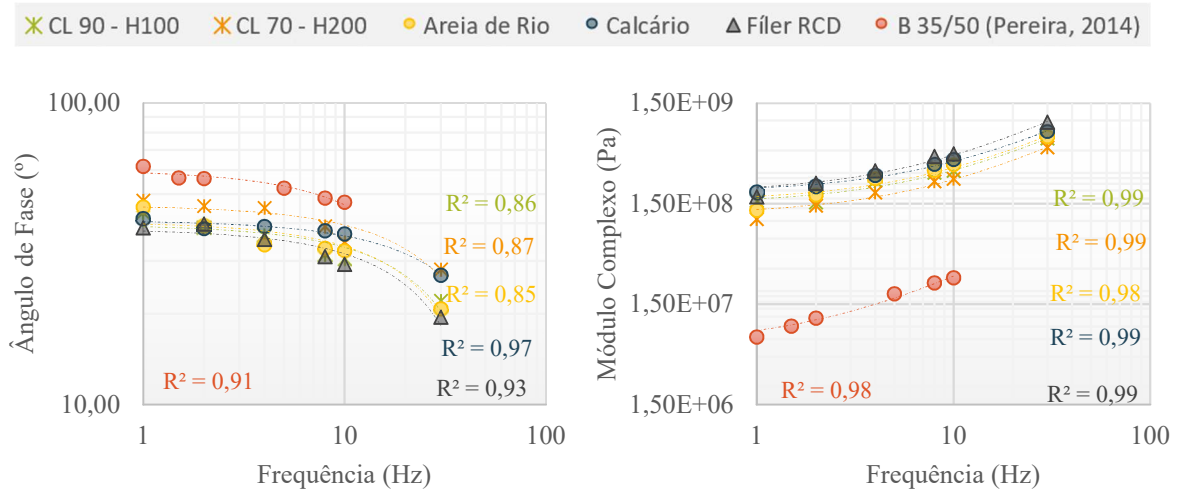


Figura 4.24 - Isotérmicas dos mastiques estudados em função do (a) ângulo de fase; (b) módulo complexo.

Através da comparação dos resultados obtidos com os ensaios realizados por Pereira, 2014, conclui-se que a adição de filer ao betume 35/50 conduz a ângulos de fase menores. Uma vez que, apesar de Pereira ter recorrido ao reómetro de corte dinâmico, o ângulo de fase é independente do ensaio utilizado. O mesmo não acontece com o módulo complexo, onde existem desvios significativos. No entanto, apesar de não se poder comparar os módulos de forma quantitativa é possível afirmar que a adição do filer ao betume ao conduzir a ângulos de fase menor conduz também a módulos complexos superiores.

Podemos ainda verificar que, a influência da frequência de carregamento no ângulo de fase é contrária à que se verifica quanto ao módulo complexo, uma vez que, para frequências de carregamento baixas, temos módulos complexos baixos e ângulos de fase elevados e para frequências de carregamento elevadas, temos módulos complexos elevados e ângulos de fase menores. O que denota, a influência do ligante betuminoso no comportamento reológico do mastique betuminoso.

Como expectável, e para a gama de frequências em estudo, os mastiques com um maior módulo complexo apresentam um menor ângulo de fase, contrariamente, os mastiques com um menor módulo apresentam um maior ângulo de fase, como representado na Figura 4.39. Por outro lado, o mastique tem uma consistência mais rígida quando sujeito a carregamentos rápidos, ou seja, a maiores frequências de carregamento (Figura 4.24 (b)). De modo análogo, quanto maior a frequência menor o valor do ângulo de fase (Figura 4.24 (a)), isto é, para um carregamento mais lento o mastique exhibe um comportamento mais elástico.

Posto isto, os mastiques compostos por fileres artificiais apresentam um módulo menor e maior ângulo de fase; os mastiques compostos por fileres naturais apresentam um módulo e um ângulo de fase intermédio, relativamente aos restantes mastiques, e por fim, os mastiques compostos por fileres reciclados, apresentam um módulo maior e um menor ângulo de fase, ou seja, exibem um comportamento de um sólido elástico.

Na Tabela 4.9 resumem-se os valores obtidos nos ensaios de flexão com aplicação de cargas cíclicas.

Fileres	f/b (relação volumétrica)	Frequência [Hz]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E* [MPa]	ϕ [°]
CL 90 - H100	0,3	1	117,31	110,19	160,95	43,21
		2	119,94	96,14	153,72	38,71
		4	203,62	150,77	253,37	36,52
		8	258,25	157,65	302,57	31,40
		10	274,44	161,02	318,19	30,40
		30	616,12	249,98	664,91	22,08
CL 70 - H200	0,3	1	70,84	77,14	104,73	47,44
		2	99,59	101,49	142,19	45,54
		4	136,34	135,76	192,40	44,88
		8	194,21	157,18	249,85	38,98
		10	216,98	149,87	263,70	34,63
		30	479,44	255,54	543,29	28,06
Areia do Rio	0,6	1	90,41	91,16	128,39	45,24
		2	142,25	115,94	183,52	39,18
		4	221,04	148,45	266,26	33,88
		8	270,74	175,78	322,80	32,99
		10	309,88	196,40	366,87	32,37
		30	650,12	246,81	695,40	20,79
Calcário	0,6	1	147,22	129,59	196,13	41,35
		2	173,08	137,10	220,80	38,38
		4	222,33	179,43	285,70	38,91
		8	292,55	226,10	369,74	37,70
		10	331,06	247,66	413,44	36,80
		30	702,62	355,60	787,48	26,84
RCD	0,6	1	137,03	109,09	175,15	38,52
		2	182,61	151,87	237,50	39,75
		4	258,88	183,41	317,27	35,32
		8	378,93	227,17	441,81	30,94
		10	409,67	228,50	469,08	29,15
		30	915,03	324,15	970,75	19,51

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de flexão

Face ao referido anteriormente e aos resultados expressos na Tabela 4.9 é possível estabelecer as seguintes observações:

