



Inês Filipa Ferreira Cerqueira

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Caracterização de argamassas betuminosas com granulados de borracha e de cortiça

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

Orientador: Professor Doutor Rui Micaelo, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Professor Doutor José Varandas
Arguente: Professor Luís Quaresma
Vogal: Professor Doutor Rui Micaelo



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho, 2019

Caracterização de argamassas betuminosas com granulados de borracha e de cortiça

Copyright © Inês Filipa Ferreira Cerqueira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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, e 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.

Aos meus pais.

Agradecimentos

A realização da presente dissertação não seria possível sem a colaboração e acompanhamento de alguns intervenientes, aos quais gostaria de apresentar o meu agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador científico, o Professor Rui Micaelo, pela sua orientação, apoio, disponibilidade, ajuda na resolução de problemas e partilha de conhecimentos prestados, os quais foram fundamentais na elaboração da presente dissertação.

Também gostaria de agradecer a alguns professores do Departamento de Engenharia Civil que de alguma forma colaboraram na elaboração deste estudo: o professor Daniel Aelenei, a professora Paulina Faria, o professor Armando Antão e o professor Carlos Rodrigues. E gostaria de expressar um agradecimento muito especial ao professor Luís Quaresma, que me acompanhou no princípio deste estudo.

Quero deixar um agradecimento especial aos técnicos de laboratório Jorge Silvério e ao engenheiro Vítor Silva, pela disponibilidade, ajuda, simpatia e confiança.

Aos meus colegas André Moreno e Ana Catarina Guerra pela partilha de conhecimentos e por me terem auxiliado nos primeiros momentos de execução do procedimento experimental tanto em laboratório como no equipamento de ensaio.

Às empresas Probigalp – Ligantes Betuminosos, S.A., SANCHEZ, S.A., Recipneu - Empresa Nacional de Reciclagem de Pneus, Lda., SECIL - Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A. e à engenheira Ana Margarida Brás, pelo fornecimento/cedência dos materiais requeridos no âmbito deste estudo.

Aos meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo deste percurso académico. A eles agradeço a amizade, a ajuda, a confiança, o companheirismo e a força que me deram nos momentos mais críticos.

Um agradecimento especial ao meu namorado pela imensa paciência e compreensão e o grande apoio e motivação que me deu para terminar o curso.

E, por fim, um profundo agradecimento à minha família, em particular aos meus pais, pela contínua motivação e incentivo prestados durante todo o meu percurso académico.

Resumo

Numa mistura betuminosa, a argamassa betuminosa, constituída por agregados finos, fíler e betume, liga os agregados grossos e preenche deste modo os seus vazios. Assim, é essencial caracterizar o comportamento deste material devido à sua influência em diversas características da mistura betuminosa.

O presente estudo, pretende caracterizar argamassas betuminosas com granulados de borracha de pneus em fim de vida útil e de cortiça, comparando as suas propriedades com argamassas betuminosas *convencionais*. Embora estes materiais sejam considerados resíduos, podem melhorar o desempenho das misturas betuminosas devido às suas propriedades elásticas e acústicas. A sua utilização, além de promover a sustentabilidade dos pavimentos rodoviários, também promovem a redução do ruído de interação pneu-pavimento. Foram formuladas 18 argamassas betuminosas, com três percentagens de betume distintas, três tipos de agregados finos e dois tipos de fíler diferentes.

Os provetes de argamassas foram caracterizados quanto às dimensões e propriedades volumétricas. O comportamento mecânico foi analisado através da resistência mecânica, da deformabilidade e da rigidez das diferentes argamassas, por ensaios mecânicos monotónicos de compressão e ensaios mecânicos cíclicos. O desempenho acústico, foi analisado pela medição da pressão sonora registada de impactos de percussão gerados sobre os provetes.

As propriedades volumétricas dos provetes de argamassas betuminosas são influenciadas pela percentagem de betume, tipo de fíler e tipo de agregado fino utilizado. Os ensaios mecânicos de compressão mostraram que as argamassas betuminosas com granulados de borracha e de cortiça têm características diferentes das argamassas convencionais. O ensaio de medição de pressão sonora, mostrou que os granulados de borracha e de cortiça melhoram as características acústicas das argamassas.

Palavras-chave: Argamassa betuminosa; Granulado de borracha; Granulado de cortiça; Substituição do agregado; Caracterização mecânica; Comportamento acústico.

Abstract

In a bituminous mixture, the bituminous mortar, consisting of fine aggregates, filler and bitumen, binds the coarse aggregates and so fills their voids. Thus, it is essential to characterize the behavior of this material due to its influence on several characteristics of the bituminous mixture.

The present study aims to characterize bituminous mortars with end of life tire crumb rubber and cork, comparing their properties with *conventional* bituminous mortars. Although these materials are considered waste, they can improve the performance of bituminous mixtures due to their elastic and acoustic properties. Its use in addition to promoting the sustainability of road pavements also promote the reduction of tire-pavement interaction noise. Eighteen bituminous mortars with three different percentages of bitumen, three types of fine aggregates and two different types of filler were formulated.

The mortar specimens were characterized by dimension and volumetric properties. The mechanical behavior was analyzed by the mechanical strength, deformability and stiffness of the different mortars, by monotonic compression mechanical tests and cyclic mechanical tests. The acoustic performance was analyzed by measuring the recorded sound pressure of percussive impacts generated on the test pieces.

The volumetric properties of bituminous mortars are influenced by the percentage of bitumen, type of filler and type of fine aggregate used. Mechanical compression tests have shown that bituminous mortars with rubber granules and cork have different characteristics from conventional mortars. The sound pressure measurement test showed that rubber and cork granulates improve the acoustic characteristics of mortars.

Keywords: Bituminous mortar; Crumb rubber; Granulated cork; Aggregate substitutes; Mechanical characterization; Acoustic behavior.

Índice

Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xxi
Glossário	xxiii
Símbolos, Siglas e Abreviaturas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Motivação e enquadramento do tema	1
1.2 Objetivos e metodologia do estudo	2
1.3 Organização do estudo	3
2 Revisão da literatura	5
2.1 Considerações gerais	5
2.2 Materiais	7
2.2.1 Misturas betuminosas	7
2.2.2 Argamassas betuminosas	10
2.2.3 Incorporação de outros materiais	15
2.3 Comportamento mecânico	23
2.3.1 Reologia	23
2.3.2 Resistência às deformações permanentes	32
2.4 Comportamento acústico	33
2.4.1 Ruído do tráfego rodoviário	34
2.4.2 Superfícies rodoviárias de baixo ruído	35
3 Programa experimental	37
3.1 Materiais	37
3.1.1 Ligante betuminoso	38

3.1.2	Agregados	39
3.1.3	Fíler	43
3.2	Fabrico dos provetes de argamassas betuminosas	46
3.2.1	Composição das argamassas betuminosas	46
3.2.2	Preparação de sub-amostras de betume	49
3.2.3	Compactação dos provetes	49
3.2.4	Preparação dos provetes de argamassas betuminosas	51
3.3	Caracterização dos provetes	54
3.4	Análise acústica	56
3.5	Ensaio mecânicos monotónicos de compressão	58
3.6	Ensaio mecânicos cíclicos	60
4	Resultados e discussão	69
4.1	Caracterização dos provetes	69
4.1.1	Altura média dos provetes	69
4.1.2	Diâmetro médio dos provetes	70
4.1.3	Massa volúmica média e Volume de vazios (V_m) dos provetes	71
4.1.4	Volume de Vazios na Mistura de Agregados (VMA) e Percentagem de Vazios preenchidos com Betume (VFB) dos provetes	72
4.2	Ensaio mecânicos monotónicos de compressão	74
4.2.1	Resultados por tipo argamassa betuminosa	74
4.2.2	Análise comparativa dos resultados obtidos	76
4.3	Análise acústica	86
5	Conclusões	89
5.1	Considerações finais	89
5.2	Desenvolvimentos futuros	92
	Referências Bibliográficas	93
A	Resultados da caracterização dos provetes	101
B	Resultados dos ensaios monotónicos de compressão - Gráficos força / deslocamento	103
C	Resultados dos ensaios monotónicos de compressão - Valores de força e deslocamento na rotura	111
D	Resultados da análise acústica	113
I	Certificado de qualidade do betume modificado PMB 45/80-65	115
II	Declaração de conformidade CE do fíler NHL5	117

Índice de Figuras

2.1	Constituição de um pavimento tipo (adaptado de EAPA [5]).	5
2.2	Constituição tipo dum pavimento rodoviário flexível [6].	7
2.3	Composição volumétrica duma mistura betuminosa compactada [1].	8
2.4	Ensaio de penetração a 25°C [1].	13
2.5	Ensaio de determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola [1].	13
2.6	Observação ao microscópio óptico do granulado de borracha: (a) processo mecânico e (b) processo criogénico[36].	18
2.7	Modelo de interação betume-borracha (adaptado de Dias [36]).	19
2.8	Montado de sobreiros da zona mediterrânea, <i>FAO</i> [44].	20
2.9	Disposição das células da cortiça [45].	21
2.10	Classificação do comportamento reológico de fluidos (adaptado de Santos [52])	24
2.11	Comportamento reológico dos materiais Newtonianos (adaptado de Yildirim et al. [53]).	24
2.12	Comportamento reológico dos materiais Não-Newtonianos dependentes do tempo: Comportamento Tixotrópico (a) e Anti-Tixotrópico (b) (adaptado de AMETEK Brookfield [55]).	25
2.13	Comportamento reológico dos materiais Não-Newtonianos independentes do tempo: Sem tensão de cedência (a) e com tensão de cedência (b) (adaptado de Cavadas [54]).	26
2.14	Módulo de rigidez e ângulo de fase - desfasamento entre a tensão e a extensão (adaptado de Martinho [58]).	27
2.15	Exemplos de isócronas de diferentes misturas betuminosas submetidas a uma frequência de 10 Hz: (a) isócronas do módulo complexo e (b) isócronas do ângulo de fase (adaptado de H. Silva [6]).	29
2.16	Exemplos de isotérmicas de um betume: (a) isotérmicas do módulo complexo e (b) isotérmicas do ângulo de fase (adaptado de H. Silva [6]).	29

2.17 Exemplo de aplicação do princípio da sobreposição tempo-temperatura para a construção de uma curva-mestra correspondente ao módulo complexo (adaptado de Yussof [62]).	30
2.18 Exemplo de curvas-mestras de mastiques betuminosos com diferentes tipos de fíler, com $T_{ref} = 10^{\circ}\text{C}$ (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase (adaptado de Yussof [62]).	30
2.19 Exemplo de diagramas de Black de mastiques betuminosos com diferentes tipos de fíler (adaptado de Yussof [62]).	31
2.20 Exemplo de um diagrama de Cole-Cole (adaptado de Yussof [62]).	31
2.21 Esquema de ensaio de compressão uniaxial (adaptado de Groover [67]).	32
2.22 Parâmetros físicos da onda sonora [68].	33
2.23 Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (à esquerda) e funcionamento do veículo (à direita) [68].	34
3.1 Sub-amostras em latas grandes, médias e pequenas de betume modificado (PMB 45/80-65).	38
3.2 Peneiração mecânica com série base e série 2 (a) e fracções granulométricas do pó de pedra (b).	39
3.3 Curva granulométrica do pó de pedra.	40
3.4 Fibras têxteis removidas do granulado de borracha.	42
3.5 Curva granulométrica do granulado de borracha.	42
3.6 Granulados de borracha e cortiça.	43
3.7 Curva granulométrica do granulado de cortiça.	44
3.8 Fíler recuperado (a) e cal hidráulica (b).	44
3.9 Diagrama de composição dos provetes.	46
3.10 Esquema de volumes dos agregados antes e após substituição.	47
3.11 Curva granulométrica da composição do agregado fino mineral com os granulados de borracha e de cortiça e os fileres.	48
3.12 Molde metálico cilíndrico (a) e equipamento de compactação - martelo perfurador com acessório de cinzelagem adaptado (b).	49
3.13 Proвете seccionado.	50
3.14 Termómetro por infravermelhos.	51
3.15 Início da mistura da argamassa (a) e mistura da argamassa homogeneizada (b).	52
3.16 Proвете antes da compactação (a) e provete após compactação (b).	53
3.17 Proвете de argamassa de pó de pedra (a), provete de argamassa de pó de pedra e granulado de borracha (b) e provete de pó de pedra e granulado de cortiça (c).	53
3.18 Sonómetro.	57
3.19 Máquina de percussão: Em posição de ensaio (a) e vista da peça percussora(b).	57
3.20 Amostras para comparação de resultados: Proвете de betão (a) e barrote de madeira de pinho (b).	57
3.21 Ensaio de medição da pressão sonora.	58

3.22	Ensaio de compressão uniaxial dos provetes de argamassas a 25°C (a) e a 40°C (b), o mecanismo de ensaio (Zwick) e a câmara de aquecimento para controlo de temperatura.	59
3.23	Esquema de um ciclo: posição inicial do provete (a), provete em compressão (b) e provete em tração (c) (adaptado de Moreno [4]).	60
3.24	Materiais utilizados na preparação prévia dos ensaios cíclicos: (a) suportes de ensaio metálicos e (b) cola Araldite.	61
3.25	Ensaio cíclicos a 25°C no equipamento de ensaio Zwick.	62
3.26	Exemplo de uma regressão sinusoidal força/tempo para o provete <i>BM7 H SC 25 0,2 0,08</i>	64
3.27	Exemplo de um gráfico força/deslocamento para o provete <i>BM7 H SC 25 0,2 0,08</i> , após regressão sinusoidal.	64
3.28	Gráfico força/tempo para o provete <i>BM6 L S 25 0,2 0,02</i>	65
3.29	Gráfico força/tempo com regressão sinusoidal para o provete <i>BM6 H SR 25 0,2 0,02</i>	66
3.30	Gráfico deslocamento/tempo com regressão sinusoidal para o provete <i>BM6 H SR 25 0,2 0,02</i>	66
3.31	Gráfico força/deslocamento com regressão sinusoidal para o provete <i>BM6 H SR 25 0,2 0,02</i>	67
4.1	Altura média dos provetes de argamassas betuminosas.	70
4.2	Diâmetro médio dos provetes de argamassas betuminosas.	70
4.3	Massas volúmicas médias dos provetes de argamassas betuminosas.	71
4.4	Volume de vazios dos provetes de argamassas betuminosas.	72
4.5	Volume de vazios na mistura de agregados (VMA) dos provetes de argamassas betuminosas.	73
4.6	Percentagem de vazios preenchidos com betume (VFB) dos provetes de argamassas betuminosas.	74
4.7	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), filer de cal hidráulica (H) e pó de pedra (S).	75
4.8	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), filer de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).	75
4.9	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), filer de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).	76
4.10	Provete após ensaio de compressão uniaxial:(a) argamassa betuminosa com granulados de borracha e (b) argamassas betuminosa com granulados de cortiça.	76
4.11	Influência da temperatura de ensaio no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $v = 0,08$ mm/s.	77

4.12	Influência da temperatura de ensaio no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $v = 0,005 \text{ mm/s}$	78
4.13	Influência da temperatura de ensaio no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $v = 0,08 \text{ mm/s}$	78
4.14	Influência da temperatura de ensaio no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $v = 0,005 \text{ mm/s}$	78
4.15	Influência da velocidade de ensaio no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $T = 25^\circ\text{C}$	79
4.16	Influência da velocidade de ensaio no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $T = 40^\circ\text{C}$	79
4.17	Influência da velocidade de ensaio no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $T = 25^\circ\text{C}$	80
4.18	Influência da velocidade de ensaio no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $T = 40^\circ\text{C}$	80
4.19	Influência do tipo de fíler no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra (S).	81
4.20	Influência do tipo de fíler no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de borracha (SR).	81
4.21	Influência do tipo de fíler no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de cortiça (SC).	82
4.22	Influência do tipo de fíler no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra (S).	82
4.23	Influência do tipo de fíler no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de borracha (SR).	83
4.24	Influência do tipo de fíler no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de cortiça (SC).	83
4.25	Influência do tipo de agregado fino no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com fíler recuperado (L).	84
4.26	Influência do tipo de agregado fino no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com fíler de cal hidráulica (H).	84
4.27	Influência do tipo de agregado fino no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com fíler recuperado (L).	85
4.28	Influência do tipo de agregado fino no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com fíler de cal hidráulica (H).	85
4.29	Pressão sonora dos provetes sujeitos a impactos por equipamento de percussão.	87
B.1	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler recuperado (L) e pó de pedra (S).	103

B.2	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra (S).	104
B.3	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).	104
B.4	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).	105
B.5	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).	105
B.6	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).	106
B.7	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler recuperado (L) e pó de pedra (S).	106
B.8	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra (S).	107
B.9	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).	107
B.10	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).	108
B.11	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).	108
B.12	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).	109
B.13	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), fíler recuperado (L) e pó de pedra (S).	109
B.14	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).	110

B.15	Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove- tes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).	110
I.1	Certificado de qualidade do betume modificado PMB 45/80-65.	116
II.1	Declaração de conformidade CE do fíler NHL5.	118

Índice de Tabelas

2.1	Designação das misturas betuminosas a quente [9].	9
3.1	Principais propriedades do betume modificado utilizado no fabrico das argamassas betuminosas.	38
3.2	Massas volúmicas e absorção de água do pó de pedra pelo método do picnómetro.	41
3.3	Análise granulométrica dos fíleres NHL5 (retirado de Antunes [23]) e recuperado.	45
3.4	Propriedades dos fíleres NHL5 (retirado de Antunes [23]) e recuperado.	45
3.5	Composição mássica dos provetes de argamassas betuminosas.	48
3.6	Massa volúmica das secções cilíndricas do provete <i>BM7 H SR</i> em função dos períodos de tempo de compactação.	51
3.7	Composição volumétrica dos provetes de argamassas betuminosas compactados.	55
3.8	Síntese dos parâmetros e siglas utilizados nos ensaios monotónicos.	59
3.9	Síntese dos parâmetros e siglas utilizados nos ensaios cíclicos.	61
3.10	Valores de módulo complexo e ângulo de fase para as argamassas betuminosas <i>BM7 L SR</i>	66
A.1	Altura média, diâmetro médio e massa volúmica média dos provetes de argamassas betuminosas e respectivos desvios padrão.	101
A.2	Massa volúmica máxima teórica, volume de vazios, volume de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume dos provetes de argamassas betuminosas.	102
C.1	Valores de força e deslocamento na rotura obtidos para argamassas betuminosas com pó de pedra (S), com fíler recuperado (L) ou fíler de cal hidráulica (H), para as várias configurações de ensaio.	111

C.2	Valores de força e deslocamento na rotura obtidos para argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de borracha (SR), com fíler recuperado (L) ou fíler de cal hidráulica (H), para as várias configurações de ensaio.	112
C.3	Valores de força e deslocamento na rotura obtidos para argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de cortiça (SC), com fíler recuperado (L) ou fíler de cal hidráulica (H), para as várias configurações de ensaio.	112
D.1	Valores de pressão sonora dos provetes sujeitos a impactos por equipamento de percussão.	113

Glossário

borracha sintética	Elastômetro artificial que se obtêm através de polímeros sintetizados a partir de subprodutos do petróleo. Este tipo de borracha surgiu devido à necessidade de produtos de baixo custo com fontes mais estáveis, durante a I Guerra Mundial.
borracha natural	Polímero que se obtém da seiva da árvore-da-borracha ou seringueira (<i>Hevea brasiliensis L.</i>), da família das <i>Euphorbiaceae</i> . A sua seiva leitosa é designada de látex, que após processada com outras substâncias químicas se transforma em borracha.
rodados	Conjunto das rodas de um veículo.
via seca	Mistura de granulado de borracha devidamente graduado com os agregados aquecidos, sendo de seguida adicionado ao betume puro aquecido.
via húmida	Mistura de granulado de borracha com o ligante betuminoso base previamente aquecido, alterando as características do mesmo.

Símbolos, Siglas e Abreviaturas

ω	frequência angular.
σ	tensão.
ε	extensão.
φ	ângulo de fase.
λ	comprimento de onda.
ν	coeficiente de Poisson.
$\rho_{b,dim}$	massa volúmica do provete.
ρ_m	massa volúmica máxima teórica da mistura betuminosa.
ρ_t	massa volúmica da mistura betuminosa.
τ_y	tensão de cedência.
A	amplitude.
E^*	módulo complexo.
E_1	componente real.
E_2	componente imaginária.
L_{eq}	nível sonoro contínuo equivalente.
L_{max}	nível de ruído máximo.
L_{min}	nível de ruído mínimo.
L_p	nível de pressão sonora.
M_a	massa de agregado seco.
M_b	massa de betume.
M_t	massa total.
S_m	módulo de rigidez.
T_{ref}	temperatura de referência.
V_b	volume de betume.
V_m	volume de vazios.

SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

V_t	volume total.
V_v	volume de vazios.
a_T	deslocamento horizontal.
f	frequência.
$\log(f_r)$	frequência equivalente.
n	porosidade.
p_a	percentagem de agregado.
p_b	percentagem de betume.
t	tempo.
t_b	teor em betume.
v_a	percentagem volumétrica do agregado.
v_b	percentagem volumétrica do betume.
$ E^* $	valor absoluto do módulo complexo.
BBA	Betume de alta viscosidade modificado com borracha.
BBB	Betume de baixa viscosidade modificado com borracha.
BBM	Betume de média viscosidade modificado com borracha.
BMB	Betume modificado com borracha.
CEN	Comité Europeu de Normalização.
CETO	Caderno de Encargos Tipo Obra.
DEC	Departamento de Engenharia Civil.
ELT	End-of-Life Tyres.
EN	Norma Europeia (<i>European Norm</i>).
EP	Estradas de Portugal.
FCT-UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
IP	Infraestruturas de Portugal.
JAE	Junta Autónoma de Estradas.
LabCON	Laboratório de Construção.
LabEST	Laboratório de Estruturas.
LabGEO	Laboratório de Geotecnia.

LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
MACOPAV	Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional.
MBQ	Misturas betuminosas a quente.
MBT	Misturas betuminosas temperadas.
NHL5	Fíler de cal hidráulica.
NP	Norma Portuguesa.
PERSU	Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos.
PMB	Betume modificado com polímeros (<i>Polymer Modified Bitumen</i>).
RCD	Resíduos de Construção e Demolição.
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos.
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno (<i>Styrene Butadiene Styrene</i>).
SGPU	Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados.
TTSP	Princípio da Sobreposição Tempo-Temperatura (<i>Time Temperature Superposition Principle</i>).
UE	União Europeia.
UV	Ultra-violeta.
VFB	Percentagem de Vazios preenchidos com Betume (<i>Voids Filled with Bitumen</i>).
VMA	Volume de Vazios na Mistura de Agregados (<i>Voids in Mineral Aggregate</i>).

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e enquadramento do tema

A rede rodoviária nacional é um elemento essencial no desenvolvimento sócio-económico do país, pois representa a principal infraestrutura de mobilidade de pessoas e mercadorias. Tal facto deve-se à pequena dimensão do país e à existência de grandes corredores rodoviários que ligam os portos marítimos ao resto da Europa, o que leva a que as mercadorias sejam principalmente transportadas por meio rodoviário.

Em Portugal, a rede rodoviária é constituída na sua maioria por pavimentos flexíveis, do tipo betuminoso, sendo que muitos deles já se encontram em período de fim de vida. Como tal é necessário, realizar a sua reabilitação, procedendo-se muitas vezes à substituição das camadas betuminosas.

Ao longo do tempo, as solicitações a que estes pavimentos têm sido sujeitos tem registado um crescimento, devido ao aumento de volume de tráfego e à agressividade do mesmo, para além disso regista-se ainda a necessidade de uma maior qualidade dos pavimentos, no que respeita à segurança e à comodidade.

Assim, o objetivo de estudar o comportamento reológico e mecânico dos materiais que fazem parte da composição dos pavimentos é prolongar a sua vida útil e assegurar um melhor conforto e segurança de circulação para os utentes.[1]

Com a crescente preocupação ao nível da sustentabilidade ambiental, têm vindo a ser desenvolvidas várias técnicas na construção civil, de incorporação de materiais provenientes de reciclagem de resíduos industriais e de construção, em vários tipos de construções. No caso da reabilitação de pavimentos, uma das técnicas mais recentes em Portugal é a utilização de borracha, proveniente da reciclagem de pneus em fim de vida, na modificação dos betumes puros para utilização em misturas betuminosas.

Várias entidades internacionais começaram a desenvolver novas formas de reabilitação de pavimentos, na década de 60, com a introdução de borracha reciclada de pneus em fim de vida nas misturas betuminosas. Ao longo dos anos confirmaram-se vários resultados positivos, quanto à utilização da borracha nas misturas betuminosas para camadas de desgaste. A reciclagem dos pneus em fim de vida é importante visto resolver o problema de destino deste resíduo, que muitas vezes é depositado em locais proibidos, resultando em risco de incêndio ou de contaminação do solo.

Ainda na ótica da sustentabilidade ambiental, recentemente, devido a Portugal ser o maior produtor mundial de cortiça, tem-se vindo a apostar em estudos para sua utilização em diversas áreas. Na construção civil já se utilizam os granulados e pó de cortiça na execução de isolamentos vibráticos e acústicos, em enchimentos de vários tipos de construções, e na preparação de argamassas e betões aligeirados. Ao nível dos pavimentos rodoviários, a incorporação deste material ainda não foi praticamente analisada, existindo ainda pouca informação sobre esta aplicação.[2]

A incorporação deste tipo de materiais nas misturas betuminosas além de ser benéfica do ponto de vista ambiental, pois utiliza-se menor quantidade de material rochoso na formulação da mistura e diminuí-se a quantidade de deposição de resíduos, também é benéfica a nível económico, pois o transporte deste tipo de materiais, por serem muito leves torna-se mais acessível.

Além disso, os materiais selecionados para substituição parcial do agregado mineral, a borracha e a cortiça, foram escolhidos devido às suas propriedades elásticas e acústicas, o que pode melhorar o desempenho das misturas betuminosas em termos de resposta às aplicações de carga e atenuar o ruído gerado pelo tráfego rodoviário, reduzindo o ruído da interação pneu-pavimento.

1.2 Objetivos e metodologia do estudo

A presente dissertação tem como objetivo estudar influência da substituição parcial do agregado mineral por materiais com características elásticas e anti-vibráticas, como a borracha e a cortiça, no comportamento mecânico, reológico e acústico das argamassas betuminosas. Este estudo sucede aos estudos elaborados por Guerra [3] e Moreno [4], no qual foram caracterizados mastiques betuminosos com diferentes fileres e diferentes tipos e teores em betume.

Para a concretização dos objetivos do presente trabalho foram desenvolvidas as seguintes ações, tendo em vista conhecer a influência da substituição parcial do agregado pelos granulados de borracha ou cortiça no comportamento da argamassa betuminosa e consequentemente da mistura betuminosa.

1. Caracterização laboratorial dos materiais constituintes das argamassas betuminosas, com vista à obtenção das propriedades físicas (análise granulométrica, massa volúmica, etc...);

2. Formulação das misturas betuminosas;
3. Fabrico dos provetes das diferentes argamassas betuminosas;
4. Caracterização das diferentes argamassas betuminosas, resultantes da mistura do betume com as várias combinações de agregados e suas substituições;
5. Análise comparativa dos resultados da caracterização dos diferentes tipos de argamassas estudadas.

Os materiais escolhidos para a constituição das argamassas betuminosas foram:

- **Ligante:** Betume modificado com polímeros do tipo Estireno-Butadieno-Estireno (*Styrene Butadiene Styrene*) (SBS) - Betume modificado com polímeros (*Polymer Modified Bitumen*) (PMB) 45/80-65;
- **Agregado fino e fíler:** Pó de pedra, fíler calcário recuperado e Fíler de cal hidráulica (NHL5);
- **Substitutos do agregado fino:** Granulado de borracha e granulado de cortiça.

Na formulação das argamassas betuminosas utilizaram-se: um tipo de betume com três percentagens de betume distintas, três tipos de agregados finos (pó de pedra; pó de pedra + granulado de borracha; pó de pedra + granulado de cortiça) e dois tipos de fíler diferentes. No presente trabalho foram caracterizados 18 argamassas betuminosas diferentes, estando identificadas ao longo do presente estudo.

Foram fabricados 126 provetes de argamassas betuminosas (7 de cada tipo de argamassa) para realização de ensaios mecânicos monotónicos e ensaios mecânicos cíclicos (com repetida aplicação de uma variação de comprimento (compressão/tração) a uma dada velocidade e temperatura).

Posteriormente à análise comparativa dos resultados obtidos para os diferentes provetes, obtiveram-se conclusões sobre a influência da substituição parcial do agregado por granulados de borracha e cortiça no comportamento das argamassas betuminosas.

1.3 Organização do estudo

O presente estudo está organizado em 5 capítulos.

No capítulo 1 são apresentados a motivação e enquadramento do tema, os objetivos, a metodologia do estudo e a organização do mesmo.

O capítulo 2 é dedicado a uma breve revisão da literatura sobre as misturas betuminosas, as argamassas betuminosas e os seus materiais constituintes, a incorporação de outros materiais na constituição de misturas betuminosas, o comportamento mecânico e reológico e o comportamento acústico.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

No capítulo 3 é detalhado o programa experimental desenvolvido neste estudo. Onde é descrita a caracterização de todos os materiais utilizados, a metodologia do processo de fabrico dos provetes e as condições de ensaio.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados de caracterização das argamassas betuminosas com granulados de borracha e cortiça.

Por fim, o capítulo 5 inclui as conclusões relativas ao estudo desenvolvido e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão da literatura

2.1 Considerações gerais

Um pavimento rodoviário deve garantir a comodidade e segurança dos seus ocupantes e dos que se encontram próximo da via, sendo estas garantias apenas praticáveis dentro do período de vida útil do pavimento que varia com a agressividade do tráfego e condições climáticas a que se encontra sujeito.

Os pavimentos rodoviários são constituídos por um conjunto de diferentes camadas, constituídas por diferentes materiais, apoiadas numa fundação, formada pelo terreno natural, que no caso de este não apresentar as características desejadas, pode ser melhorado superficialmente, formando o leito do pavimento. Esta camada tem como funções melhorar a geometria da plataforma e aumentar a capacidade de suporte da fundação [1]. Na Figura 2.1 pode-se observar o esquema da constituição de um pavimento tipo:

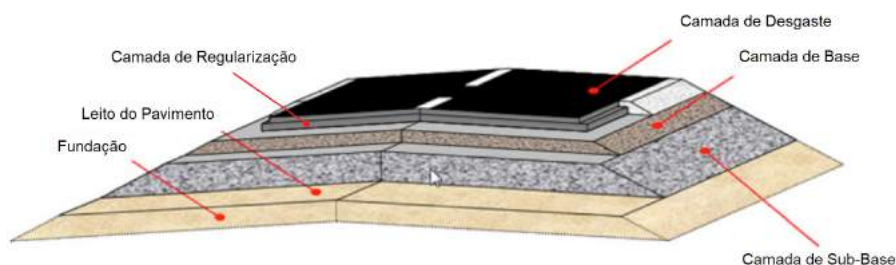


Figura 2.1: Constituição de um pavimento tipo (adaptado de EAPA [5]).

A fundação do pavimento é constituída pelo produto final das terraplenagens, e tem como função criar uma plataforma com uma superfície regular e desempenada, apresentar capacidade de suporte a curto e longo prazo, e permitir a circulação do equipamento para a construção do pavimento.

As camadas dum pavimento rodoviário podem distinguir-se pelas funções que desempenham: camada superficial (designada por camada de desgaste) e o corpo de pavimento, formado pelas restantes camadas.

A camada de desgaste é a camada superior da estrutura, sobre a qual são exercidas as agressões do tráfego e do clima. As principais funções desta camada são de assegurar as características funcionais do pavimento, contribuindo para a segurança, conforto e economia da circulação automóvel, bem como para o aumento da sua durabilidade, nomeadamente quando esta apresenta funções de impermeabilização do pavimento. O corpo do pavimento do qual fazem parte a camada de base e sub-base é o principal responsável pela capacidade de suporte das cargas induzidas pelo tráfego, qualidade estrutural. As camadas que constituem o corpo do pavimento podem ser estabilizadas com ligantes betuminosos ou hidráulicos ou constituídas por materiais granulares não ligados. Cada uma dessas camadas tem também a função de suportar a camada sobrejacente. No caso de pavimentos compostos por camadas betuminosas, a camada subjacente à camada de desgaste denomina-se por camada de regularização, sendo que imediatamente abaixo desta, assenta a camada de base e sobre a fundação assenta a última camada do corpo do pavimento – a camada de sub-base, geralmente constituída por materiais granulares apenas estabilizados por compactação e solos tratados com cimento

Dentro dos pavimentos rodoviários é comum considerarem-se três tipos de pavimentos, em função das camadas e materiais utilizados, apresentando diferentes comportamentos quando solicitados pelas cargas do tráfego e pelas acções climáticas a que se encontram sujeitos:

- Pavimentos flexíveis;
- Pavimentos rígidos;
- Pavimentos semi-rígidos.

Apesar dos pavimentos se dividirem em três tipos, estes apresentam algumas semelhanças quanto à sua constituição, no entanto no presente trabalho apenas serão focados os pavimentos flexíveis. Este tipo de pavimento é composto por camadas (Figura 2.2), variando estas com a intensidade do tráfego a que é sujeito. As camadas superiores são formadas por misturas betuminosas, sendo as camadas inferiores constituídas por material granular.

As camadas superiores dos pavimentos, realizadas com misturas betuminosas, são formadas por: uma camada de desgaste, uma camada de regularização e uma camada de base. Já as camadas inferiores, realizadas com materiais granulares não ligados, são formadas por: uma base granular e uma sub-base granular.

Para o estudo prévio de dimensionamento de um pavimento é utilizado em Portugal o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV), da então Junta Autónoma de Estradas (JAE) (agora designada de Infraestruturas de Portugal

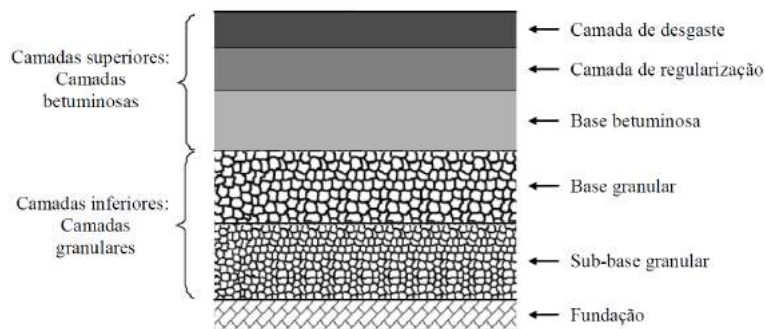


Figura 2.2: Constituição tipo dum pavimento rodoviário flexível [6].

(IP)), de 1995, onde são previstos os diversos tipos de pavimentos existentes [7]. Os pavimentos são concebidos para uma vida útil de 50 anos, considerando que, após 20 anos em serviço, tenham uma substituição periódica de 2,5 cm a 10 cm da superfície. O período de substituição da camada superficial fica condicionado pelos níveis de desenvolvimento de rodeiras não estruturais e de fendilhamento com origem na superfície. Atualmente, aos requisitos de um pavimento flexível deve-se ainda adicionar o requisito de ter uma superfície de baixo ruído.

Assim, as camadas com características de desgaste de um pavimento flexível tradicional ou de baixo ruído podem ser realizadas em argamassa betuminosa, em betão betuminoso de borracha, em betão betuminoso drenante e em micro-betão rugoso. Ou ainda, poder-se-à fazer a aplicação de tratamentos superficiais, quando se pretender dotar um pavimento de determinada qualidade quanto às características superficiais.

2.2 Materiais

2.2.1 Misturas betuminosas

Na rede rodoviária nacional, a grande maioria dos pavimentos são do tipo flexível, o que significa que para as camadas superiores são utilizadas misturas betuminosas. As misturas betuminosas, normalmente, são classificadas em função da temperatura e técnica de produção [6]. Estas podem ser divididas em quatro tipos:

- Misturas betuminosas a quente (MBQ);
- Misturas betuminosas temperadas (MBT);
- Misturas betuminosas semi-temperadas;
- Misturas betuminosas a frio.

Dos quatro tipos de misturas betuminosas referidas acima, apenas as misturas betuminosas a quente interessam ao presente estudo. Estas misturas, designadas habitualmente por misturas betuminosas tradicionais ou convencionais, são normalmente produzidas

a temperaturas entre os 150°C e os 180°C, em função do tipo de ligante utilizado na mistura. As misturas betuminosas a quente tradicionais são uma mistura de um ligante (ocupando entre 10% a 15% do volume total da mistura) e de uma mistura de agregados (ocupando entre 75% a 85% do volume total da mistura), fabricada de modo a que todas as partículas de agregado sejam revestidas por uma película de ligante. O seu processo de fabrico implica o aquecimento do ligante e dos agregados, a sua mistura e a sua aplicação em obra, que é realizada a temperaturas significativamente superiores à temperatura ambiente (superiores a 140°C). Estas misturas são produzidas em central onde todos os constituintes são aquecidos em separado e posteriormente misturados num rápido processo de envolvimento de betume e agregados.

Consoante a função estrutural que desempenham nas diferentes camadas dos pavimentos, existem diversos tipos de misturas betuminosas que se podem aplicar. De acordo com a Norma Portuguesa (NP) Norma Europeia (*European Norm*) (EN) 13108-1:2011 [8] que define os requisitos para as misturas betuminosas fabricadas a quente e com o Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) das Estradas de Portugal (EP) [9] as misturas betuminosas podem ser designadas conforme indicado na Tabela 2.1.

As características exigidas às misturas betuminosas variam em função da camada de pavimento a construir, no entanto todas elas devem de garantir estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade [10].

De modo a garantir todas as necessidades para que se possa fabricar uma camada ligada de um pavimento flexível e que esta garanta estabilidade às solicitações que lhe são impostas, terá de ser realizado um estudo prévio sobre os materiais que compõe uma mistura betuminosa a quente. O comportamento de uma mistura betuminosa, para além de ser influenciado pelas características dos seus componentes é também influenciado pela sua composição volumétrica.

Na Figura 2.3 apresenta-se um esquema da composição de uma mistura betuminosa compactada, que contém três componentes: agregados, betume e ar.