- Com o aumento da frequência a componente elástica torna-se cada vez mais evidente, no que concerne, aos valores do módulo conservativo e do ângulo de fase;
- O mastique composto por CL 70 – H200 apresenta um comportamento mais viscoso, apresentando deste modo valores de ângulo de fase próximos dos 45°, valor

característico de materiais viscoelásticos. Assim sendo, o mastique composto pela CL70 possui uma menor recuperação da deformação;

- Relativamente ao módulo complexo, o mastique composto pela CL70–H20 apresenta para baixas frequências um comportamento mais mole, possuindo deste modo, um valor de penetração maior e uma menor viscosidade;
- Os mastiques de areia do rio e RCD, à medida que o tempo de carregamento diminui, ou seja, que a frequência aumenta, revelam um aumento substancial da componente elástica face à componente viscosa, perceptível atendendo aos valores do módulo conservativo e dissipativo, respetivamente;
- O mastique de RCD possui uma maior suscetibilidade à variação da frequência de carregamento comparativamente com os restantes mastiques;
- O mastique de calcário apresenta, como se pode verificar na Figura 4.24 e na Tabela 4.9, um comportamento bastante estável no que concerne ao seu comportamento reológico para frequências iguais ou inferiores a 10Hz.

Em conclusão, estas propriedades reológicas obtidas no estudo dos mastiques betuminosos apresentam diferenças comparativamente com as obtidas em ensaios da mesma natureza em misturas betuminosas. Mais concretamente, as misturas betuminosas apresentam valores de ângulo de fase menores e valores de módulo complexo superiores, aos obtidos em mastiques betuminosos, para a mesma temperatura. Isto advém das seguintes características, os mastiques ao apresentarem um maior teor em betume possuem um comportamento mais viscoso e por outro lado uma menor rigidez, da mesma forma, as misturas betuminosas pela sua matriz pétreia, apresentam uma elevada rigidez e um comportamento de um sólido elástico.

4.5.2. Análise comparativa dos resultados obtidos

Na figura 4.25 é apresentado o diagrama de Black para os diferentes mastiques estudados, permitindo avaliar de uma forma expedita a relação entre o módulo complexo e o ângulo de fase.

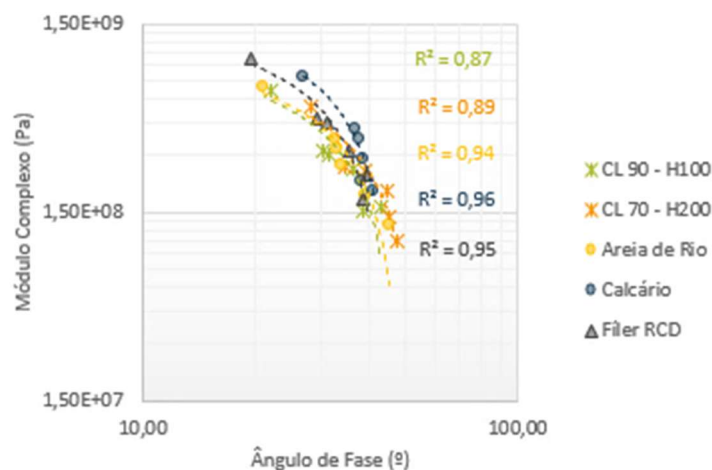


Figura 4.25 - Diagrama de Black dos mastiques estudados

Na Figura 4.25, o mastique de RCD ao apresentar como valor inicial o módulo complexo mais elevado para o ângulo de fase mais baixo apresenta também como valor final o módulo complexo mais elevado para o ângulo de fase mais baixo, comparativamente com os valores iniciais e finais dos restantes mastiques.

Em oposição, o mastique composto pela CL70-H200 ao apresentar como valor final o módulo complexo mais baixo para o ângulo de fase maior apresentam de igual modo como valor inicial o módulo complexo menor para o ângulo de fase mais elevado, comparativamente com os valores finais e iniciais dos restantes mastiques. Assim sendo, estes mastiques apresentam um comportamento mais viscoso.

Em suma, o mastique de RCD apresenta um comportamento de sólido elástico em oposição ao mastique de CL70-H200 que exhibe um comportamento viscoso.

Por ultimo, na Figura 4.26 é apresentado o diagrama de Cole-Cole para os diferentes mastiques, este diagrama consiste na representação das duas componentes do módulo complexo, a parte real, correspondente à parte elástica, e a parte imaginária, correspondente à parte viscosa do módulo.

O diagrama de Cole-Cole é utilizado geralmente para avaliar a influência da temperatura em ambas as componentes do módulo, contudo, uma vez que os ensaios realizados foram todos efetuados à mesma temperatura, optou se por utilizar esta representação para comparar diferentes mastiques em vez de diferentes temperaturas, em função da dissipação de energia.

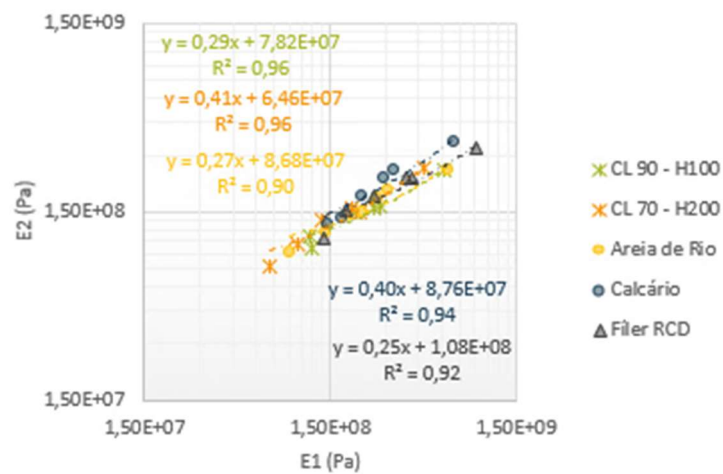


Figura 4.26 - Diagrama de Cole-Cole dos mastiques compostos por fileres artificiais, naturais e reciclados

Esta representação dos módulos conservativos e dissipativos, permite avaliar o balanço viscoelástico do mastique. No entanto, nesta análise é difícil ter uma perceção da influência do tipo de filer.