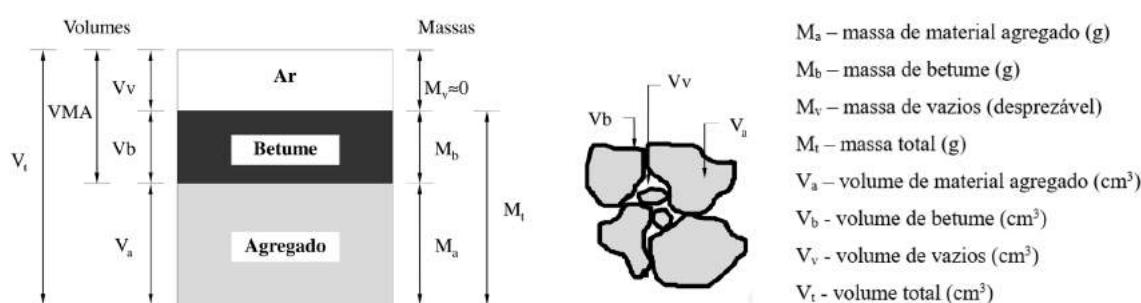


Figura 2.3: Composição volumétrica de uma mistura betuminosa compactada [1].

Ao analisar a Figura 2.3 pode observar-se que: (i) Após a compactação a mistura betuminosa continua a ter um certo volume de vazios que é ocupado por ar e (ii) O Volume de Vazios na Mistura de Agregados (*Voids in Mineral Aggregate*) (VMA) é dado

Tabela 2.1: Designação das misturas betuminosas a quente [9].

Camada	Designação anterior	Designação actual
Base	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso	AC 14 bin ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 bin ligante (AB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
Regularização	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 14 reg ligante (BB)
	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
Desgaste	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBr)

Legenda:
AC – designação do produto, cujo termo em inglês é “Asphalt Concrete”;
ligante – classe a definir ; base – referente à camada de base, cujo termo em inglês é similar “base course”;
bin – referente à camada de ligação, cujo termo em inglês é “binder course”, de espessura constante;
reg – referente à camada de regularização, cujo termo em inglês é “regulating course”, de espessura variável;
surf – referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é “surface course”.

pelo conjunto do volume de vazios (V_v) e volume de betume (V_b):

$$VMA = V_b + V_v \quad (2.1)$$

Existem ainda outras características importantes das misturas que podem ser determinadas com base nas grandezas elementares mostradas na Figura 2.3. Essas grandezas são as seguintes:

- Massa volúmica da mistura betuminosa:

A massa volúmica da mistura betuminosa (ρ_t) pode ser calculada através da massa total (M_t) e do volume total (V_t):

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} \quad (2.2)$$

- Teor em betume:

O teor em betume (t_b) relaciona a massa de betume (M_b) com a massa de agregado seco (M_a) usadas no fabrico de determinada quantidade de mistura betuminosa:

$$t_b = 100 \times \frac{M_b}{M_a} \quad (2.3)$$

- Percentagens em massa:

A percentagem de betume (p_b) é a relação entre a massa de betume usada no fabrico de determinada quantidade de mistura e a massa total da mistura:

$$p_b = 100 \times \frac{M_b}{M_t} \quad (2.4)$$

A percentagem de agregado (p_a) é dada por:

$$p_a = 100 \times \frac{M_a}{M_t} \quad (2.5)$$

- Percentagens em volume:

A percentagem volumétrica do betume (v_b) ou percentagem volumétrica do agregado (v_a) são dadas pelas Equações 2.6 e 2.7, respectivamente. Já no caso dos vazios (ar), a essa relação dá-se o nome de porosidade (n), dada pela Equação 2.8.

$$v_b = 100 \times \frac{V_b}{V_t} \quad (2.6)$$

$$v_a = 100 \times \frac{V_a}{V_t} \quad (2.7)$$

$$n = 100 \times \frac{V_v}{V_t} \quad (2.8)$$

2.2.2 Argamassas betuminosas

A definição clássica de argamassa betuminosa é que esta é uma mistura betuminosa a quente que habitualmente se utiliza em camadas de regularização ou camadas de desgaste, composta por uma mistura de agregados finos e filer, com um ligante betuminoso modificado [1]. Os agregados utilizados neste tipo de mistura estão compreendidos entre 0/4 mm [9].

Contudo, neste estudo é considerado que uma argamassa betuminosa, pode ser uma parte integrante duma mistura betuminosa, tal como o mastique betuminoso. Visto que, uma argamassa também pode ter a função de envolver e manter ligados os agregados mais grossos da mistura, do mesmo modo que um mastique e com comportamento mecânico semelhante (viscoelástico).

Neste contexto, para uma melhor definição de argamassa betuminosa, é necessária a caracterização de todos os seus materiais constituintes. Deste modo faz-se em seguida a caracterização do betume, dos agregados e fíler, bem como de outros materiais que se podem incorporar nas misturas betuminosas.

2.2.2.1 Betume

O betume é o ligante mais utilizado na pavimentação rodoviária. O betume desempenha um papel fundamental nas misturas betuminosas pois garante a ligação entre os agregados, proporcionando coesão e estabilidade às misturas [11]. Este cria ligações tenazes e flexíveis às misturas. Isto deve-se à resposta viscoelástica que este tipo de materiais apresenta, que varia com a velocidade de aplicação das cargas, o que permite o ligante comportar-se como um material flexível, com baixo módulo de rigidez e muito deformável, adaptando-se às deformações e assentamentos das camadas do pavimento e da fundação, sem que ocorra fendilhamento. Tem ainda um comportamento estável e tenaz, com elevado módulo de elástico, quando é submetido às ações de tráfego [6].

O ligante betuminoso constitui cerca de 10% a 15% do volume total da misturas betuminosa. Segundo a NP EN 12591 [12], existem os seguintes tipos de ligante:

- Betumes puros;
- Emulsões betuminosas;
- Betumes fluidificados/fluxados;
- Betumes modificados.

Os betumes puros são obtidos a partir da destilação direta ou fraccionada do petróleo bruto [13]. O betume é um produto negro que apresenta boas qualidades adesivas. A sua consistência é variável com a temperatura, ficando mais fluído quando é aquecido (50°C a 60°C) e endurecendo quando arrefece, apresentando comportamento viscoso [1].

A classificação destes betumes baseia-se no valor obtido no ensaio de penetração a 25°C, que avalia indiretamente a viscosidade ou dureza do betume a determinada temperatura. Os limites de penetração dum betume puro variam entre 10/20 (betumes muito duros) até 180/200 (betumes muito fluidos). Por exemplo, um betume puro 50/70 indica que o mínimo de penetração, numa amostra de 100g de betume a 25°C, é de 0,50 mm e o máximo de 0,70 mm [1].

Em função do tipo de ligante, este tem de ser aquecido a temperaturas na ordem dos 150°C a 190°C para se conseguir um adequado envolvimento dos agregados pelo mesmo.

A composição química do betume é extremamente complexa, mas é possível ser separada em dois principais grupos químicos: os asfaltenos e os maltenos. Os maltenos podem ainda ser divididos em três subgrupos: os saturados, os aromáticos e as resinas. O betume é tradicionalmente considerado como um sistema coloidal, consistindo numa dispersão de micelas, os asfaltenos, num meio dispersante, os maltenos [14].

As emulsões betuminosas resultam da dispersão do betume em água, sendo que esta se mantém estável através de um emulsionante. Este tem como função envolver os glóbulos de betume para reduzir a tensão superficial entre estes e a água. Quando a emulsão é espalhada ocorre a sua rotura, separando-se a água do betume, voltando este a reunir-se novamente e recuperando assim as suas características. Este tipo de ligante serve essencialmente para o fabrico de misturas betuminosas a frio.

O betume fluidificado resulta da adição de um fluidificante ao betume, constituído por frações mais ou menos voláteis da destilação do petróleo. A introdução do fluidificante serve essencialmente para reduzir temporariamente a viscosidade do betume, permitindo assim que se possa produzir e espalhar as misturas betuminosas a temperaturas muito inferiores às que seriam necessárias no caso de se utilizar um betume puro. Os fluidificantes evaporam aquando do espalhamento da mistura, o que leva a que o betume recupere as suas características originais. No entanto ao evaporar-se este liberta gases tóxicos para a atmosfera, o que leva a que seja uma técnica pouco utilizada atualmente.

Os betumes modificados podem ser obtidos pela mistura de betume puro com aditivos. Os principais grupos de aditivos utilizados são: elastómeros, plastómeros, enxofre, borrachas, fibras orgânicas e inorgânicas, resinas e endurecedores. Estes aditivos são adicionados consoante o desempenho que se pretende da mistura betuminosa em serviço [6].

A caracterização dos betumes puros pode ser feita através de vários ensaios, sendo a penetração do betume a 25°C e a determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola dos mais importantes, e por isso far-se-á, de seguida, uma breve descrição de ambos.

Ensaio de penetração a 25°C

O ensaio de penetração permite determinar de forma indirecta a viscosidade do betume. Neste ensaio, mede-se a profundidade, em décimos de milímetro, de penetração de uma agulha de 100 gramas, numa amostra de betume, durante 5 segundos, a 25°C, (Figura 2.4). Em cada ensaio fazem-se, geralmente, três medições da penetração, considerando-se a média dos três valores obtidos [1].

Ensaio de determinação da temperatura de amolecimento

O ensaio de determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola permite classificar o comportamento do betume a altas temperaturas. Consiste na determinação da temperatura de amolecimento, necessária para que um provete de betume submetido a um aquecimento progressivo (5°C/minuto) e ao peso de uma esfera de aço atinja uma consistência que leve ao seu escoamento através do anel metálico, até uma deformação especificada (Figura 2.5)[1].

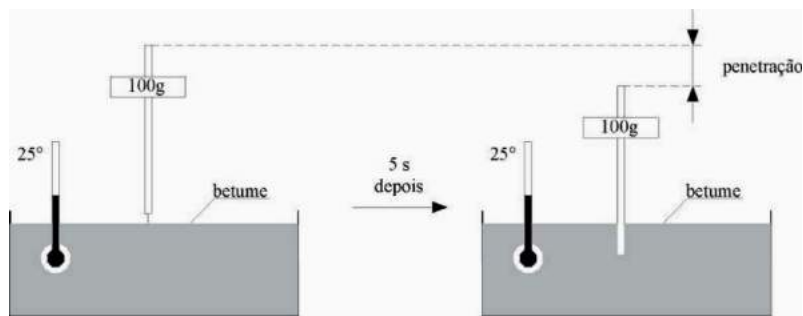


Figura 2.4: Ensaio de penetração a 25°C [1].

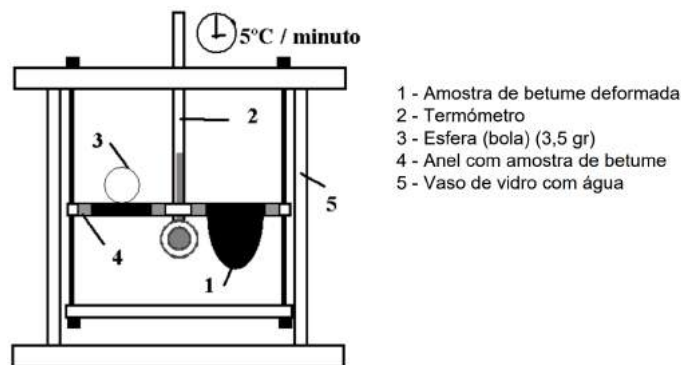


Figura 2.5: Ensaio de determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola [1].

2.2.2.2 Agregados

Segundo o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), o agregado é definido como o material granular de partículas ligadas ou destinadas a ser ligadas por aglutinante, em materiais como betões, argamassas ou macadames [15]. A utilização de agregados na execução de pavimentos tem como objetivo a formação de um esqueleto pétreo que resista à ação do tráfego, sendo esta resistência devida ao encaixe dos grãos entre si. O material agregado que constitui as misturas betuminosas é geralmente da ordem de 90% a 95% do seu peso, correspondendo a 75% a 85% do seu volume [1].

Estes materiais são caracterizados quanto à sua origem geológica, à sua composição química e à forma como são obtidos. Quanto ao seu modo de obtenção podem classificar-se em: *naturais* (rolados de origem aluvionar), *processados* (britados) e *sintéticos ou artificiais* (por exemplo, resíduos de demolição de edifícios). Os agregados naturais podem ainda apresentar diferentes origens geológicas: *rochas sedimentares*, *rochas ígneas* ou *rochas metamórficas*. Outra forma alternativa de classificação dos agregados é quanto às suas dimensões. Encontra-se definido na norma NP EN 13043 [16] que os agregados finos são todos os agregados com dimensão inferior a 2 mm e todo o agregado com dimensão superior a 2 mm é considerado agregado grosso.

Quando se utiliza material granular no fabrico de misturas betuminosas têm de ser verificadas algumas características fundamentais [1]:

- granulometria - deve ser a adequada de forma a obter-se um esqueleto que distribua convenientemente as cargas em profundidade;
- boa resistência - utilização de materiais duros, resistentes ao choque, ao atrito entre as suas próprias partículas e ao desgaste produzido pelo tráfego na superfície do pavimento;
- forma das partículas - deverá ser aproximadamente cúbica, não sendo aconselhável a utilização de partículas lamelares ou alongadas, pois são mais frágeis;
- limpeza - os agregados deverão estar limpos, não possuindo impurezas que podem reduzir o atrito entre os grãos ou dificultar o seu envolvimento pelo ligante;
- boa adesividade - quanto melhor for a afinidade química do agregado com o betume, mais difícil será separar este do agregado.

Fíler

Existe alguma divergência de opiniões no que toca à definição de fíler. Referindo Velho et al. [17] o fíler é todo o agregado que tem uma curva granulométrica que apresenta 100% de agregados passados no peneiro com malha de 0,250 mm, 85% ou mais que passa no peneiro com malha 0,125 mm e ainda mais de 70% passe no peneiro com malha de 0,063 mm.

O fíler é definido como sendo um material com uma matriz de partículas minerais de outros agregados grossos e/ou finos (exemplo pó de calcário, cal hidratada, cimento) que pode melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e de resistência à ação da água, desde que obedecidos os limites definidos para a granulometria e a plasticidade [18].

O material fíler também é definido como um pó mineral cujas partículas têm maioritariamente uma dimensão inferior a 75 μm [19].

Segundo a norma NP EN 13043 [16], fíler é o agregado cuja maior parte passa no peneiro com malha 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, no entanto nas normas de determinação das propriedades do fíler como a NP EN 933-10 [20], NP EN 1097-4 [21] e NP EN 1097-7 [22] é considerada para ensaio a fração que passa no peneiro com malha 0,125 mm. Assim para este trabalho experimental é considerado como fíler todo o material que passa no peneiro com malha de 0,125 mm, sendo que a sua maioria passa no peneiro com malha de 0,063 mm.

O fíler confere à mistura betuminosa capacidades de compactidade e de impermeabilização. As características físicas e químicas deste material influenciam a mistura betuminosa.

Este material selecionado pode ser natural, artificial, de origem inorgânica e mineral. Podendo ser agrupado em dois grandes grupos:

- Fíler de recuperação ou recuperado;
- Fíler comercial.

Quanto ao primeiro tipo de fíler trata-se do material que é obtido através das frações mais finas dos agregados, em geral provenientes de britagem, podendo ser separados das frações mais grossas dos agregados através de extratores de poeiras.

O segundo grupo engloba materiais comerciais, sendo estes por exemplo, pó de calcário, cimento ou cal hidráulica, devidamente apagada, que devem obedecer às exigências granulométricas impostas pelos Cadernos de Encargos.[23]

2.2.3 Incorporação de outros materiais

A Diretiva Quadro sobre Resíduos da União Europeia (UE) [24] estabelece a necessidade de promover a reutilização e a reciclagem em alternativa à deposição em aterro e à incineração dos resíduos. A reciclagem de resíduos pode desempenhar um papel importante na construção e manutenção da rede viária europeia, trazendo benefícios tanto ambientais como económicos.

A incorporação de materiais reciclados, nos pavimentos rodoviários, pode ser feita por duas formas distintas: inseridos no betume, sendo agentes modificadores do mesmo ou como substitutos parciais do agregado, reduzindo a quantidade necessária de agregados extraídos (tradicionais).

As misturas betuminosas recuperadas, Resíduos de Construção e Demolição (RCD), escórias e resíduos siderúrgicos, resíduos plásticos, Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e borracha de pneus em fim de vida útil são alguns dos resíduos e subprodutos utilizados como materiais de pavimentação rodoviária.

As misturas betuminosas recuperadas, constituídas por agregados e betume, são obtidas através da fresagem de pavimentos. Este material pode ser reutilizado de duas formas: como agregado nas camadas de leito de pavimento e camada de sub-base ou inseridas em novas misturas betuminosas, mantendo a sua função original, podendo ser utilizadas várias técnicas de reciclagem aplicadas *in situ* ou em central. A técnica de reciclagem a quente em central, constitui uma das soluções mais adotadas na Europa, onde atualmente representa mais de 75% do total de misturas recicladas [25].

Os RCDs apresentam uma grande variedade de soluções consoante o seu tipo seja: betão, tijolo, material cerâmico ou vidro. Dos materiais anteriores, o mais apropriado para a pavimentação rodoviária é o betão britado. Este pode ser aplicado como agregado grosso nas camadas de aterro e leito do pavimento, como agregados reciclados em camadas não ligadas e/ou em misturas betuminosas a quente [26].

Quanto às escórias e resíduos siderúrgicos, existem alguns estudos que demonstram as capacidades das escórias de aciaria como agregado de misturas betuminosas. Pode mencionar-se alguns aspectos técnicos como: maior peso próprio, maior durabilidade, melhor resistência ao congelamento e degelo, dureza, melhor resistência à derrapagem,

maior resistência ao desgaste, possibilidade de execução de camadas mais finas e maior capacidade de suportar valores elevados de cargas [27]. Em Portugal utilizou-se este tipo de agregado nas instalações da Siderurgia Nacional, no Seixal [28].

Os resíduos plásticos são um dos materiais mais recentes estudados no âmbito das misturas betuminosas. Este tipo de material surge normalmente associado à modificação do betume. De acordo com alguns estudos internacionais [29, 30] e demonstrado no trabalho de Costa e J. Silva H. a. O. [31] a modificação de betumes com polímeros ou resíduos plásticos tem permitido obter misturas betuminosas com um melhor desempenho, nomeadamente uma maior resistência à deformação permanente e uma maior rigidez a temperaturas elevadas assim como uma menor suscetibilidade à variação da temperatura. Estes betumes com incorporação de resíduos plásticos têm propriedades semelhantes e em alguns casos melhores que os betumes modificados comerciais.

Em Portugal, têm vindo a ser feitos esforços para melhorar e regular o seguimento dado aos RSUs desde 1997, tendo sido elaborado um plano onde é definida a estratégia e as metas no âmbito da gestão integrada dos RSUs. Este plano tem o nome de Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU) e atualmente encontra-se em vigor a sua terceira versão, com metas definidas até ao ano 2020. A valorização dos RSUs é feita através de incineração, originando dois tipos de produtos: cinzas de fundo e cinzas volantes. As cinzas de fundo, ou escórias, são resultado da incineração da parte inorgânica dos RSUs. Este material utiliza-se na substituição do agregado em camadas de base. Outro produto resultante da incineração são as cinzas volantes, que correspondem às poeiras contidas no fumo que ficam retidas nos filtros das chaminés da incineradora. Este material quando estabilizado com cal pode ser utilizado, como agregado, nas camadas de sub-base de pavimentos flexíveis [25].

Para este estudo, dos resíduos e subprodutos acima referidos, selecionou-se a borracha de pneus em fim de vida útil para incorporação nas argamassas betuminosas. Além deste material, também foi selecionada a cortiça por ter, também, características anti-vibráticas. Estes dois materiais, serão detalhados em seguida.

2.2.3.1 Borracha de pneus em fim de vida útil

Em Portugal anualmente são gerados cerca de 80.000 toneladas de pneus em fim de vida útil de diferentes categorias, desde pneus que equipam bicicletas até pneus de grande porte utilizados em máquinas de engenharia civil [32]. Em inglês estes têm a designação de End-of-Life Tyres (ELT).

Ao longo do tempo, em Portugal, o crescimento das vias de circulação rodoviária fez com que a procura de veículos tenha aumentado e como consequência cresceu o número de pneus em fim de vida útil e conseqüentemente o problema do destino final deste resíduo. Por este resíduo ser perigoso a nível ambiental quando depositado em aterro, devido à sua toxicidade, foram criadas formas de reaproveitamento deste recurso como material de uso secundário. Este reaproveitamento é feito através de processos de

recauchutagem, valorização energética e reciclagem.

A recauchutagem é um processo industrial através do qual ocorre o acondicionamento de um pneu usado com o objectivo de prolongar a vida útil do mesmo. O processo de valorização energética consiste na utilização dos pneus em fim de vida útil, como combustível no fabrico de cimento ou na produção de eletricidade e vapor em unidades de cogeração devido ao seu elevado poder calorífico. A reciclagem do resíduo pneu é realizada também por processos industriais, obtendo-se como produtos finais os vários elementos constitutivos e individualizados dos pneus: borracha (na forma de granulado e pó), aço (em pequenos troços) e têxteis. [32]

Atualmente, o crescimento sustentável duma sociedade passa pela reutilização e pela reciclagem, por isso, em 2003 foi criado o Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados (SGPU). Administrado pela Valorpneu, o SGPU gere o armazenamento, transporte e encaminhamento para destino final de valorização dos pneus em fim de vida útil. [32] Em Portugal, as empresas responsáveis pela reciclagem de grande parte dos pneus em fim de vida útil são a Biosafe e Recipneu.

Produção de granulados de borracha

O processamento de pneus em fim de vida é levado a cabo em várias fases durante as quais a borracha é separada de outros materiais (fibras têxteis e metais), reduzida mecanicamente na forma granular e, finalmente dividida em frações de tamanho das partículas. Quando ocorrem operações de moagem, de corte e de abrasão sem condicionamento específico da temperatura, o processo é conhecido como *processo mecânico à temperatura ambiente*. Em algumas fábricas, no entanto, os pneus são sujeitos a um arrefecimento criogénico de forma a ultrapassar a temperatura de transição vítrea de todos os polímeros constituintes da borracha (cerca de 160°C negativos) por sistemas de refrigeração usando azoto líquido e o processo resultante é referido como *processo criogénico* [33].

De uma forma geral e independentemente do fabricante, os pneus são constituídos essencialmente por borracha natural e borracha sintética, negro de carbono e sílica, antioxidantes, material têxtil e metálico e outros componentes necessários para induzir a vulcanização da borracha [34].

No que diz respeito à origem dos pneus, é bem conhecido que os fabricantes de pneumáticos empregam formulações de borracha diferentes e que os pneus dos pesados geralmente têm um teor de borracha natural superior aos pneus dos ligeiros [33], além de não conterem têxteis. Pelas razões mencionadas, estes são os mais recomendados para a utilização no fabrico de misturas betuminosas.[35]

Características do granulado de borracha

Dependendo da tecnologia de fragmentação e da origem dos pneus, o granulado de borracha pode ter diferentes características físicas e químicas. Em particular, as partículas

resultantes do *processo mecânico à temperatura ambiente* que geralmente têm forma irregular, superfície rugosa e com maior superfície específica (Figura 2.6 (a)). Em comparação, os granulados de borracha produzidos criogenicamente são partículas com morfologia cubóide, com faces lisas, praticamente sem poros e com aspeto brilhante (Figura 2.6 (b)) [33].

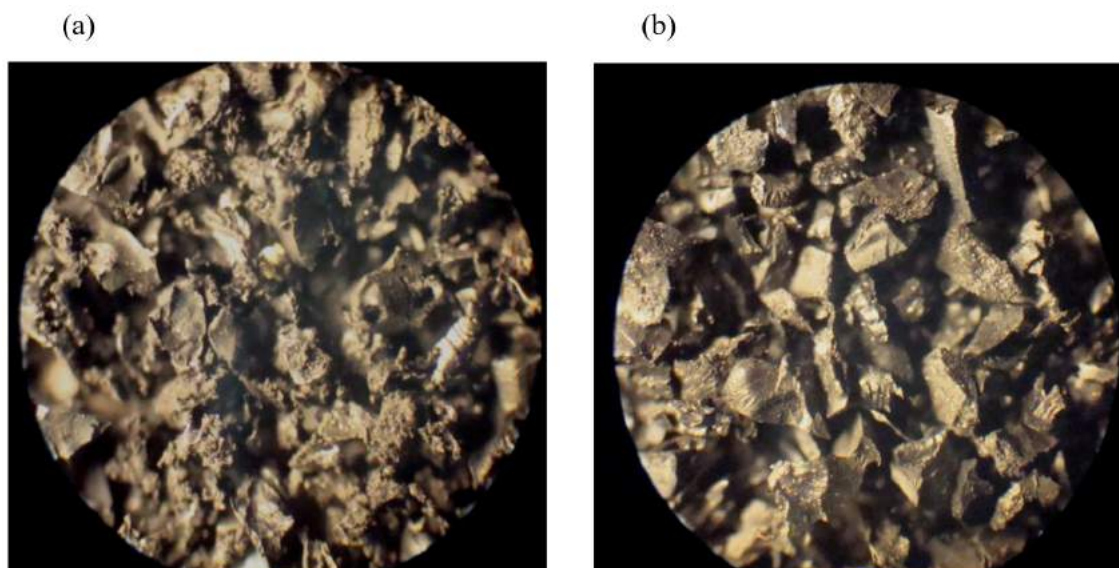


Figura 2.6: Observação ao microscópio óptico do granulado de borracha: (a) processo mecânico e (b) processo criogénico[36].

O granulado de borracha apresenta as seguintes características [37, 38]:

- Resistente à compactação;
- Muito boa resposta elástica por unidade de massa;
- Resistente à abrasão;
- Estável ao longo do tempo;
- Resistente ao impacto climático;
- Não flutuante ou de flutuabilidade reduzida;
- Resistente à radiação Ultra-violeta (UV);

O processo criogénico, como é muito rápido, a temperaturas negativas, e sob atmosfera inerte, não degrada química nem termicamente as cadeias moleculares dos polímeros de borracha, nem o seu estado de vulcanização. As suas propriedades elásticas como a absorção de impactos e a recuperação elástica não são, assim, alteradas, mantendo-se intactas ao longo do tempo. Os agentes protetores existentes na borracha (antioxidantes, estabilizantes aos raios UVs, entre outros) mantêm-se eficazes, resultando numa elevada resistência ao envelhecimento e aos agentes atmosféricos [37].

Incorporação de granulado de borracha em misturas betuminosas

Em Portugal, a adição de borracha de pneus em fim de vida útil a betumes convencionais tem sido essencialmente realizada por via húmida [39], obtendo-se um Betume modificado com borracha (BMB). O BMB podem ser fabricados com diferentes percentagens de granulados de borracha, podendo ser classificados em três tipos: Betume de baixa viscosidade modificado com borracha (BBB), Betume de média viscosidade modificado com borracha (BBM) e Betume de alta viscosidade modificado com borracha (BBA) [9]. Dos betumes anteriormente referidos, o BBA é o mais utilizado no caso português. [40]

Quanto à interação física betume-borracha, ocorre o movimento do betume convencional para o interior da borracha, ocorrendo um aumento de volume, o que conduz a um comportamento final diferente do betume convencional (Figura 2.7). Esta interação é influenciada pela granulometria da borracha e pela tecnologia de obtenção do granulado de borracha [36].

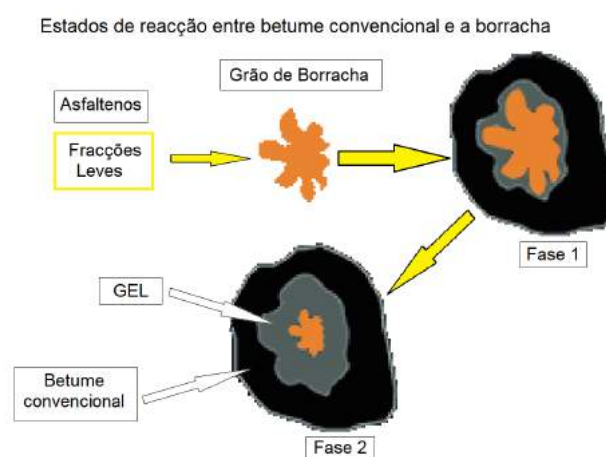


Figura 2.7: Modelo de interação betume-borracha (adaptado de Dias [36]).

As vantagens da aplicação deste material em pavimentação são o aumento de resistência à fadiga, a diminuição de suscetibilidade à temperatura, a diminuição da sensibilidade ao envelhecimento e uma maior absorção do ruído, relativamente às misturas betuminosas convencionais [40].

Na adição por via seca o granulado de borracha é tratado como um agregado e a substituição do agregado natural por este material usualmente é da ordem de 1 a 5%. Como a superfície específica da borracha é reduzida e o período de reação, entre o betume e o granulado, é limitado, não existe tempo suficiente para que a reação ocorra em toda a massa das partículas de borracha de maior dimensão. Desta forma, as partículas de borracha funcionam como um sistemas de dois componentes, em que as partículas mais finas reagem com o betume convencional e modificam a sua reologia mediante um processo similar ao da via húmida. Por outro lado, as partículas mais grossas comportam-se

como um agregado elástico dentro do esqueleto mineral da mistura betuminosa, atuando superficialmente na reação com o betume convencional e criando uma interface betume-borracha com coesão de ambos os materiais [35].

Conseguem-se misturas muito flexíveis, de grande recuperação elástica, mas de difícil compactação, adequando-se apenas a camadas de desgaste [41].

Em Portugal, existem algumas aplicações de misturas betuminosas com incorporação de granulados de borracha (por via húmida), como é o caso, por exemplo, do troço da A2 entre Palmela e a Marateca, com bons resultados demonstrados [39].

2.2.3.2 Cortiça

A cortiça é a parte mais exterior da casca do sobreiro (*Quercus suber L.*), proveniente do revestimento do tronco e dos ramos do sobreiro. A cortiça pode ser classificada consoante a geração em que é extraída, como: (i) cortiça virgem; (ii) cortiça secundária ou (iii) cortiça amadia. A cortiça virgem é oriunda do primeiro descortiçamento (desbóia), realizado ao fim dos primeiros 20 a 30 anos de vida do sobreiro e cuja superfície exterior ainda se encontra muito irregular. A cortiça secundária ou cortiça de segunda geração, ainda não possui a melhor qualidade, sendo ainda composta por algumas irregularidades. Por sua vez, a cortiça amadia é a cortiça de melhor qualidade e cuja superfície exterior é a mais uniforme, sendo extraída após 40 a 50 anos de idade do sobreiro e posteriormente periodicamente, de 9 em 9 anos, até à morte do sobreiro, que ocorre aproximadamente após cerca de 100 a 150 anos de vida [42].

Na Europa, os países do Sul do Mediterrâneo, produzem mais de 80 % da cortiça produzida a nível mundial e Portugal, que detém um terço da área global de sobreiros, é o maior produtor, sendo responsável por 55% da transformação mundial [43]. Em Portugal, o sobreiro ocupa mais de 720 mil hectares, Figura 2.8, o que corresponde a 22% da área florestal do país.

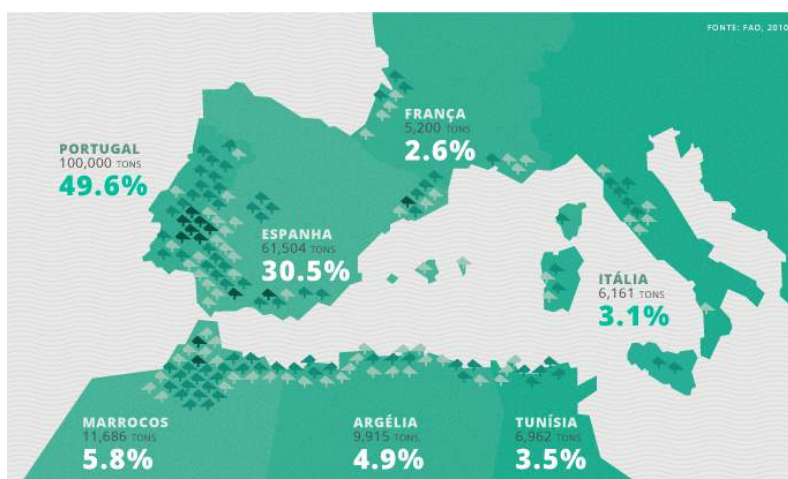


Figura 2.8: Montado de sobreiros da zona mediterrânea, FAO [44].

A cortiça é um material de estrutura anisotrópica, cujas três direções principais são a radial (paralela ao raio da árvore), a axial (direção vertical da árvore) e tangencial (perpendicular às outras duas, tangente à circunferência da seção da árvore), sendo as suas propriedades semelhantes nas duas direções não-radiais (Figura 2.9)[42]. No entanto a anisotropia deixa de ser sentida quando temos um aglomerado de cortiça, dada a orientação aleatória dos grânulos, o que é o caso dos produtos de cortiça para a construção civil [2].

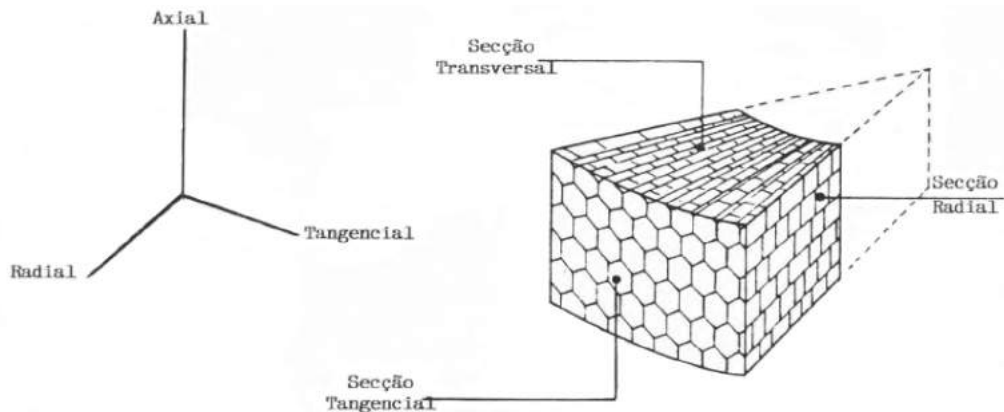


Figura 2.9: Disposição das células da cortiça [45].

A cortiça é constituída por materiais celulares, formados por células ocas, abertas ou fechadas, em que estas células são apresentadas em forma de prismas hexagonais, empilhados em colunas ou fiadas, segundo a direção radial. Microscopicamente, a cortiça é um material com camadas de células justapostas, de aspeto alveolar, com membranas celulares praticamente impermeáveis.

Na sua constituição química a cortiça engloba vários tipos de compostos, que tradicionalmente são divididos em cinco grupos [46]:

- Suberina (45% - responsável pela sua compressibilidade e elasticidade);
- Lenhina (27% - estrutura das paredes celulares);
- Polissacáridos (12% - também ligados à estrutura da cortiça);
- Ceróides (6% - repelem a água e contribuem para a impermeabilidade);
- Taninos (6% - cor e proteção/conservação do material);
- Cinzas (4%).

Produção de granulados de cortiça

Após o descortiçamento as pranchas de cortiça são transportadas para fábrica onde são armazenadas durante 6 meses, um período para a estabilização da cortiça, antes de

serem processadas e transformadas. A preparação de cortiça para uso industrial começa com uma operação de ebulição. A cortiça é fervida e filtrada, a fim de remover toda matéria biológica que possa estar incorporada nos poros e assim permitir que a cortiça alcance o teor de humidade ideal para o seu processamento. A cortiça é, então, classificada em diversas espessuras, que são, por sua vez, classificadas em diferentes qualidades, uma segmentação para determinar a adequação da cortiça para diferentes aplicações [42].

A cortiça do primeiro e segundo descortiçamento, sem qualidade para o fabrico de rolhas, os refugos e bocados de cortiça amadia que não podem ser utilizados neste fabrico, assim como a cortiça transformada em rolhas ou outros produtos aglomerados que tenha sido rejeitada no controle de qualidade ou restos e aparas dos mesmos, será triturada e dará origem a outros produtos, como os granulados e o pó de cortiça [47].

São considerados granulados as partículas com dimensões entre 0,25 mm e 22,4 mm. Partículas que se insiram abaixo deste intervalo são denominadas pó de cortiça [48].

Propriedades da cortiça

A cortiça surge na indústria como um material versátil capaz de se adaptar a diversos tipos de aplicações. Este é um material de baixa densidade, com elevada deformabilidade e de baixa resistência à deformação, grande capacidade de absorção de energia (impacto), grande capacidade de dissipar energia (para solicitações cíclicas), elevado coeficiente de atrito, baixa condutibilidade térmica e boa resistência ao fogo [2].

Macroscopicamente este é considerado um material leve, elástico e praticamente impermeável a líquidos e gases, isolante térmico e elétrico e absorvedor acústico e vibratório, sendo também apresentado como um material inócuo e praticamente imputrescível, com reduzida expansão lateral, quando comprimido [42, 46].

As características de isolamento da cortiça devem-se ao facto de existirem estes minúsculos compartimentos (células) cheios de ar. As células de cortiça são muito mais pequenas do que as dos materiais celulares ordinários, o que contribui para justificar as excepcionais propriedades de isolamento deste material [46].

Incorporação de granulado de cortiça em misturas betuminosas

A cortiça é um material cujas aplicações são conhecidas desde a Antiguidade, algumas delas, desde logo relacionadas com a construção, cujo mercado, a partir do início do século XX, teve uma enorme expansão, nomeadamente face ao desenvolvimento de aglomerados diversos à base de cortiça [42]. Esta é considerada um material estratégico utilizado para múltiplas aplicações na área da construção, da moda, do design, da saúde, da produção de energia ou da indústria aeroespacial [49]. No entanto ao nível da sua incorporação em misturas betuminosas só existe um único estudo sobre este tema, intitulado "*Desempenho mecânico de misturas de betuminosas produzidas com granulados de cortiça ou borracha como substitutos parciais do agregado*" de S. Pereira et al. [50].