Ambas as componentes do módulo complexo aumentam, ou seja, à medida que aumenta a componente real do módulo complexo verifica-se também um aumento na componente imaginária. Contudo, o aumento da componente real é superior ao da componente imaginária. O que denota uma maior capacidade de recuperação da deformação a que este esteja sujeito, uma vez que, essa deformação é neutralizada devido à componente elástica do material.

Relativamente à distinção de resultados dos diversos grupos, é possível observar na Figura 4.26 que, os artificiais ao apresentarem como valor inicial o E1 e E2 mais baixos exibem de igual modo os valores mais baixos, da componente elástica e da componente viscosa, no caso do valor final. Sendo deste modo, os mastiques que apresentam menor dissipação de energia. Em contrapartida, os naturais e o reciclado possuem os valores mais elevados, e como tal, possuem uma maior perda de energia comparativamente com os mastiques artificiais.

Contudo, mais importante, que a analogia feita anteriormente, é a comparação dos diferentes declives, uma vez que, estes induzem o balanço viscoelástico de cada mastique. Assim sendo, como o declive do mastique de RCD é inferior aos dos restantes mastiques, pode-se afirmar que este mastique apresenta um comportamento mais elástico do que os restantes. Em contrapartida, os mastiques compostos por CL70-H200 e calcário exibem um comportamento mais viscoso.

Por fim, sublinha-se que, não se realizou uma análise comparativa dos resultados deste ensaio com os restantes, dado que, este ensaio só foi realizado a cinco dos dez mastiques em estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Com base na análise de resultados obtidos durante o presente estudo, é importante frisar os seguintes aspectos:

- No ensaio de penetração o masticado de CL90-H100 apresentou a maior variação de penetração, ou seja, este masticado possui um comportamento mais frágil, mais duro. De igual modo, no ensaio de ductilidade, este masticado foi o único que apresentou para ambas as taxas de incorporação de fíler uma rotura frágil;
- De modo análogo, os mastiques compostos por CL70-H200, areia do rio, calcário e cinzas volantes apresentaram no ensaio de penetração uma menor variação de penetração e um comportamento mais dúctil, mais mole, no ensaio de ductilidade, para ambas as taxas de incorporação;
- O ensaio de penetração apresenta uma boa correlação com o número de betume;
- No ensaio de compressão com o aumento da temperatura verifica-se um decréscimo na resistência à compressão;
- No ensaio de compressão a influência do fíler no comportamento do masticado é maior para temperaturas mais baixas;
- Os mastiques que apresentam um melhor comportamento quando sujeitos a esforços de compressão monotónicos são: NHL5, pó de tijolo, recuperado e RCD;
- No ensaio de ductilidade, os mastiques para taxas de menor incorporação de fíler apresentam um comportamento mais dúctil, menos resistente e predominantemente influenciado pelo ligante que lhe deu origem. Assim sendo, a resistência à tração e a energia de fratura aumentam para taxas de incorporação de fíler superiores;
- Para a maior taxa de incorporação de fíler, a maioria dos materiais frágeis são mais tenazes que os materiais dúcteis, apresentando desse modo uma capacidade maior de absorver energia até à sua fratura;
- Na análise dos resultados do ensaio de ductilidade tem de haver um “compromisso”, uma vez que, não interessa apenas ter uma boa resistência à tração é também necessário que o masticado consiga admitir alguma deformação. Posto isto, considera-se que o masticado de RCD exibe um bom comportamento quando sujeito a esforços de tração monotónicos;
- No ensaio de flexão conclui-se que o masticado composto pela CL70-H200 possui um comportamento mais viscoso, o que também é observado tanto no ensaio de penetração como no ensaio de ductilidade;
- No ensaio de flexão conclui-se que o masticado composto por RCD suporta tensões mais elevadas comparativamente com os mastiques de CL90-H100, CL70-H200, areia do rio e calcário, o que se verifica, tanto no ensaio de compressão como no ensaio de ductilidade;

- A influência da frequência de carregamento no ângulo de fase é contrária à que se verifica no módulo complexo;
- No diagrama de Cole-Cole verificou-se, para os diferentes mastiques, um aumento da componente real em função da componente imaginária, sendo que, quanto maior o aumento da componente real maior é a capacidade de recuperação da deformação e menor o ângulo de fase. Deste modo, o mastique de RCD tem uma maior capacidade de recuperação da deformação e um menor ângulo de fase, em oposição, o mastique de CL70-H200 tem uma menor capacidade e apresenta um ângulo de fase superior.

Tendo em conta os resultados obtidos, nos diversos ensaios, o mastique de RCD aponta ser uma boa alternativa aos fileres tradicionais.

5.2. Desenvolvimentos Futuros

Durante a realização deste trabalho foram identificadas algumas recomendações para desenvolvimentos futuros, pois considera-se importante dar continuação ao presente estudo, através da exploração mais detalhada de aspetos relacionados com a caracterização do comportamento reológico e mecânico do mastique betuminoso. Considera-se também importante estabelecer uma metodologia de formulação do mastique betuminoso, assim como, normas de ensaio para caracterização mecânica dos mastiques betuminosos.

Assim recomenda-se:

- Aplicar a metodologia utilizada no presente trabalho a outros tipos de betume incluindo a utilização de ligantes betuminosos envelhecidos através de diferentes processos, de modo a analisar o efeito do envelhecimento em serviço no comportamento do mastique betuminoso;
- Realizar ensaios de fadiga a deformação controlada;
- Estabelecer uma comparação do comportamento reológico dos mastiques obtido pela metodologia utilizada no presente trabalho com a obtida através do reómetro de corte dinâmico;
- Aplicar o modelo sólido linear padrão recorrendo aos valores dos módulos de deformabilidade obtidos no ensaio de compressão, presentes neste estudo, e aos valores da viscosidade resultantes de ensaios com o reómetro de corte dinâmico;
- Realizar ensaios mecânicos para estudo da ligação agregado-mastique;
- Realizar ensaios do tipo Double Edge Notched Tension Test (DENT) para determinação da ductilidade dos mastiques estudados;
- Avaliar a capacidade de autorregeneração de mastiques e das respetivas misturas;
- Realizar ensaios de caracterização reológica e mecânica em misturas betuminosas formuladas com a incorporação dos mastiques já estudados, potenciando os fileres que apresentam o melhor ou mais diferenciador comportamento, de modo a avaliar qual a influência da sua presença;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airey, G. D.**, “*Rheological characteristics of polymer modified and aged bitumens*”, PhD thesis, University of Nottingham, 1997.
- Airey, G. D., Shen, S., Carpenter, S. e Huang, H.**, “*A dissipated energy approach to fatigue evaluation*”, Road Materials and Pavement Design, Vol. 7 No. 1, pp. 47-69, 2006.
- Antunes, V.**, “*Influência do filer no comportamento dos mastiques betuminosos*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- Antunes, V., Freire, A. C., Quaresma L. e Micaelo, R.**, “*Effect of the chemical composition of fillers in the filler-bitumen interaction.*” Construction and Building Materials. 104: 85-91, 2016.
- Antunes, V., Freire, A. C., Quaresma L. e Micaelo, R.**, “*Influence of the geometrical and physical properties of filler in the filler-bitumen interaction.*” Construction and Building Materials. 76: 322-329, 2015.
- Bardini, V.**, “*A importância do filer para o bom desenvolvimento de misturas asfálticas*”, Minerva, 2009.
- Bardini, V., Klinsky, L., Júnior, J. e Roque, R.**, “*Influência do filer mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos*”, Transportes, n.º 3, Vol. 20, pp. 19-26, 2012.
- Barnes, H. Hutton, F. e Walters, K.**, “*An introduction to rheology*”, Elsevier, Amsterdam, 1989.
- Braham, A., Butlar, W. e Marasteanu, M.**, “*Effect of binder type, aggregate, and mixture composition on fracture energy of hot-mix asphalt in cold climates*”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2001, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 102-109, 2007.
- Branco, F., Pereira, P. e Santos, L. P.**, “*Pavimentos rodoviários*”, Almedina, Coimbra, 2006.
- Carbonneau A., Bahar E.**, “*Vine and berry responses to contrasted water fluxes in Ecotron around ‘véraison’. Manipulation of berry shrivelling and consequences on berry growth, sugar loading and maturation*”. CR GiESCO 16, 145-156, 2009.
- Daniel, J. e Kim, R.**, “*Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixture*”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 13:6, pp. 434-440, 2001.
- Di Benedetto, H. Partl, M., Francken, L. e De La Roche, C.**, “*Stiffness testing for bituminous mixtures*”, Materials and Structures, Vol. 34, pp. 66-70, 2001.
- Di Benedetto, H. e De La Roche, C.**, “*State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures*”. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. State of Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design, pp. 69-101, London, 1998.
- EP – Estradas de Portugal, S.A.**, “*Catálogo de degradações dos pavimentos rodoviários*”, Gestão da conservação. Gabinete de Gestão da Rede, Estradas de Portugal, Almada, 2008.
- Eurobitume**, “*Rheology of bituminous binders: glossary of rheological terms - a practical summary of the most common concepts*”, European Bitumen Association, 1996.
- Gardete, D.**, “*Comparação de ensaios laboratoriais para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2006.
- Guerra, A.**, “*Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de mastiques betuminosos com reómetro de corte dinâmico*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2015.

- Koh, C. e Roque, R.**, “*Use of nonuniform stress-state tests to determine fracture energy of asphalt mixtures accurately*”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2181, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010, pp. 55–66, 2010.
- Liao, M.**, “*Small and large strain rheological and fatigue characterization of bitumen-filler mastics*”, PhD thesis, School of Civil Engineering, University of Nottingham, 2007.
- Liao, M., Chen, J. e Tsou, K.**, “*Fatigue characteristics of bitumen-filler mastics and asphalt mixtures*”, Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, pp. 916-923, 2012.
- Liao, M., Airey, G. e Chen, J.**, “*Mechanical properties of filler-asphalt mastics*”, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol.6.5, pp. 576-581, 2013.
- JAE**, “*Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária*, Junta Autónoma de Estradas, Lisboa, 1995.
- Matos, P.**, “*Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados: interação agregado-betume*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- Miranda, H.**, “*Resistência à fadiga de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha*”, Dissertação de Mestrado em Transportes, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- Osman, S.**, “*The role of bitumen and bitumen/filler mortar in bituminous mixture fatigue*”, PhD thesis, School of Civil Engineering, University of Nottingham, 2004.
- Pereira, A.**, “*Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de betumes com reómetro de corte dinâmico*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- Read, J. e Whiteoak, D.**, “*The shell bitumen handbook*”, Thomas Telford, London, 2003.
- Romeo, E.**, “*Measurement and prediction of fundamental tensile failure limits of hot mix asphalt (HMA)*”. PhD thesis, University of Florida, Gainesville, 2008.
- Santos, A.**, “*Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2011.
- Silva, H.**, “*Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique: contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas*”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2005.
- Tayebali, A., Rowe, G e Sousa, J.**, “*Fatigue response of asphalt-aggregate mixes*”. SHRP-A-404. CD Rom. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington D.C., 1994.
- Teixeira, A.**, “*Avaliação do impacto de diferentes fileres no desempenho das misturas betuminosas*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- Van den Bergh, W.**, “*The effect of ageing on the fatigue and healing properties of bituminous mortars*”, PhD thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2011.
- Yussof, N.**, “*Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders*”, PhD thesis, University of Nottingham, 2012.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