2.3 Comportamento mecânico

Os pavimentos rodoviários são submetidos ao longo da sua vida útil, a diversas ações que afetam as propriedades mecânicas das camadas betuminosas. As camadas betuminosas estão sujeitas a diversos mecanismos de degradação que surgem devido às ações do tráfego e da temperatura. Dos mecanismos de degradação dos pavimentos flexíveis destacam-se, principalmente, o fendilhamento por fadiga e as deformações permanentes. Torna-se assim essencial caracterizar o comportamento mecânico das misturas betuminosas, e dos seus constituintes, por forma a prolongar a vida útil dos mesmos e assegurar uma melhor comodidade e segurança em serviço.

2.3.1 Reologia

O termo reologia, originário do grego *rhéos* (fluxo) e *lógos* (estudo), foi introduzido no meio científico pelo Professor Eugene Cook Bingham, para definir o estudo da “*deformação e escoamento da matéria*”. Esta definição foi aceite aquando da fundação da Sociedade Americana de Reologia (*Society of Rheology*), em 1929. O seu aparecimento enquanto ciência resultou do facto das leis de Hooke (teoria da elasticidade) e de Newton (teoria dos fluidos newtonianos) não serem suficientes para descrever o comportamento de muitos materiais e, como tal, o seu principal objetivo foi e continua a ser o estudo de materiais cujo comportamento não pode ser simplesmente descrito por essas leis clássicas [51].

A viscosidade é o conceito da reologia que representa a medida do atrito interno de um material e é uma medida de resistência ao escoamento (“*falta de deslizamento*”) [51]. Esta é uma propriedade dos gases e dos fluidos, 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.

2.3.1.1 Comportamentos reológicos

Os comportamentos reológicos são função da viscosidade. A classificação reológica de fluidos relaciona a tensão de corte (relação entre a força tangencial necessária para um objeto se mover e a área lateral desse mesmo objeto) com a taxa de corte (relação da velocidade relativa de um fluido quando este está em movimento e a extensão desse mesmo fluido). Esta classificação apresentada na Figura 2.10, divide os fluidos em dois tipos: os de comportamento Newtoniano e os de comportamento Não-Newtoniano.

O comportamento Newtoniano é independente da taxa de corte e do tempo de carregamento. É um comportamento viscoso ideal onde a variação entre a taxa de corte e a tensão de corte é linear (Figura 2.11 (a)) e a viscosidade, tomando um valor constante, é independente da taxa de corte (Figura 2.11 (b)).

Nos materiais com comportamento reológico Não-Newtoniano, a variação entre a tensão de corte e a taxa de corte não é linear, resultando em valores de viscosidade

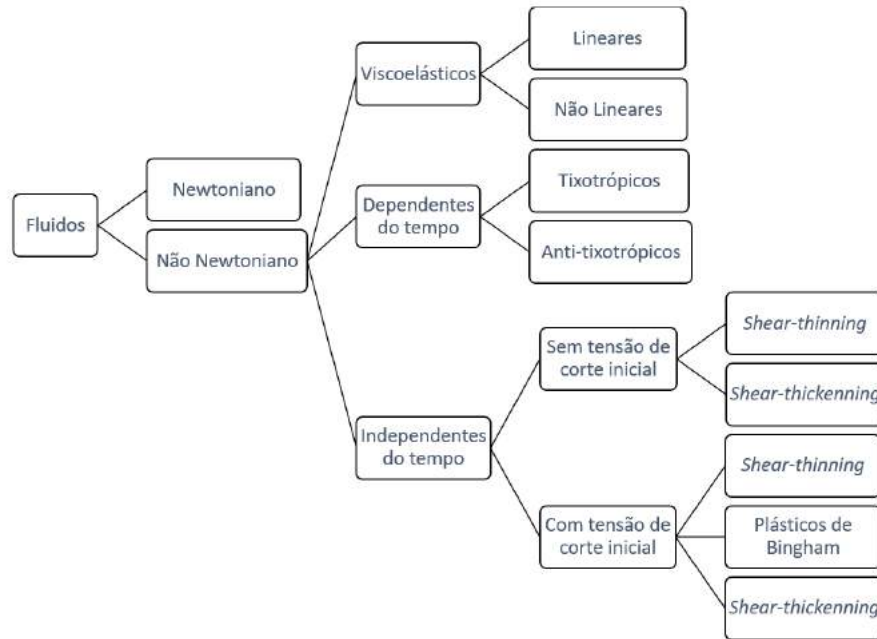


Figura 2.10: Classificação do comportamento reológico de fluidos (adaptado de Santos [52])

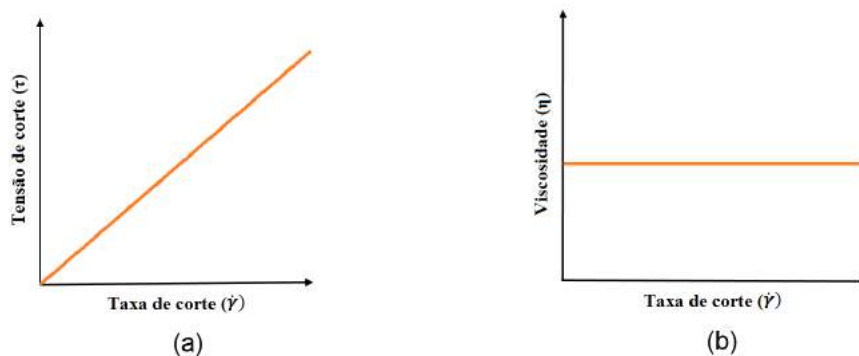


Figura 2.11: Comportamento reológico dos materiais Newtonianos (adaptado de Yildirim et al. [53]).

variáveis. Dada a grande diversidade de características reológicas exibidas pelos materiais Não-Newtonianos, é comum dividir-se em três grupos distintos, designadamente por: Não-Newtonianos viscoelásticos, Não-Newtonianos dependentes do tempo e Não-Newtonianos independentes do tempo [51].

O grupo dos materiais não-Newtonianos viscoelásticos é subdividido em viscoelásticos lineares e não lineares. O termo viscoelasticidade descreve o comportamento de um material que se enquadra entre os extremos clássicos da resposta elástica de Hooke e do comportamento viscoso de Newton. Por outras palavras, a viscoelasticidade significa a existência simultânea de propriedades elásticas e viscosas [51]. Devido à componente

elástica, um material viscoelástico recupera parte da deformação quando cessa a aplicação da tensão a que está submetido e a componente viscosa confere-lhe as características respeitantes aos comportamentos Newtoniano e Não-Newtoniano dependente do tempo [54].

O conceito de viscoelasticidade está ainda relacionado com a escala do tempo do ensaio e o tempo natural do material (tempo de relaxação). Deste modo, se o ensaio é relativamente lento, o material aparenta ser viscoso, enquanto que se este for relativamente rápido, o material aparenta ser elástico. Em escalas de tempo intermédias a resposta do material é viscoelástica. Assim, é possível concluir que um determinado material pode comportar-se como um sólido ou líquido, dependendo da escala de tempo do ensaio e que, aplicando uma vasta gama de tensões ao longo de um intervalo grande de tempo, é possível observar líquidos com propriedades de sólidos e sólidos com propriedades de líquidos [51].

O grupo dos materiais Não-Newtonianos dependentes do tempo de carregamento caracteriza-se por uma mudança da viscosidade em função do tempo de carregamento sob condições constantes de taxa de corte. Este grupo divide-se em dois tipos de comportamento, o Tixotrópico e o Anti-Tixotrópico (ou Reopético). O Tixotrópico caracteriza-se pela diminuição da viscosidade com o tempo de carregamento (Figura 2.12 (a)), sob tensão de corte ou taxa de corte constante, seguida da recuperação gradual, quando a tensão de corte ou taxa de corte é removida. O Anti-Tixotrópico caracteriza-se por um comportamento inverso, aumento da viscosidade com o tempo de carregamento, sob tensão de corte ou taxa de corte constante, seguida da recuperação gradual, quando a tensão de corte ou taxa de corte é removida (Figura 2.12 (b)). [51].

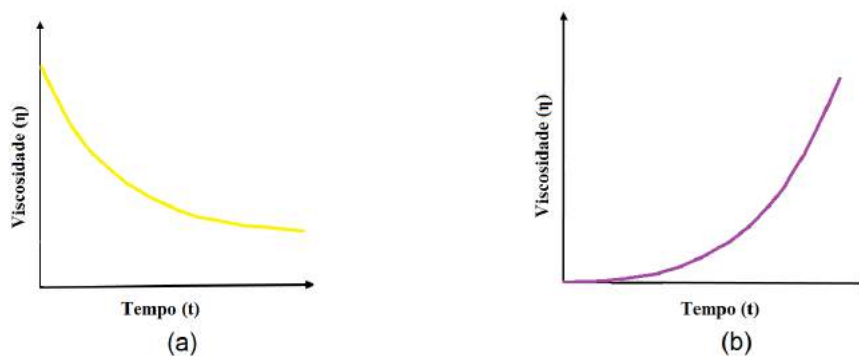


Figura 2.12: Comportamento reológico dos materiais Não-Newtonianos dependentes do tempo: Comportamento Tixotrópico (a) e Anti-Tixotrópico (b) (adaptado de AMETEK Brookfield [55]).

O grupo de materiais Não-Newtonianos independentes do tempo de carregamento é subdividido em materiais com ou sem tensão de corte inicial. Neste grupo a viscosidade apenas depende da taxa de corte, logo, o comportamento reológico é dependente apenas da taxa de corte. Da subdivisão em materiais sem tensão de corte inicial resultam dois comportamentos típicos, o *Shear-thinning* ou pseudoplástico e o *Shear-thickening* ou

dilatante. O comportamento *Shear-thinning* caracteriza-se por uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de corte. A relação inversa descreve o comportamento *Shear-thickening*, ou seja, um aumento da viscosidade com o aumento da taxa de corte [53].

Os materiais com tensão de corte inicial definem-se pelo não escoamento até que uma determinada tensão de cedência (τ_y), seja atingida [51]. Numa primeira fase, após atingirem a tensão de cedência, comportam-se como um material elástico e numa segunda fase, após atingirem a tensão de cedência, exibem características de um material Newtoniano, *Shear-thinning* ou *Shear-thickening*. Os materiais que após atingirem a tensão de cedência, apresentem características de um material Newtoniano são conhecidos por terem um comportamento de plástico de Bingham.[53]

Na Figura 2.13 resumem-se, em termos da relação entre tensão de corte e taxa de corte, o comportamento reológico dos materiais Não-Newtonianos independentes do tempo.

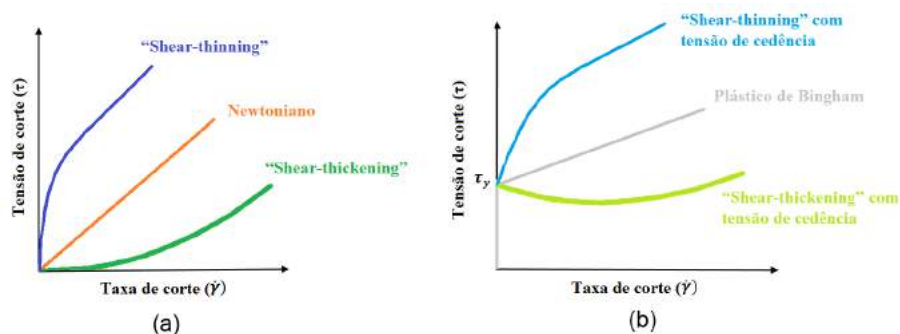


Figura 2.13: Comportamento reológico dos materiais Não-Newtonianos independentes do tempo: Sem tensão de cedência (a) e com tensão de cedência (b) (adaptado de Cavadas [54]).

2.3.1.2 Rigidez das misturas betuminosas

As misturas betuminosas são constituídas por um esqueleto mineral com comportamento elástico e um ligante betuminoso com comportamento viscoelástico. Assim, o comportamento das misturas betuminosas é bastante influenciado pela reologia do betume. Quanto maior a percentagem de betume, maior é a influência da reologia do betume sobre o comportamento das misturas. Da mesma forma, pode-se afirmar que a rigidez de uma mistura betuminosa depende essencialmente da rigidez do betume. [56]

Para se caracterizar o comportamento das misturas betuminosas torna-se necessário conhecer o módulo de rigidez e o ângulo de fase, sendo estes parâmetros função da temperatura, do tempo de carregamento e da forma de aplicação do carregamento. [56]

O módulo complexo corresponde à relação entre a tensão e a extensão de um material viscoelástico linear, submetido à aplicação de uma carga segundo uma onda sinusoidal, durante um intervalo de tempo (t) e com uma frequência angular (ω).

Nas condições indicadas, o material está sujeito a uma tensão (σ), que dá origem a uma extensão (ε). Estes valores podem ser calculados de acordo com as Equações 2.9 e 2.10.

$$\sigma = \sigma_0 \times \text{sen}(\omega \times t) \quad (2.9)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \text{sen}(\omega \times t - \varphi) \quad (2.10)$$

Nas duas equações anteriores, o tempo, t , vem dado em segundos (s), φ em radianos (rad), e a frequência angular, ω , em radianos por segundo (rad/s), podendo esta relacionar-se com a frequência (f) em hertz (Hz), através da expressão:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.11)$$

O betume irá deformar-se devido ao seu comportamento viscoelástico, sofrendo um desfaseamento para uma mesma frequência. Ao valor do desfaseamento observado entre as tensões e as deformações é designado de ângulo de fase (φ), como se pode observar na Figura 2.14. O comportamento do betume é predominantemente elástico quando o ângulo de fase for nulo e torna-se viscoso quando o valor do ângulo aumenta [57].

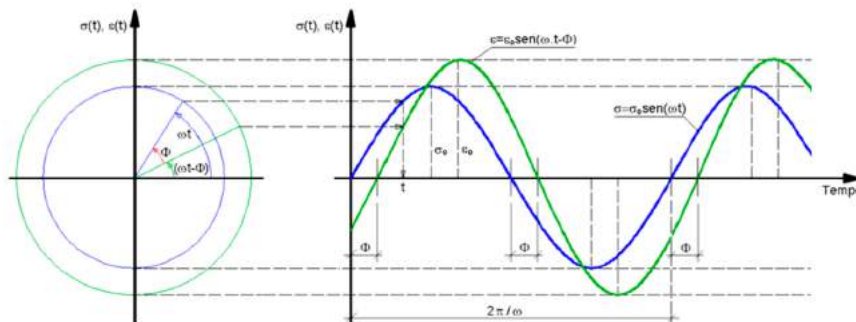


Figura 2.14: Módulo de rigidez e ângulo de fase - desfaseamento entre a tensão e a extensão (adaptado de Martinho [58]).

Desta forma o módulo complexo (E^*) é caracterizado por:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \times [\cos(\varphi) + i \times \text{sen}(\varphi)] = |E^*| \times [\cos(\varphi) + i \times \text{sen}(\varphi)] \quad (2.12)$$

Este módulo complexo é caracterizado por um par de componentes:

- A componente real (E_1), 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 (Equação 2.13);
- A componente imaginária (E_2), correspondente à fase plástica, ou seja, à componente de energia dissipada por atrito interno, de deformação irrecuperável ou residual (Equação 2.14);

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\varphi) \quad (2.13)$$

$$E_2 = |E^*| \times \sin(\varphi) \quad (2.14)$$

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

$$S_m = |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.15)$$

E o ângulo de fase (φ) é dado pela seguinte expressão:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \quad (2.16)$$

A rigidez das misturas betuminosas, tal como nos betumes, não é constante. Esta depende de factores como: a temperatura, a frequência de carregamento, as características dos materiais constituintes e a sua composição. Desta forma o seu valor deve vir sempre acompanhado do método de ensaio e das condições de ensaio utilizadas na sua determinação [56].

Em geral, as misturas betuminosas exibem um comportamento viscoso para temperaturas e tempos de carregamento elevados, e um comportamento elástico quando são sujeitas a temperaturas e tempos de carregamento baixos. Para condições de temperatura e tempo de carregamento consideradas intermédias, estes materiais exibem comportamento reológico do tipo visco-elástico [57].

Devido à rigidez das misturas betuminosas ser função da rigidez do betume, todas as expressões consideradas anteriormente para a rigidez do betume são válidas para a rigidez das misturas betuminosas [56].

A avaliação do módulo de rigidez e do ângulo de fase é frequentemente realizada em provetes submetidos a cargas cíclicas com variação sinusoidal [56], conforme a norma EN 12697-26 [59].

2.3.1.3 Representação das propriedades reológicas

Os resultados do módulo complexo e do ângulo de fase dependem muito das condições de temperatura e da frequência a que o ensaio é realizado. Estas propriedades podem ser representadas graficamente recorrendo a vários métodos de modo a que os resultados possam ser apresentados e avaliados de forma compreensível. Podem usar-se as curvas isócronas, as curvas isotérmicas, as curvas mestras, o diagrama de Black ou o diagrama de Cole-Cole.

Quando as curvas do módulo complexo ou do ângulo de fase estão em função da temperatura, a uma frequência constante, são chamadas curvas isócronas (Figura 2.15).

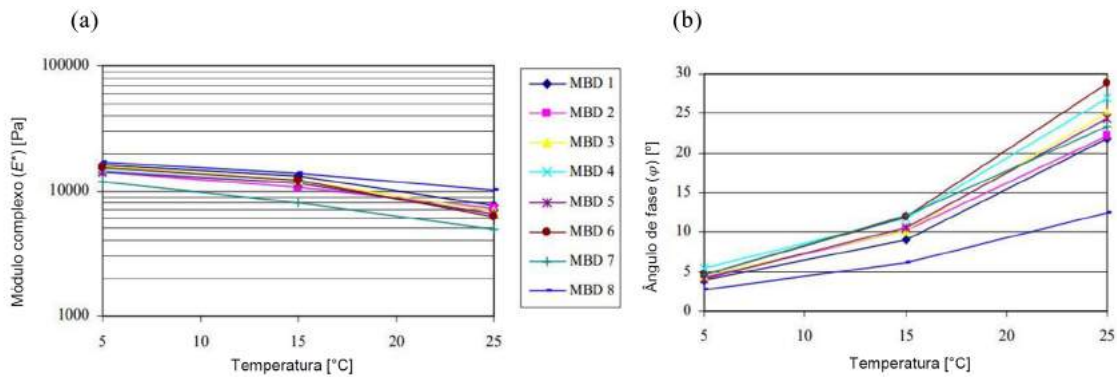


Figura 2.15: Exemplos de isócronas de diferentes misturas betuminosas submetidas a uma frequência de 10 Hz: (a) isócronas do módulo complexo e (b) isócronas do ângulo de fase (adaptado de H. Silva [6]).

Esta representação permite avaliar a influência da temperatura nas propriedades viscoelásticas, para diferentes frequências de ensaio ou para diferentes materiais [60, 61].

As curvas isotérmicas (Figura 2.16), tal como as curvas isócronas, têm um parâmetro constante. Neste caso o módulo complexo e do ângulo de fase são representados em função da frequência (ou tempo de carregamento) a uma temperatura constante [60, 61]. Esta representação permite avaliar a variação das propriedades reológicas em função da temperatura.