- EN 12597** (CEN, 2014). Bitumen and bituminous binders – Terminology.
- EN 12697-24** (CEN, 2004). Bituminous mixtures – Test method for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue.
- EN 12697-26** (CEN, 2004). Bituminous mixtures – Test method for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness.
- EN 13108-20** (CEN, 2006). Bituminous mixtures – Material specifications – Part 20: Type test.
- EN 13703** (CEN, 2003). Bitumen and bituminous binders – Determination of deformation energy.
- EN 1426** (CEN, 2015). Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration.
- EN 1427** (CEN, 2015). Bitumen and bituminous binders – Determination of softening point – Ring and ball method.
- EN 197-1** (CEN, 2011). Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
- EN 459-1** (CEN, 2010). Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria.
- NF P 98-256-1** (AFNOR, 1991). Essais sur constituants de mélanges hydrocarbonés – Partie 1: Détermination du pouvoir absorbant des fines.
- NP EN 1097-4** (IPQ, 2012). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 4: Determinação dos vazios do filer seco compactado.
- NP EN 13043** (IPQ, 2004). Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.
- NP EN 13179-1** (IPQ, 2010). Ensaios de fileres utilizados em misturas betuminosas - Parte 1: Variação da temperatura de amolecimento de anel e bola.
- NP EN 13179-2** (IPQ, 2010). Ensaios de fileres utilizados em misturas betuminosas - Parte 2: Viscosidade aparente (Número de betume).
- NP EN 13398** (IPQ, 2013). Betumes e ligantes betuminosos – Determinação da recuperação elástica de betumes modificados.
- NP EN 13589** (IPQ, 2013). Betumes e ligantes betuminosos – Determinação das propriedades de tração de betumes modificados pelo método força-ductilidade.
- NP EN 196-6** (IPQ, 2010). Métodos de ensaio de cimentos - Parte 6: Determinação da finura.

APÊNDICE A – Gráficos obtidos no ensaio de compressão uniaxial com aplicação de carga monotônica crescente

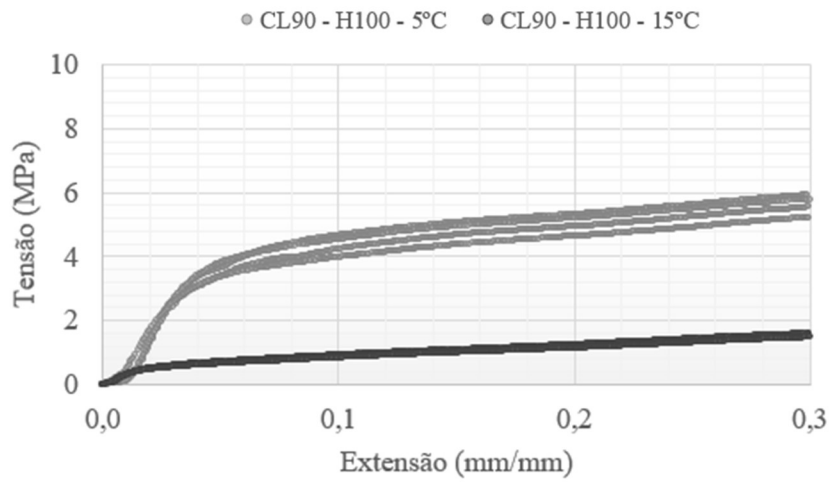


Figura 0.1 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de CL90 – H100

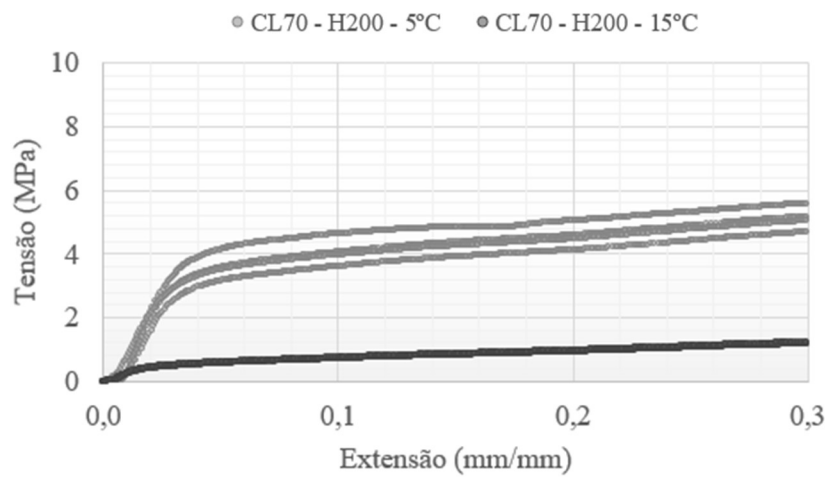


Figura 0.2 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de CL70 - H200

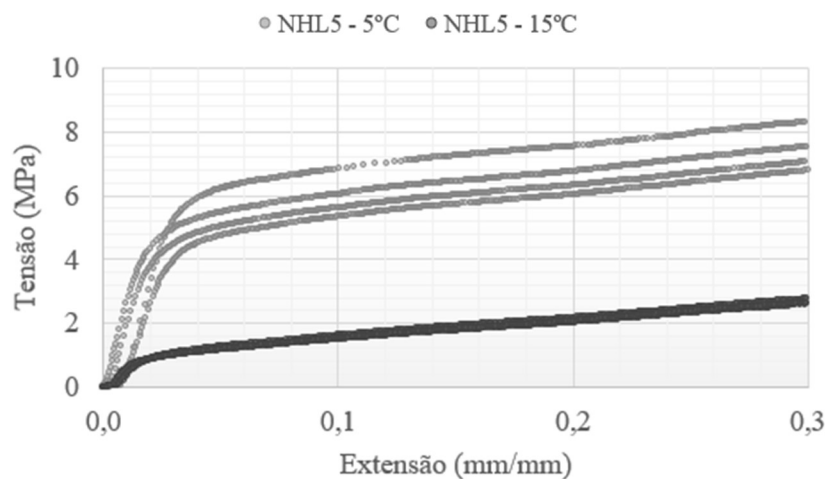


Figura 0.3 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de NHL5

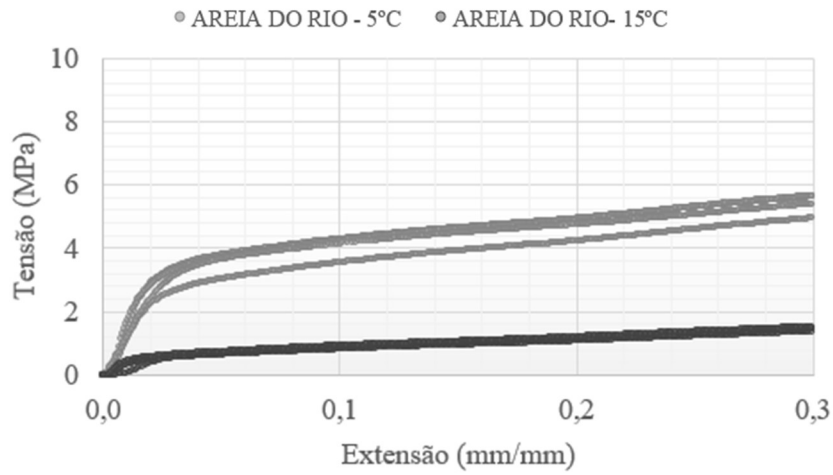


Figura 0.4 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Areia do Rio

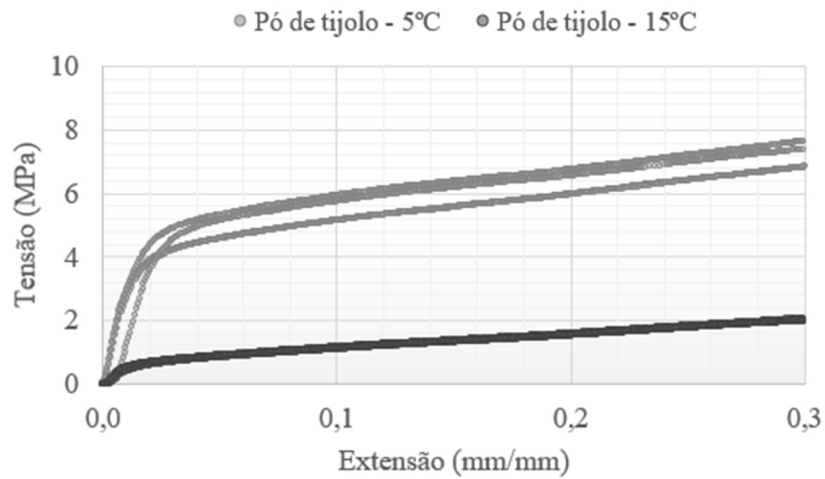


Figura 0.5 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Pó de Tijolo

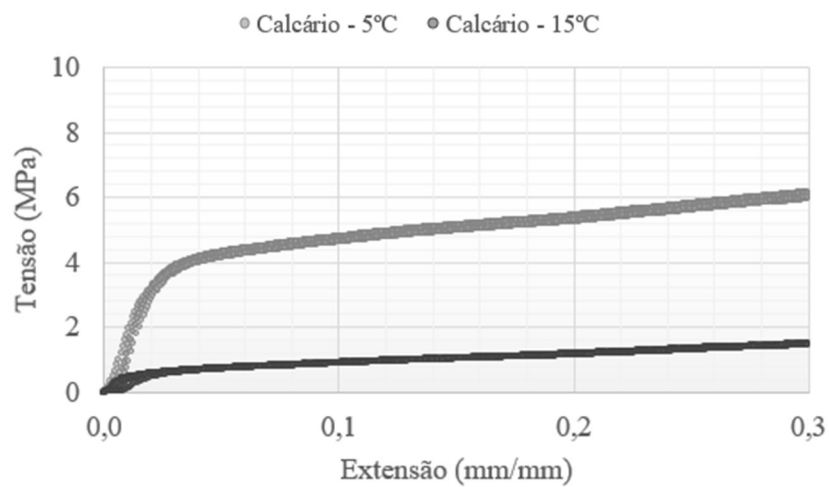


Figura 0.6 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Calcário

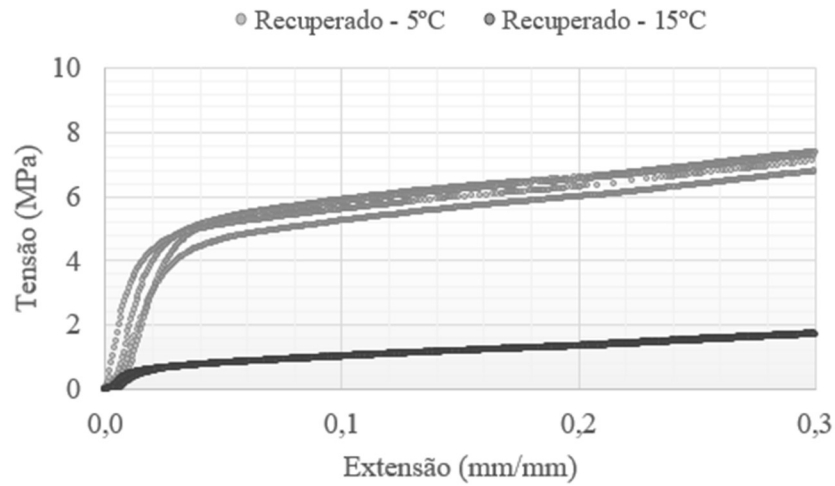


Figura 0.7 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Recuperado

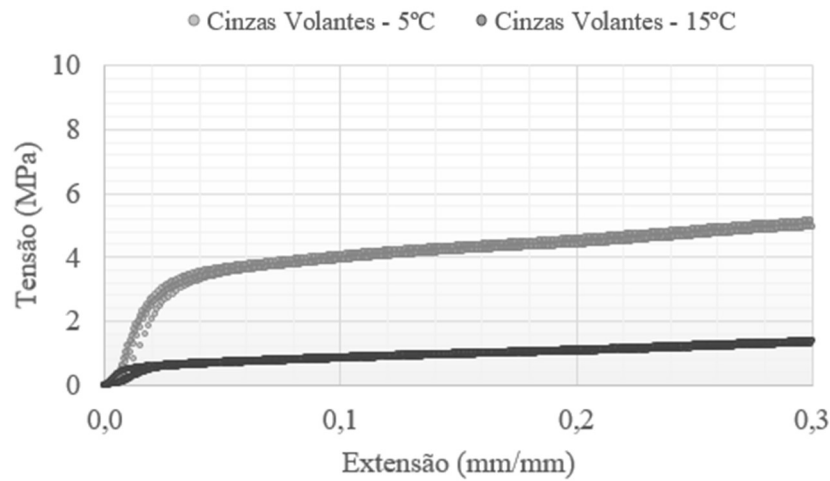


Figura 0.8 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de Cinzas Volantes