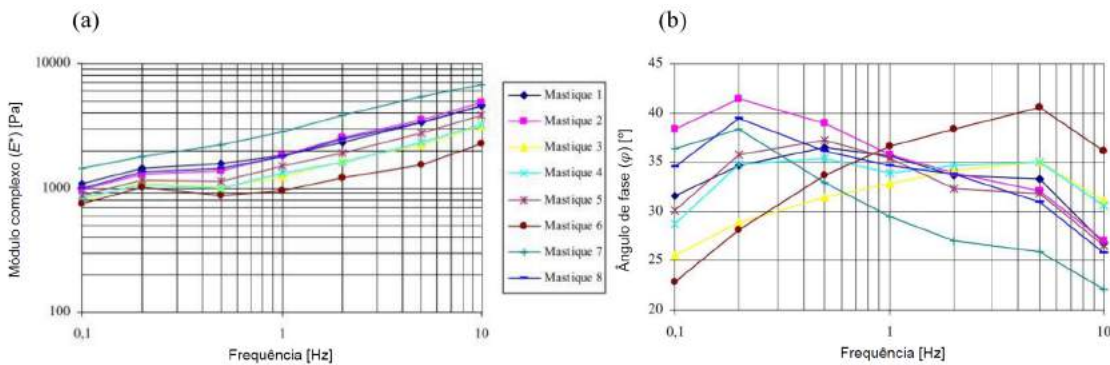


Figura 2.16: Exemplos de isotérmicas de um betume: (a) isotérmicas do módulo complexo e (b) isotérmicas do ângulo de fase (adaptado de H. Silva [6]).

As curvas mestras assentam no Princípio da Sobreposição Tempo-Temperatura (*Time Temperature Superposition Principle*) (TTSP) que permite, além de estabelecer a referida relação entre frequência e temperatura, também produzir uma curva contínua (Figura 2.17). Estas curvas relacionam o módulo de deformabilidade (ou o ângulo de fase) com a frequência equivalente ($\log(f_r)$) (Figura 2.18). Segundo este princípio, as propriedades reológicas do material são influenciadas de igual modo por elevadas frequências e baixas temperaturas.

As curvas são obtidas através de um fator de deslocamento, correspondente a um

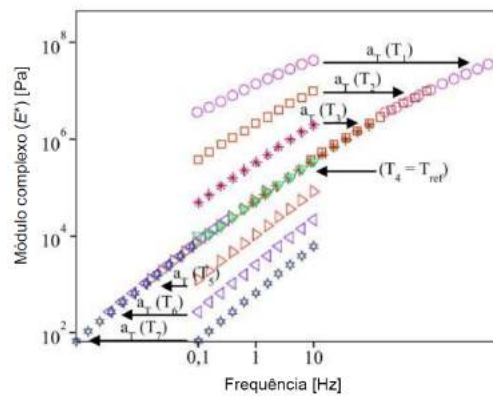


Figura 2.17: Exemplo de aplicação do princípio da sobreposição tempo-temperatura para a construção de uma curva-mestra correspondente ao módulo complexo (adaptado de Yussuf [62]).

deslocamento horizontal (a_T), obtendo-se assim uma curva-mestra para uma dada temperatura de referência (T_{ref}):

$$\log(f_r) = \log(f) + \log(a_T) \quad (2.17)$$

Os fatores de deslocamento utilizados, podem ser apresentados numa tabela ou num gráfico, e são obtidos através da Equação de Williams-Landel-Ferry (Equação 2.18), equação essa que depende da temperatura, da temperatura de referência e de duas constantes empíricas que dependem do material.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (2.18)$$

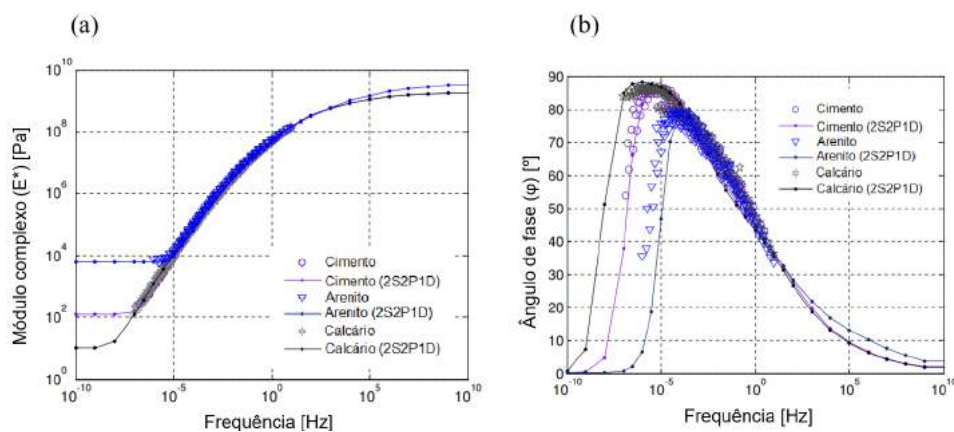


Figura 2.18: Exemplo de curvas-mestras de mastiques betuminosos com diferentes tipos de filer, com $T_{ref} = 10^\circ\text{C}$ (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase (adaptado de Yussuf [62]).

Outro aspeto relevante, está relacionado com a forma das curvas, 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 [14, 62, 63].

Os diagramas de Black representam o módulo complexo em função do ângulo de fase, tal como se mostra na Figura 2.19 [60].

Nestas representações não existe qualquer referência à temperatura ou à frequência e, à semelhança do que acontece com as curvas-mestras, uma curva suave é um indicador da equivalência tempo-temperatura, enquanto uma curva irregular ou dispersa indica uma falha do princípio da sobreposição tempo-temperatura, associada por exemplo à presença de polímeros [63].

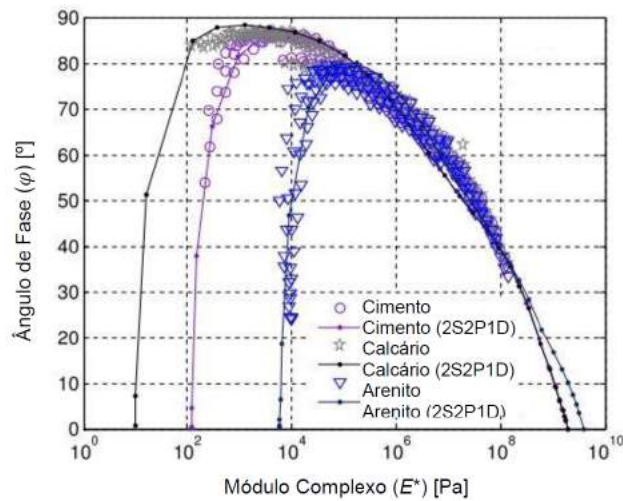


Figura 2.19: Exemplo de diagramas de Black de mastiques betuminosos com diferentes tipos de filer (adaptado de Yussof [62]).

No Diagrama de Cole-Cole (Figura 2.20) ilustram-se a relação entre as componentes reais e imaginárias do módulo de rigidez, permitindo deste forma analisar o balanço viscoelástico do betume. Nesta representação, assim como foi referido nos Diagramas de Black, a temperatura e a frequência (tempo de carregamento) não incorporam os eixos do gráfico [6, 60, 63].

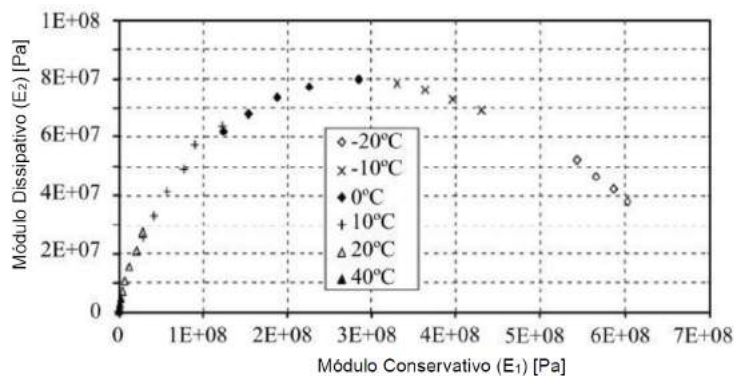


Figura 2.20: Exemplo de um diagrama de Cole-Cole (adaptado de Yussof [62]).

2.3.2 Resistência às deformações permanentes

As deformações permanentes são degradações no pavimento que podem ocorrer quer nas camadas betuminosas quer nas camadas granulares ou no solo de fundação. As degradações provocadas pelo tráfego de veículos pesados são as de mais comum ocorrência, designadas por rodeiras. Estas manifestam-se através do aparecimento à superfície do pavimento, de depressões longitudinais nas zonas de passagem dos pneus dos veículos pesados e acompanhados geralmente por elevações nas zonas laterais adjacentes [6].

No dimensionamento de pavimentos, embora os critérios de ruína utilizados para a verificação do comportamento à deformação permanente, apenas levem em conta a contribuição da fundação, tem-se verificado que a contribuição das camadas betuminosas também pode ser significativa, principalmente em situações de tráfego de veículos pesados intenso e com velocidades de circulação reduzidas [64].

O comportamento das misturas betuminosas é altamente influenciado pela temperatura, devido à sua parte viscosa, o betume. Perante um aumento de temperatura, o módulo de rigidez da mistura betuminosa diminui, proporcionando o aparecimento de deformações na zona de passagem dos rodados através da aplicação repetida de cargas devido à passagem dos veículos pesados, contribuindo para a formação das rodeiras [64].

As deformações permanentes ocorrem geralmente a temperaturas elevadas. Quanto mais alta for a temperatura, menor é a resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes.

Para a avaliação do comportamento das misturas betuminosas às deformações permanentes é usual recorrer-se a ensaios de compressão uniaxial realizados a altas temperaturas, de forma a simular as condições agressivas a que as camadas estão sujeitas quando se encontram em serviço. Este tipo de ensaio realiza-se, normalmente, de acordo com a norma EN 12697-25 [65], em provetes cilíndricos, aplicando uma carga de compressão constante na direção do eixo do provete (Figura 2.21).[66]

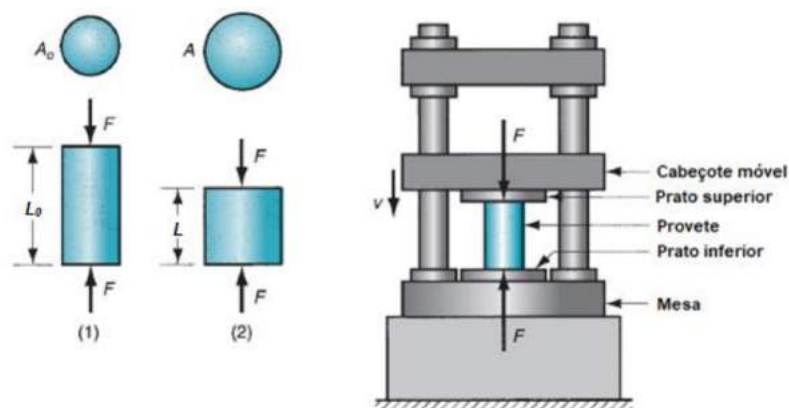


Figura 2.21: Esquema de ensaio de compressão uniaxial (adaptado de Groover [67]).

2.4 Comportamento acústico

As vibrações transmitidas no ar produzem uma variação de pressão, gerando uma onda sonora que pode ser detetada pelo ouvido humano. A onda sonora, ou som, produz uma sensação de audição que pode ser agradável ou desagradável. O ruído é, por sua vez, um som indesejado ou que não apresenta interesse pelo receptor. Após períodos longos de exposição, o ruído causa desconforto nos receptores, produzindo nestes, reações adversas [68].

A medição do ruído e a avaliação da resposta do receptor, ou seja do desconforto, apoiam-se em parâmetros físicos que permitem a definição de escalas de ruído, que por sua vez, estabelecem indicadores de ruído.

A acústica é a ciência que se dedica ao estudo do som e/ou do ruído, à sua propagação e às suas inter-relações com o ser humano.

As ondas sonoras produzidas pelos corpos em vibração podem ser completamente caracterizadas a partir de três parâmetros: a amplitude, o comprimento de onda e o período (Figura 2.22) [68].

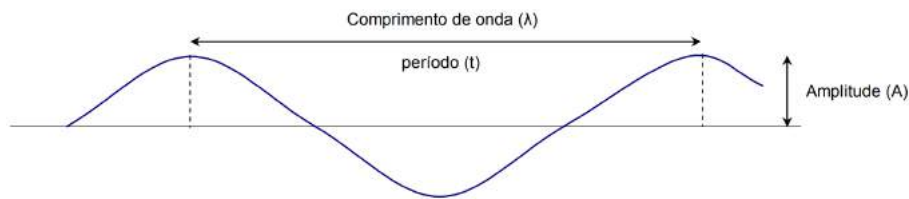


Figura 2.22: Parâmetros físicos da onda sonora [68].

A amplitude (A) corresponde à pressão máxima ou mínima produzida pela vibração, o comprimento de onda (λ) corresponde à distância entre cristas sucessivas e o período (t) corresponde ao tempo entre esses picos.

A frequência é o número de ocorrências de oscilação da onda num determinado tempo, numa posição fixa no espaço ou num meio sólido, e é expresso em Hertz (Hz), que corresponde a um ciclo por segundo [68].

A unidade internacional, usada para descrever as flutuações da pressão sonora é o decibel (unidade logarítmica), geralmente abreviado pela nomenclatura dB e indica o nível de pressão sonora [69]. O nível de pressão sonora (L_p) é calculado pela seguinte expressão:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (2.19)$$

Em que L_p é o nível de pressão sonora (dB), p é a pressão sonora (Pa) e p_0 é a pressão sonora de referência ($2 \times 10^{-5} Pa = 20 \mu Pa$).

O ruído varia ao longo do tempo, revelando quebras e picos ao longo do sinal, e tanto pode ser contínuo, como é o caso do ruído do tráfego, ou algo pontual, durando

apenas frações de segundo. Por esta razão, para avaliar o ruído são geralmente utilizados determinados indicadores que caracterizam o ambiente acústico exterior [70].

Em relação à duração do som, são utilizados vários indicadores de ruído para uma descrição eficaz de como o nível de som varia ao longo do tempo, entre os quais: o nível de ruído máximo (L_{max}), o nível de ruído mínimo (L_{min}) e o nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}). [68]

O L_{eq} é o nível sonoro contínuo equivalente, e assume-se como um nível de pressão sonora constante durante determinado período de tempo. Este é considerado o indicador mais representativo do ruído ambiental de um determinado local durante um certo intervalo de tempo, sendo por isso essencial para a maior parte das avaliações acústicas [71]. Os L_{min} e L_{max} são respetivamente o nível de pressão sonora mínimo e máximo registado durante o período de medição.

Os sonómetros são equipamentos utilizados para realizar a medição dos níveis de pressão sonora. Estes equipamentos permitem obter níveis sonoros quer em dB quer em dB(A), ou noutros tipos de filtros de ponderação (dB(B), dB(C) e dB(D)).

2.4.1 Ruído do tráfego rodoviário

A maior fonte de ruído ambiental é o tráfego rodoviário [72], exposição a qual excede em muito as fontes ferroviárias e aeronáuticas combinadas [73]. Em áreas urbanas, considera-se que o tráfego rodoviário é responsável por 80% de toda a poluição sonora [74].

O ruído do tráfego rodoviário é causado por três tipos de fontes: o ruído originado pelo funcionamento do veículo (motor), o ruído da interação pneu/pavimento e o ruído aerodinâmico, como ilustrado na Figura 2.23 [68]. Estas fontes de ruído oferecem contributos diferentes relativamente à emissão de ruído global, dependendo da velocidade do veículo.

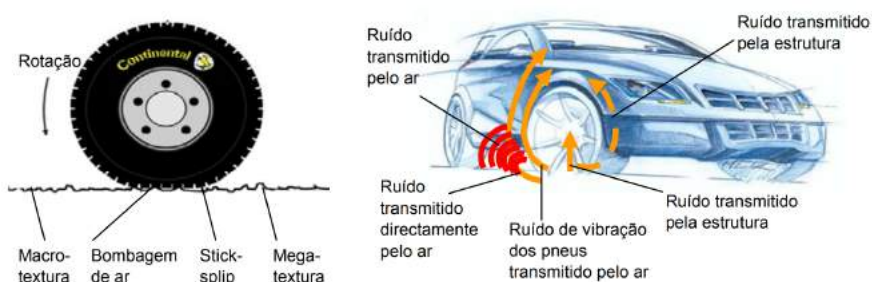


Figura 2.23: Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (à esquerda) e funcionamento do veículo (à direita) [68].

No ruído originado pelo funcionamento do veículo intervêm os elementos vibrantes que participam na propulsão, tais como o motor, os travões, a transmissão, o escape, a suspensão e outros componentes do veículo.

Os mecanismos de emissão do ruído da interação pneu/pavimento podem ser de duas origens: mecânica e aerodinâmica. Contudo, este é um fenómeno complicado visto que

há muitos mecanismos de emissão, sendo que a sua contribuição para o ruído global pneu/pavimento depende de muitos factores tais como: o modelo e idade do veículo, o peso do eixo, a pressão, o tipo, o tamanho, a temperatura e o material do pneu e a textura da superfície da estrada e do pneu, a porosidade da camada, o estado de conservação e a temperatura, bem como da velocidade do veículo [75].

O ruído aerodinâmico tem origem na interação entre a carroçaria do veículo e o ar, pelo que, depende fortemente da forma da carroçaria e aumenta com a velocidade de circulação do veículo. Este mecanismo de emissão de ruído é geralmente estudado, pela indústria automóvel, em túneis de vento.

Na análise das causas do ruído pneu/pavimento é importante ter em atenção os vários factores do pavimento em interação, nomeadamente a dimensão dos agregados, percentagem de betume e porosidade. O agregado à superfície tem um papel significativo no que respeita ao desempenho da estrada quanto ao ruído e à aderência, aumentando a segurança de circulação.

Existem várias opções disponíveis de mitigação de ruído do tráfego [72]: Motores mais silenciosos, superfícies rodoviárias de baixo ruído, pneus de baixo ruído, veículos elétricos e melhor gestão de tráfego.

2.4.2 Superfícies rodoviárias de baixo ruído

As superfícies dos pavimentos podem ter uma influência significativa no som produzido pelos veículos que nelas transitam. Características importantes deste tipo de pavimento incluem a sua rugosidade, porosidade e elasticidade. Os fatores anteriormente referidos podem ser influenciados pela quantidade e tipo de ligante usado (betume ou cimento, por exemplo), pelo agregado (como a forma e o tipo do agregado) e o tratamento superficial [76].

As superfícies de pavimentos mais eficazes para reduzir a poluição sonora do tráfego são as superfícies permeáveis e as superfícies de textura aberta [73].

As superfícies permeáveis reduzem a emissão do ruído de tráfego devido à sua porosidade [73, 76]. Vários países europeus mostraram que as misturas betuminosas permeáveis podem efetivamente reduzir o ruído. Nos Países Baixos, por exemplo, onde é utilizado em pelo menos 60% das estradas, a pesquisa mostrou que as superfícies permeáveis podem reduzir o ruído dos veículos ligeiros em 3 dB [77]. Resultados do projeto *EU SILENCE* [78] indicam que as superfícies de estradas permeáveis, com porosidade aberta, podem reduzir o ruído em mais de 6 dB em estradas principais, embora necessitem de limpeza bianual.

As superfícies de textura aberta, apresentam uma superfície lisa e uniforme que favorece a redução do ruído de tráfego. Na Dinamarca, este tipo de superfícies foram estudadas em programas de redução de ruído, chegando-se à conclusão que estas conseguem reduzir em 3 dB o ruído gerado por veículos ligeiros [79]. Este tipo de superfície, por necessitar de menos manutenção, foi considerado o mais adequado para aplicação em áreas urbanas

[73]. Apesar de diferirem na composição, os dois tipos de superfícies apresentam pequenos grânulos na superfície de circulação, o que aumenta a porosidade (vazios) e auxilia na absorção de ruído.