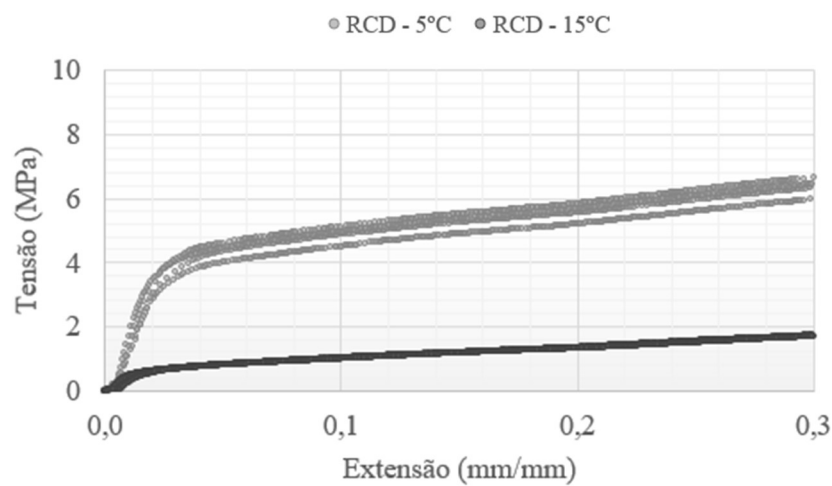


Figura 0.9 - Gráfico Tensão-Extensão do mastique de RCD

APÊNDICE B – Gráficos obtidos no ensaio de força-ductilidade com aplicação de carga monotónica crescente

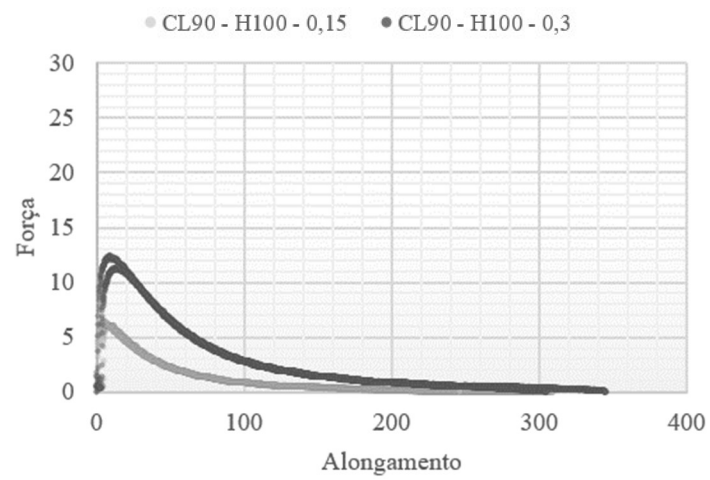


Figura b.1 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de CL90 – H100

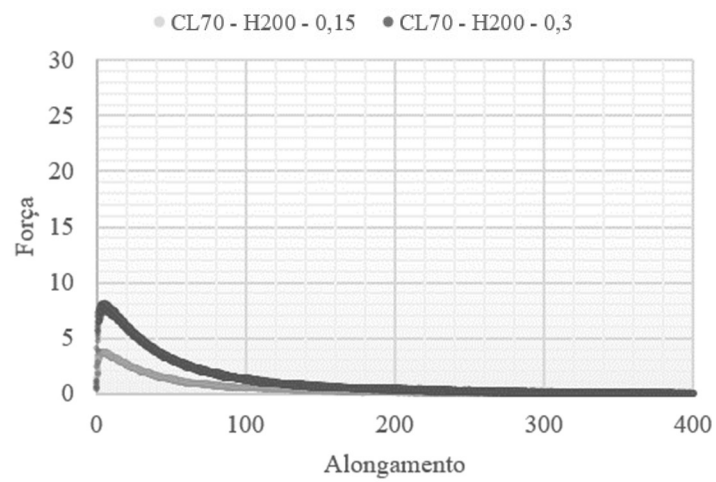


Figura b.2 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de CL70 – H200

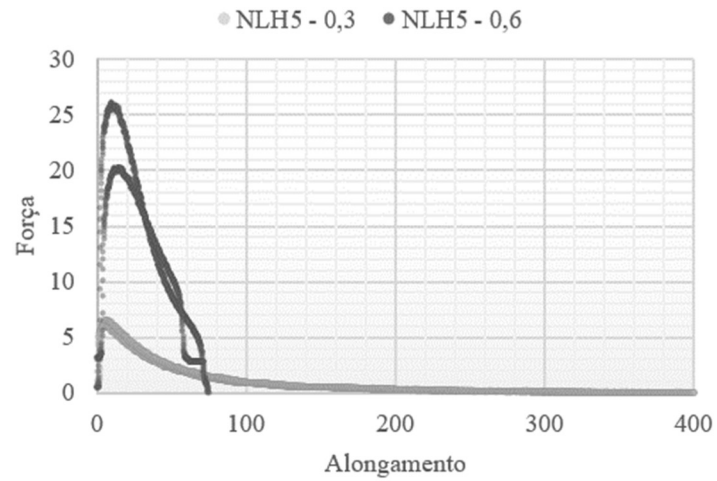


Figura b.3 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de NHL5

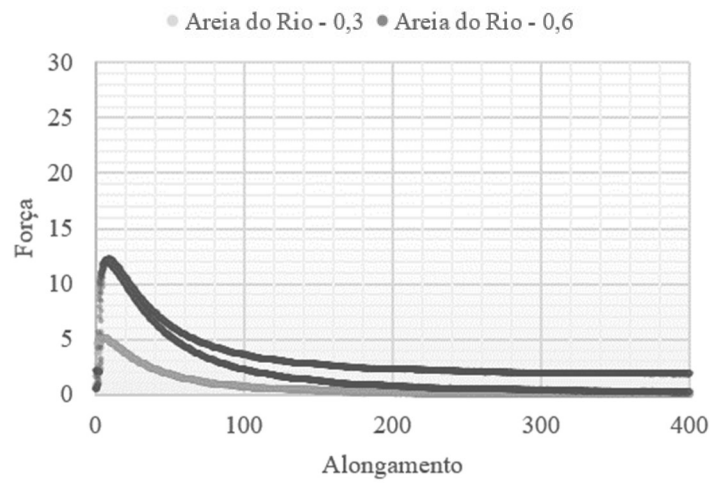


Figura b.4 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Areia do Rio

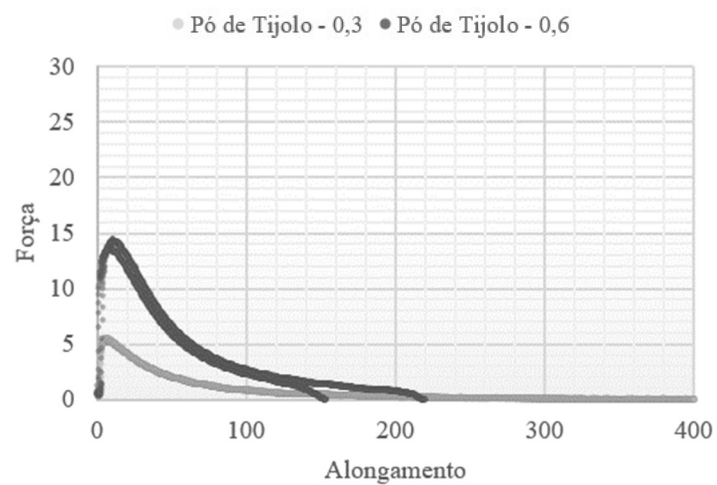


Figura b.5 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Pó de Tijolo

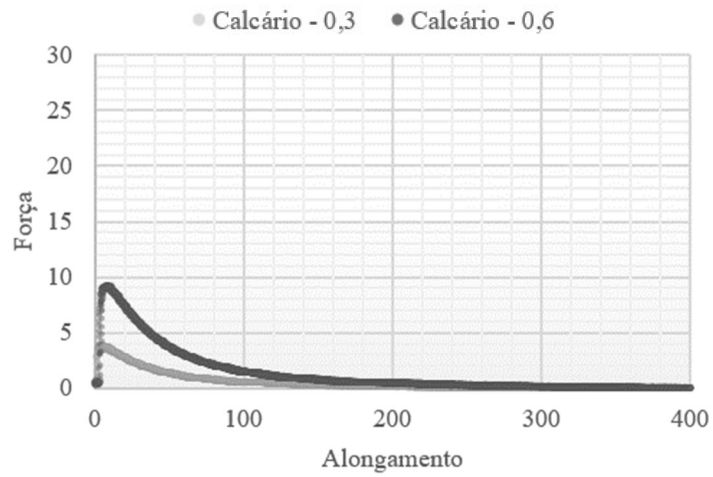


Figura b.6 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Calcário

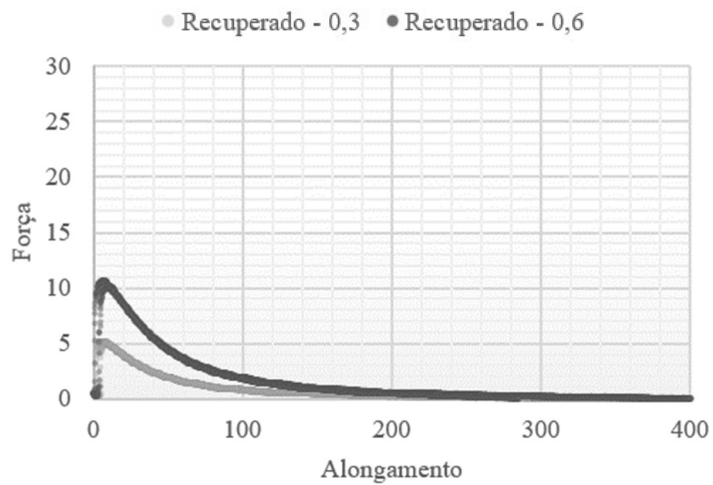


Figura b.7 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Recuperado

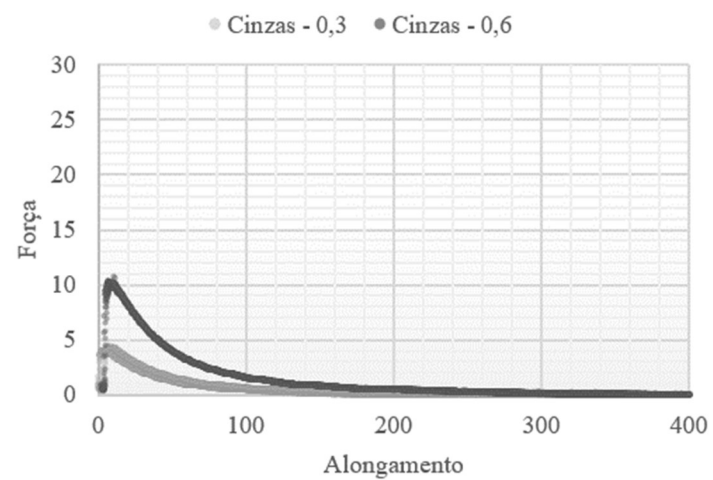


Figura b.8 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de Cinzas Volantes

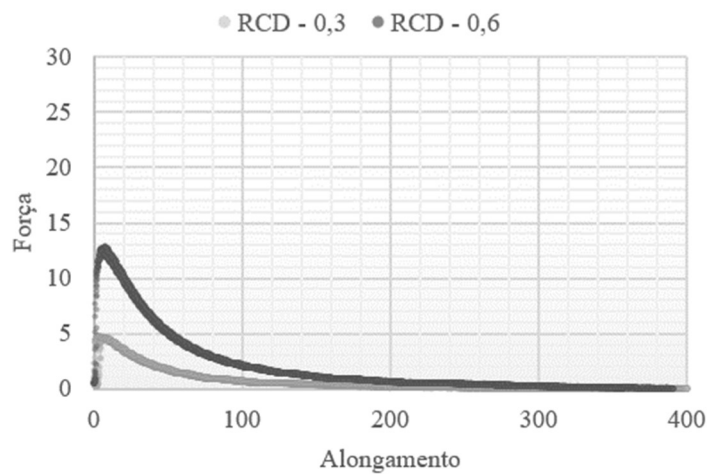


Figura b.9 - Gráfico Força-Alongamento do mastique de RCD