É importante notar que as superfícies rodoviárias de baixo ruído têm mais impacto onde o ruído de rolamento é predominante, devido à rugosidade superficial ser menor que nos pavimentos convencionais. Quando o ruído do motor é a principal fonte de poluição sonora, a eficácia destes é menor. As superfícies rodoviárias de baixo ruído também têm vantagens sobre outras abordagens de mitigação do ruído, pois reduzem o ruído proveniente de edifícios próximos à via, ao contrário do isolamento acústico, que beneficia apenas o edifício protegido. [73]

Embora muitos países da UE já utilizem superfícies rodoviárias de baixo ruído, o objetivo final é harmonizar o tipo de superfícies de pavimento utilizadas em toda a UE. O Comité Europeu de Normalização (CEN) começou a trabalhar no sentido de criar uma normalização das características de ruído nas superfícies das estradas europeias.

Capítulo 3

Programa experimental

O presente capítulo apresenta o programa experimental, nomeadamente a caracterização laboratorial dos materiais e os métodos utilizados no fabrico das argamassas betuminosas, na preparação dos provetes e nos procedimentos de ensaio.

Os materiais constituintes das argamassas betuminosas foram caracterizados com o objetivo de se determinarem as suas composições granulométricas (para os agregados finos e os fíleres), as massas volúmicas e a temperatura de amolecimento do betume. Após esta caracterização determinou-se a composição das diferentes argamassas. Em seguida foram fabricados os provetes de argamassas betuminosas segundo um método de compactação estudado experimentalmente. Por fim, caracterizaram-se as várias argamassas através dos seguintes ensaios: ensaios de caracterização volumétrica dos provetes, análise acústica através da medição da pressão sonora, ensaios mecânicos monotónicos de compressão e ensaios mecânicos cíclicos.

Os trabalhos experimentais, desenvolvidos neste âmbito, foram realizados no Laboratório de Materiais de Pavimentação, pertencente aos Laboratório de Geotecnia (LabGEO), e no Laboratório de Ensaios Mecânicos, pertencente aos Laboratório de Estruturas (LabEST) e aos Laboratório de Construção (LabCON), do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

3.1 Materiais

Nesta secção são apresentadas as características dos materiais que fazem parte da composição das argamassas betuminosas deste trabalho. O conhecimento destas características é fundamental para se determinarem, na secção seguinte, as composições das argamassas e a temperatura de fabrico dos provetes de argamassas.

3.1.1 Ligante betuminoso

O ligante betuminoso utilizado foi o betume modificado por adição de polímeros elastómeros termoplásticos designado por PMB 45/80-65 (PMB – *Polymer Modified Bitumen*), cedido pela empresa Probigalp (Figura 3.1). No Anexo I, na página 115 é apresentado o certificado de qualidade deste betume.

A adição de polímeros elastómeros termoplásticos, SBS, no betume puro 35/50 melhora as propriedades e desempenho prestado em serviço, pois o betume modificado adquire também propriedades elásticas, provocadas pela reticulação dos polímeros termoplásticos constituintes [61]. O betume modificado com polímeros apresenta um comportamento elástico para baixas temperaturas e um comportamento termoplástico para elevadas temperaturas.



Figura 3.1: Sub-amostras em latas grandes, médias e pequenas de betume modificado (PMB 45/80-65).

Na Tabela 3.1 estão indicadas as principais propriedades do betume modificado [80, 81] aplicado no fabrico das argamassas betuminosas, esta informação está presente no certificado de qualidade do betume que se encontra no Anexo I.

Tabela 3.1: Principais propriedades do betume modificado utilizado no fabrico das argamassas betuminosas.

Método	Propriedades	PMB 45/80-65
EN 1426	Penetração (25°C, 100g, 5s) (0,1 mm)	51
EN 1427	Temperatura de anel e bola (°C)	70,4

Além dos valores das propriedades acima referidas, foi fundamental o conhecimento da massa volúmica do ligante para o cálculo da formulação da argamassa betuminosa. Devido ao facto do certificado de qualidade não conter dados acerca da massa volúmica, considerou-se, através da literatura [52], que a massa volúmica do betume modificado PMB 48/80-65 é de 1030 kg/m^3 .

3.1.2 Agregados

Como já se referiu anteriormente, os agregados finos utilizados nesta dissertação são: pó de pedra, granulado de borracha e granulado de cortiça. Em seguida proceder-se-à à sua caracterização.

3.1.2.1 Pó de pedra

Na seleção de materiais para a realização deste trabalho escolheu-se a utilização de um agregado britado com o propósito de aumentar a resistência, uma vez que este tipo de agregado é mais anguloso e promove uma maior ligação entre as partículas. Pelos motivos acima descritos admitiu-se que o pó de pedra seria adequado para a composição da mistura.

O pó de pedra utilizado neste estudo é um agregado britado de origem calcária (resíduo de britagem), fornecido pela empresa SANCHEZ, S.A. Em laboratório foram peneiradas, através do peneiro 0,125 mm, as fracções mais finas da sua composição e guardadas para utilização como fíler recuperado de origem calcária, como se descreve em 3.1.3.

→ Análise granulométrica

A análise granulométrica do agregado foi realizada por meio de peneiração, segundo o método descrito na norma NP EN 933-1 [82], mas utilizado os peneiros da série ASTM. Neste método a massa total de agregado reduz-se ao provete de ensaio, por aplicação do procedimento definido na norma NP EN 932-2 [83]. Proceder-se à lavagem do provete, previamente pesado. Seca-se a amostra, a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, até alcançar massa constante e pesa-se novamente a massa do provete.

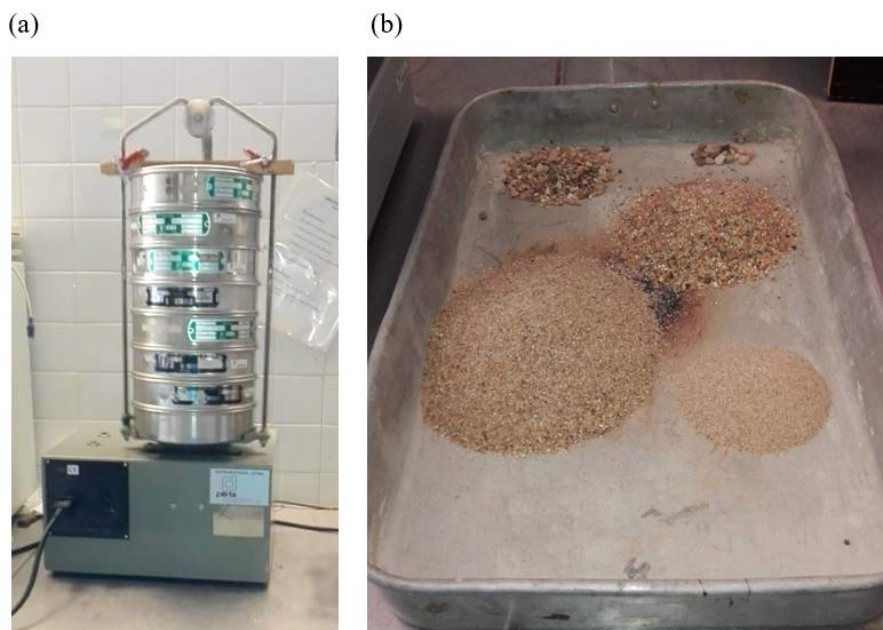


Figura 3.2: Peneiração mecânica com série base e série 2 (a) e fracções granulométricas do pó de pedra (b).

Coloca-se o provete lavado e seco, numa coluna de peneiros da série ASTM, disposta de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas dos peneiros. Submetendo-se o conjunto a agitação mecânica (Figura 3.2), sendo subsequentemente cada peneiro sujeito a agitação manual para a completa separação do material. Por fim, pesa-se o material retido em cada peneiro. Com as massas registadas anteriormente, são calculadas as percentagens de massa passada em cada um dos peneiros de modo traçar a curva granulométrica correspondente (Figura 3.3).

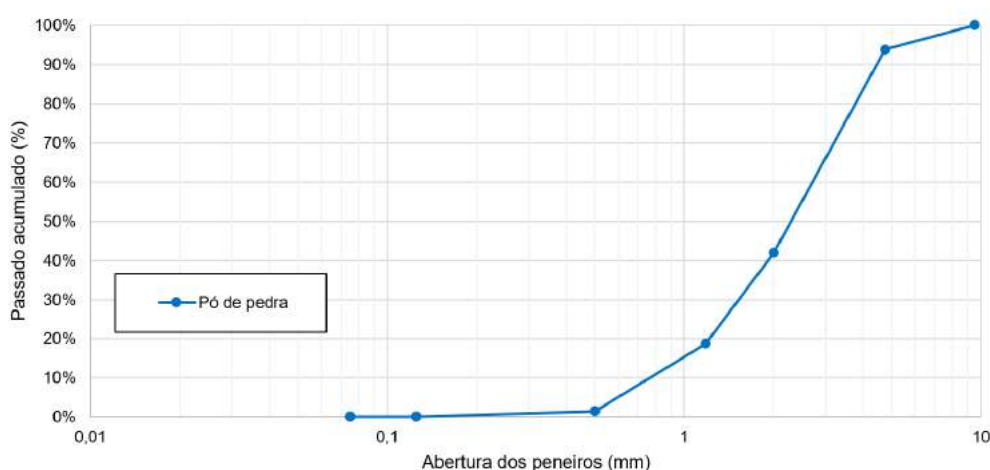


Figura 3.3: Curva granulométrica do pó de pedra.

Após análise da curva granulométrica determinou-se através da norma NP EN 933-1 [82], que a dimensão do agregado é 0,5/4 mm.

→ Massa volúmica

A determinação das massas volúmicas foi realizada em conformidade com a NP EN 1097-6 [84]. Constan na mesma norma vários métodos, cuja aplicabilidade depende da granulometria do agregado a estudar. Como o agregado tem dimensão 0,5/4 mm, foi utilizado o método descrito para os agregados com dimensões entre 0,063mm e 4mm, definido na norma como o método do picnómetro.

Começa-se por reduzir a massa total de agregado ao provete de ensaio (≥ 1 kg), por aplicação do procedimento definido na norma NP EN 932-2 [83]. Lava-se o provete sobre o peneiro de 4mm e 0,063mm e deixa-se o mesmo imerso em água durante um período de $24 \pm 0,5$ h.

Em seguida, imerge-se o provete no picnómetro com água. De forma a retirar o ar presente roda-se e agita-se cuidadosamente o picnómetro inclinado. Coloca-se o picnómetro em banho-maria a 22 ± 3 °C, novamente agitando-o para retirar o ar. A seguir, faz-se transbordar o picnómetro por adição de água e coloca-se uma tampa para impossibilitar a entrada de ar para o seu interior. Seca-se o picnómetro por fora, pesa-se (M_2) e regista-se a temperatura da água.

Decanta-se e esvazia-se o picnómetro sobre um tabuleiro e espalha-se o provete numa

camada uniforme, expondo-o a uma corrente de ar morno por forma a eliminar a humidade superficial visível, remexendo-o para garantir uma secagem homogénea deixando-o arrefecer. Enche-se o interior de um molde troncocónico de metal com o provete. De seguida compacta-se levemente o provete, com 25 pancadas, fazendo uso de um pilão. Aquando a retirada do molde, se o provete mantiver a sua forma troncocónica, prossegue-se com o processo de secagem até que o cone de agregado se deforme após desmoldagem.

Pesa-se o provete saturado com superfície seca (M_1), resultante do processo anterior e após secagem a $110\pm 5^\circ\text{C}$, até massa constante (M_4). Regista-se ainda o peso do picnómetro com água (M_3).

Com os valores registados durante o procedimento foi possível calcular a massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a) pela Equação 3.1, a massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) através da Equação 3.2 e a massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca (ρ_{ssd}) e absorção de água (WA_{24}) de acordo com as Equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3.1)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3.2)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3.3)$$

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (3.4)$$

Onde, M_1 é a massa do agregado saturado com a superfície seca ao ar, M_2 é a massa do picnómetro contendo o provete saturado, M_3 é a massa do picnómetro apenas cheio de água e M_4 é a massa ao ar do provete seco em estufa. As massas são apresentadas em gramas.

As massas volúmicas e absorção de água obtidas através das equações acima referidas encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Massas volúmicas e absorção de água do pó de pedra pelo método do picnómetro.

ρ_a (kg/m ³)	2690	ρ_{ssd} (kg/m ³)	2493
ρ_{rd} (kg/m ³)	2377	WA_{24} (%)	4,9

3.1.2.2 Granulado de borracha

O granulado de borracha foi fornecido pela empresa Recipneu - Empresa Nacional De Reciclagem De Pneus, Lda., para a utilização no presente trabalho. O granulado de fracção

2,4/6,3 mm foi analisado de modo a determinar a sua massa volúmica e a sua curva granulométrica.

Previamente aos trabalhos acima referidos, foram retiradas manualmente as fibras têxteis presentes no material cedido (Figura 3.4).



Figura 3.4: Fibras têxteis removidas do granulado de borracha.

→ **Análise granulométrica**

O método utilizado foi igual ao empregue para o pó de pedra, tendo-se obtido a curva granulométrica que se pode observar na Figura 3.5. Após análise da curva granulométrica confirmou-se a dimensão anunciada pelo fornecedor, segundo a norma NP EN 933-1 [82].

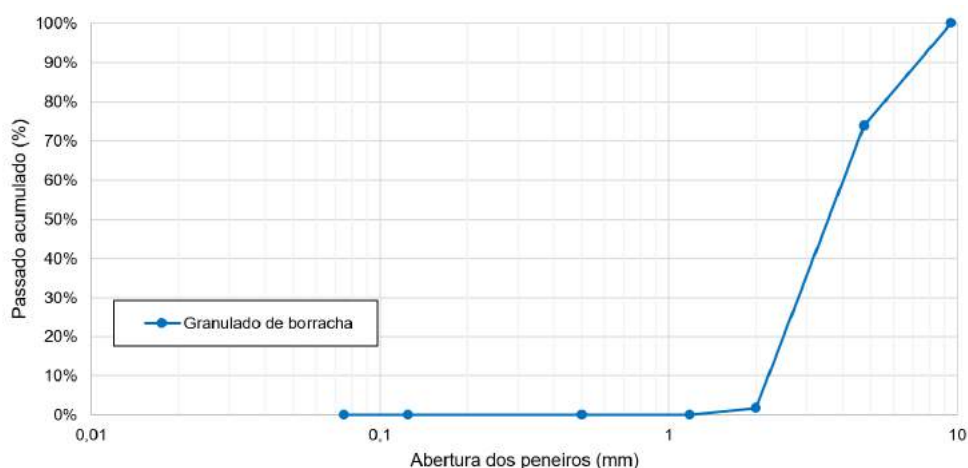


Figura 3.5: Curva granulométrica do granulado de borracha.

→ **Massa volúmica**

A massa volúmica foi obtida, tal como o pó de pedra, segundo a norma NP EN 1097-6 [84], foi de 1121 kg/m^3 .

3.1.2.3 Granulado de cortiça

O granulado de cortiça (Figura 3.6) foi originalmente cedido pela Fabricor - Indústria, Preparação e Transformação de Cortiça, S.A. à engenheira Ana Margarida Brás, que após

realização dos seus estudos cedeu o material sobran­te para a elaboração do presente estudo. O granulado apresenta uma coloração mais escura que o usual, devido a ter sido colocado numa estufa a 200°C, durante os estudos anteriores.



Figura 3.6: Granulados de borracha e cortiça.

→ Análise granulométrica

A análise granulométrica deste granulado foi realizada por peneiração mecânica, segundo o método descrito na norma ISO 2030 [85], mas utilizando os peneiros da série ASTM. A amostra de ensaio foi obtida segundo a norma acima referida. Coloca-se a amostra numa coluna de peneiros da série ASTM, disposta por ordem decrescente do topo para a base da dimensão das aberturas dos peneiros. Inicialmente, submete-se o conjunto a agitação mecânica, sendo posteriormente sujeito a jatos de ar comprimido, para que todas as partículas fiquem soltas das malhas dos peneiros. Por fim, pesa-se o material retido em cada peneiro. Com as massas registadas anteriormente, são calculadas as percentagens de massa passada em cada um dos peneiros e traça-se a curva granulométrica correspondente (Figura 3.7).

Após análise da curva granulométrica determinou-se, através da norma NP EN 933-1 [82], que a dimensão do granulado é 1,18/4 mm.

→ Massa volúmica

Considerou-se que a massa volúmica do granulado de cortiça é 190 kg/m^3 , sendo que este valor foi retirado da literatura [42].

3.1.3 Fíler

Neste estudo utilizaram-se dois tipos de fíler: recuperado e comercial (Figura 3.8). O fíler recuperado a empregar nestas argamassas betuminosas foi obtido como foi referido e descrito anteriormente na secção 3.1.2.1. O fíler comercial é cal hidráulica, que se trata de uma cal natural produzida em Portugal, cuja denominação é NHL5, e foi fornecido

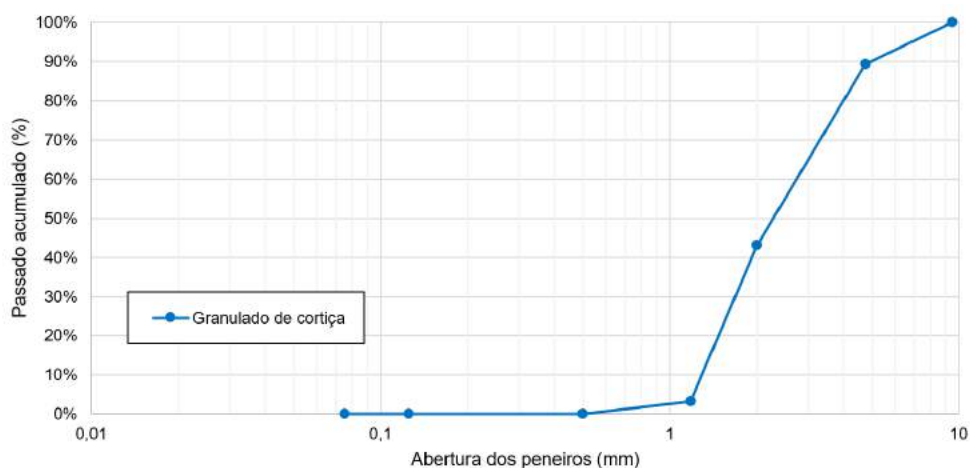


Figura 3.7: Curva granulométrica do granulado de cortiça.

pela SECIL - Companhia Geral de Cal e Cimento S.A. A declaração de conformidade CE do fíler NHL5 encontra-se no Anexo II.



Figura 3.8: Fíler recuperado (a) e cal hidráulica (b).

→ **Análise granulométrica**

Os métodos utilizados para a determinação desta propriedade foram obtidos de duas formas: para o fíler comercial, a cal hidráulica (NHL5), os valores foram retirados de Antunes [23], para o fíler recuperado os valores foram determinados experimentalmente segundo a norma NP EN 933-10 [20].

Para o fíler recuperado realizou-se o procedimento descrito na norma acima referida. Coloca-se uma amostra seca no peneiro 0,075 mm ajustado no aparelho de peneiramento a jato de ar e é peneirada até que a peneiração esteja concluída (no mínimo, 3 min). A massa retida é registada e colocada no peneiro 0,125 mm para posterior peneiração. Regista-se a massa retida novamente e são calculadas as percentagens de massa passada em cada um dos peneiros.

Os resultados destes dois métodos são apresentados em seguida na Tabela 3.3.

→ **Massa volúmica**

Na Tabela 3.4 estão apresentadas as massas volúmicas do fíler NHL5 utilizado no

Tabela 3.3: Análise granulométrica dos fíleres NHL5 (retirado de Antunes [23]) e recuperado.

Fíler	Passado acumulado (%)	Abertura de peneiros (mm)
NHL5	100	2
	93	0,125
	79	0,075
Recuperado	100	2
	86	0,125
	81	0,075

presente estudo, que consta do estudo realizado por Antunes [23], e do fíler recuperado de origem calcária, determinada através do método do picnómetro, segundo a NP EN 1097-7 [22]. Neste método do picnómetro reduz-se as amostras conforme a norma NP EN 932-2 [83] de forma a se obter uma massa mínima de 50g antes da secagem. Seca-se o provete em estufa ventilada até se obter massa constante e deixa-se arrefecer o mesmo num exsiccador. Faz-se uma peneiração e conservam-se todas as partículas que passam no peneiro 0,125mm. Durante a realização deste ensaio utilizou-se água destilada a 25°C, como líquido de massa volúmica conhecida. Em seguida, pesa-se o picnómetro limpo e seco com a tampa (m_0). Enche-se o picnómetro com 10g de amostra de fíler e pesa-se novamente o picnómetro (m_1). Após estas duas pesagens, adiciona-se água destilada suficiente para cobrir completamente a amostra, tapa-se o picnómetro e coloca-se no exsiccador a vácuo durante 30 min a uma pressão de 3,0 kPa. Findo esse tempo, descarrega-se a bomba de vácuo e retira-se o picnómetro do exsiccador. Completa-se o enchimento com água destilada e coloca-se o picnómetro em banho-maria a 25°C durante 60 min. Concluída esta etapa, retira-se o picnómetro do banho-maria, tapa-se e seca-se o exterior. Por fim, pesa-se a massa total do picnómetro com a água, o provete de 10g e a sua respectiva tampa (m_2).

Para o cálculo da massa volúmica do fíler utiliza-se a seguinte expressão:

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_w}} \quad (3.5)$$

Em que, m_0 é a massa do picnómetro vazio com a sua tampa, m_1 é a massa do picnómetro com o provete de fíler, m_2 é a massa do picnómetro com o provete de fíler e cheio de água, V é o volume do picnómetro, ρ_w é a massa volúmica da água a 25°C e ρ_f é a massa volúmica do fíler a 25°C.

Tabela 3.4: Propriedades dos fíleres NHL5 (retirado de Antunes [23]) e recuperado.

Fíler	Massa volúmica das partículas (kg/m ³)
Cal hidráulica - NHL5	2690
Fíler recuperado	2880

3.2 Fabrico dos provetes de argamassas betuminosas

Neste estudo produziram-se 18 argamassas betuminosas, formuladas como se pode ver no diagrama de composição dos provetes (Figura 3.9).

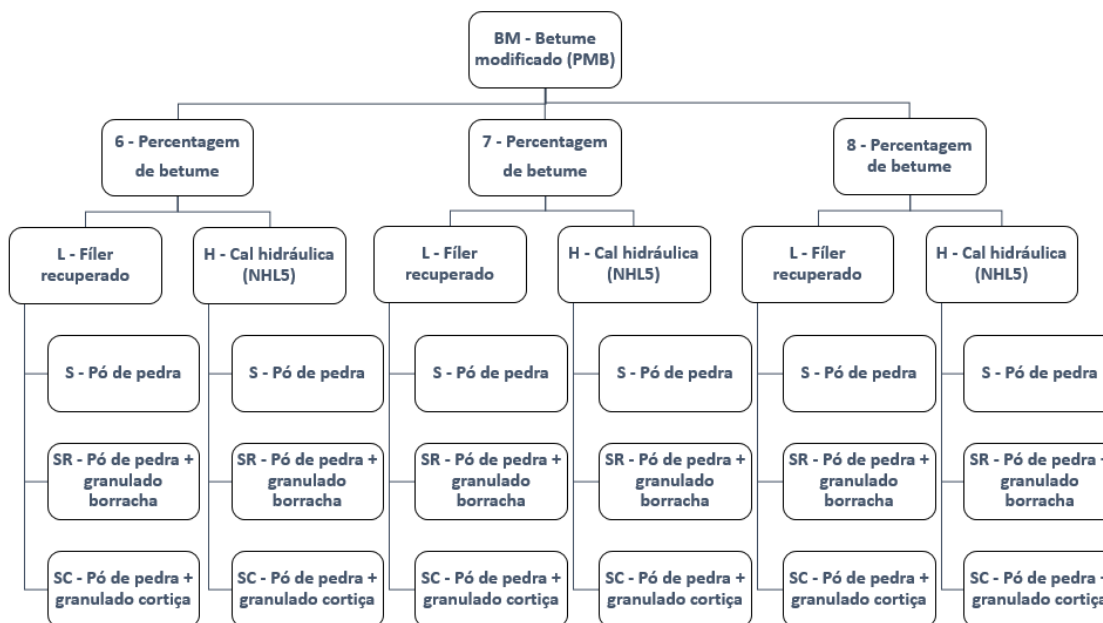


Figura 3.9: Diagrama de composição dos provetes.

Como se pode observar no diagrama de composição dos provetes (Figura 3.9), foi criada a seguinte designação para identificação dos provetes:

- **BM7|H|SR** - BM7 de percentagem de betume de 7,41%; **H** de fíler de cal hidráulica; **SR** de pó de pedra + granulado de borracha.

3.2.1 Composição das argamassas betuminosas

Como mencionado anteriormente, este trabalho baseou-se no estudo de S. Pereira et al. [50], no qual se analisou o desempenho mecânico de misturas betuminosas produzidas com substituição parcial de agregados com granulados de cortiça ou borracha. No referido estudo foram realizadas substituições parciais (3%, em massa) de agregado pelos granulados supracitados.

No presente trabalho, para se evidenciar o comportamento dos granulados de borracha e cortiça na mistura optou-se por se substituir 10% dos agregados, em massa, por granulados de cortiça ou borracha. Ou seja, obteve-se três composições de agregados: 100% pó de pedra ou 90% pó de pedra + 10% de granulado de borracha ou 90% pó de pedra + 10% de granulado de cortiça.

Adicionalmente, considerou-se a combinação dos seguintes elementos:

- Dois tipos de filer, cal hidráulica e filer recuperado, usando relação filer-betume, em massa, de 1:1;
- três percentagens de betume: 6,54%, 7,41% e 8,26% (respetivamente, teores de betume de: 7%, 8% e 9%).

Para a determinação das quantidades, em massa, de agregados e betume que enchem o molde metálico cilíndrico foi utilizada a Equação 3.6. Em que $M_{agregado}$ é a massa de agregado, M_{betume} é a massa de betume, V_{molde} é o volume do molde metálico cilíndrico e $\rho_{provetete}$ é a massa volúmica teórica do provete após compactação.

$$M_{agregado} + M_{betume} = V_{molde} \times \rho_{provetete} \quad (3.6)$$

As quantidades de filer foram obtidas pela Equação 3.7, que como se pode observar a massa de filer (M_{filer}) é igual à massa de betume (M_{betume}) devido à relação ser 1:1.

$$\left(\frac{f}{b}\right)_m = 1 \Rightarrow M_{filer} = M_{betume} \quad (3.7)$$

Para o cálculo das massas de agregado e sua substituição parcial por granulados foi empregue a Equação 3.8, onde se manteve o volume total de agregados inicial (Figura 3.10) e se substituiu 10% da massa de pó de pedra da mistura final por granulados.

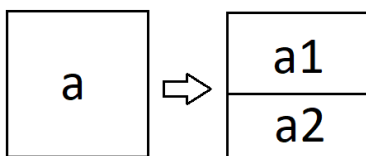


Figura 3.10: Esquema de volumes dos agregados antes e após substituição.

$$\begin{cases} \frac{W_a}{\rho_a} = \frac{W_{a1}}{\rho_{a1}} + \frac{W_{a2}}{\rho_{a2}} \\ W_{a2} = \%gran \times W_{a1} \end{cases} \quad (3.8)$$

Na Equação 3.8, W_a é a massa de pó de pedra inicial, ρ_a é a massa volúmica do pó de pedra, W_{a1} é a massa de pó de pedra final, ρ_{a1} é a massa volúmica de pó de pedra, W_{a2} é a massa de granulado, ρ_{a2} é a massa volúmica do granulado e $\%gran$ é a percentagem de substituição.

Como resultado das expressões anteriores foram obtidas as composições mássicas dos provetes de argamassas betuminosas que se podem observar na Tabela 3.5.

Depois de estarem definidas as composições das argamassas definiram-se as curvas granulométricas da composição do agregado fino mineral com os granulados de borracha e de cortiça e os fileres, como se pode verificar na Figura 3.11.

Tabela 3.5: Composição mássica dos provetes de argamassas betuminosas.

Designação do provete	% Massa de betume	% Massa de fíler	% Massa de pó de pedra	% Massa de granulado de borracha	% Massa de granulado de cortiça
	P _b (%)	P _f (%)	P _a (%)	P _R (%)	P _C (%)
BM6 L S	6,54	6,54	86,92	-	-
BM6 H S	6,54	6,54	86,92	-	-
BM7 L S	7,41	7,41	85,19	-	-
BM7 H S	7,41	7,41	85,19	-	-
BM8 L S	8,26	8,26	83,49	-	-
BM8 H S	8,26	8,26	83,49	-	-
BM6 L SR	6,54	6,54	79,01	7,90	-
BM6 H SR	6,54	6,54	79,01	7,90	-
BM7 L SR	7,41	7,41	77,44	7,74	-
BM7 H SR	7,41	7,41	77,44	7,74	-
BM8 L SR	8,26	8,26	75,90	7,59	-
BM8 H SR	8,26	8,26	75,90	7,59	-
BM6 L SC	6,54	6,54	79,01	-	7,90
BM6 H SC	6,54	6,54	79,01	-	7,90
BM7 L SC	7,41	7,41	77,44	-	7,74
BM7 H SC	7,41	7,41	77,44	-	7,74
BM8 L SC	8,26	8,26	75,90	-	7,59
BM8 H SC	8,26	8,26	75,90	-	7,59

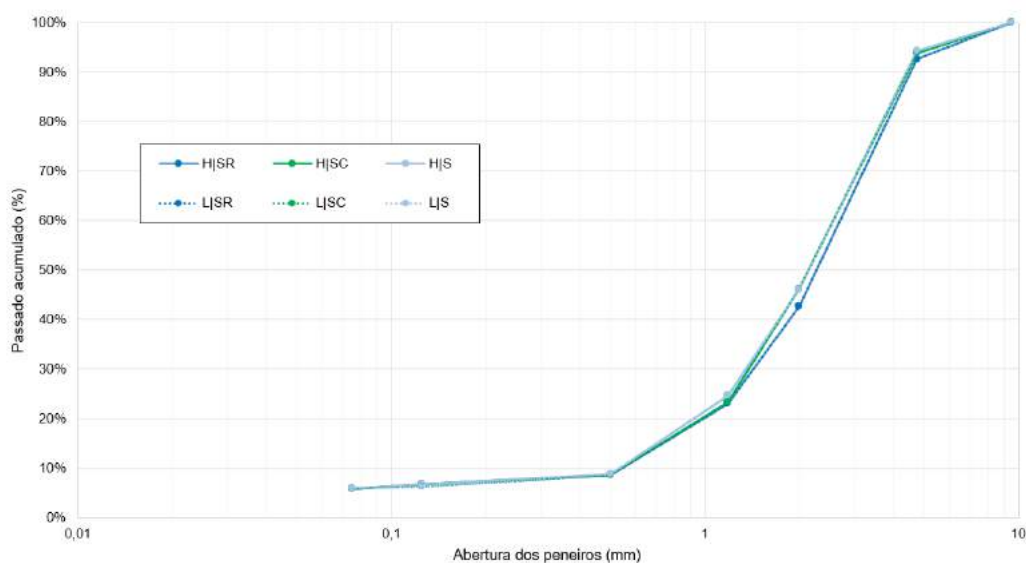


Figura 3.11: Curva granulométrica da composição do agregado fino mineral com os granulados de borracha e de cortiça e os fíleres.

3.2.2 Preparação de sub-amostras de betume

Após verificação da quantidade de sub-amostras sobrantes dos trabalhos de Guerra [3] e Moreno [4], verificou-se que existia quantidade suficiente para realizar este estudo, pelo que não foi necessário proceder à sua preparação. Contudo este procedimento encontra-se descrito nos trabalhos dos autores anteriormente referidos.

3.2.3 Compactação dos provetes

No presente trabalho houve a necessidade de se fazer um pequeno estudo experimental sobre o método e tempo de compactação dos provetes de argamassa betuminosa, devido a não existir indicação sobre os métodos de fabrico e compactação dos provetes realizados no estudo de S. Pereira et al. [50] e a existirem restrições ao nível de equipamentos disponíveis nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil (DEC).

Em virtude das razões apontadas previamente, optou por se aproveitar o molde metálico cilíndrico utilizado anteriormente por Moreno [4] com as seguintes dimensões (Figura 3.12 (a)):

- Diâmetro: 50 mm;
- Altura: 100 mm.

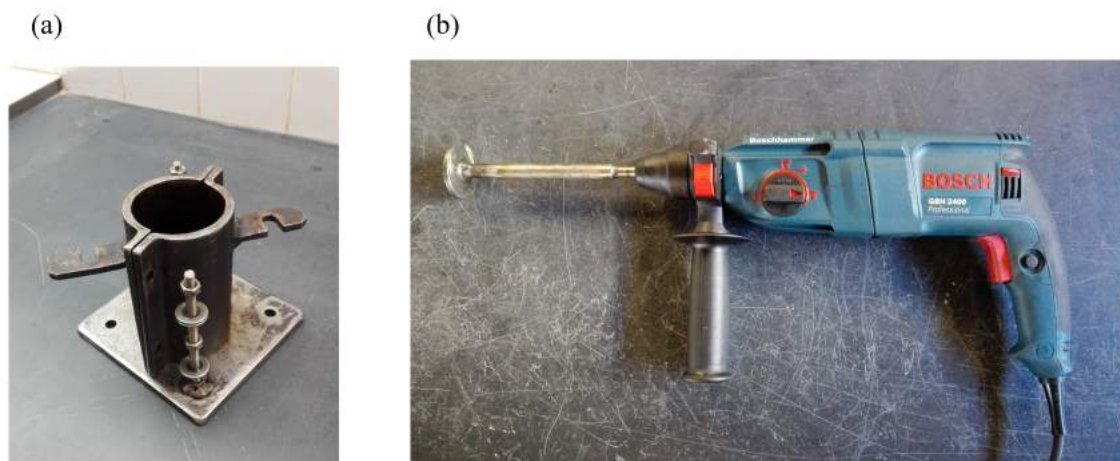


Figura 3.12: Molde metálico cilíndrico (a) e equipamento de compactação - martelo perfurador com acessório de cinzelagem adaptado (b).

Como equipamento de compactação foi utilizado um martelo perfurador com as seguintes características:

- Potência absorvida : 720 W;
- Energia de impacto individual, máx. : 2,7 J;
- Peso : 2,8 kg.

O equipamento, em cima referido, foi utilizado com o seu acessório de cinzelagem adaptado para a função de compactação dos provetes conforme a Figura 3.12 (b).

Quanto ao método de compactação dos provetes, este foi baseado nos estudos de Micaelo [86], de Matos [87], de Gameiro [88] e na norma EN 12697-32 [89], com as devidas adaptações às condições existentes, dos quais se retirou o intervalo de temperaturas de compactação (150°C a 160°C), o procedimento de compactação e o método de ensaio da compactabilidade.

Nesta atividade foram testados três diferentes períodos de tempo de compactação (5s, 10s e 20s) e dois diferentes métodos de compactação (num topo ou nos dois topos).

Iniciou-se o trabalho através da utilização no método de compactação apenas num dos topos do provete e um tempo de compactação de 20 segundos, que face à análise posterior da massa volúmica em diferentes secções transversais do provete verificou-se não se obter uma compactação homogénea de todo o provete. Por este motivo este método foi desde logo abandonado.

Em alternativa foi testado o segundo método, compactação nos dois topos do provete, fazendo variar a duração dos tempos de compactação indicados anteriormente. Seguidamente, foram seccionados os provetes, obtendo-se três secções cilíndricas (Figura 3.13): secção superior (Topo 1), secção central (Centro) e secção inferior (Topo 2). Para cada uma destas secções, através da aplicação do método B (proвете saturado com superfície seca) da norma EN 12697-6 [90], foram obtidas as massas volúmicas e a respectiva comparação entre as diferentes secções cujos resultados constam da Tabela 3.6.



Figura 3.13: Proвете seccionado.

Após análise dos resultados obtidos foi selecionado o tempo de compactação de 10 segundos como tempo de referência para a preparação dos provetes de argamassas betuminosas. O critério utilizado para a seleção do tempo de compactação foi o menor tempo para o qual deixaram de existir variações significativas de massa volúmica entre secções, ou seja, menor coeficiente de variação. A importância da escolha de tempos de compactação de menor duração admissível está relacionado com a menor variação da

Tabela 3.6: Massa volúmica das secções cilíndricas do provete *BM7|H|SR* em função dos períodos de tempo de compactação.

Massa volúmica (kg/m ³)	Tempo de compactação (s)		
	5	10	20
ρ_{dry} (Topo 1)	1907,35	1873,64	1888,71
ρ_{dry} (Centro)	1834,55	1838,46	1827,06
ρ_{dry} (Topo 2)	1845,21	1876,24	1880,51
Média	1862,37	1862,78	1865,427
Desvio padrão	32,10	17,23	27,34
Coefficiente de variação	1,72%	0,92%	1,47%

temperatura após retirada da argamassa betuminosa da estufa e sua colocação dentro do molde metálico. Procurando, deste modo, que a mistura nunca atingisse temperaturas inferiores a 150°C.

Com o objectivo de garantir as temperaturas, durante este processo, entre os 160°C a 150°C foi utilizado um termómetro por raios infravermelhos, como apresenta a Figura 3.14.



Figura 3.14: Termómetro por infravermelhos.

3.2.4 Preparação dos provetes de argamassas betuminosas

Após a formulação da argamassa betuminosa padrão foram preparados os provetes de ensaio determinando-se as quantidades (em massa) de ligante betuminoso, de pó de pedra e de fíler mineral a utilizar em cada provete.

Por ausência de norma relativa o fabrico de argamassas betuminosas o procedimento adotado baseou-se na norma NP EN 12594 [91] indicada para betumes e nos procedimentos efetuados por Guerra [3] e Moreno [4]. A norma define quais as limitações durante o dito processo, quanto à temperatura a utilizar na estufa e aos períodos de aquecimento.

Em seguida será explicado o procedimento adotado para a realização das argamassas betuminosas. Para se preparar estes provetes foi necessário reaquecer as sub-amostras obtidas anteriormente, guiando-se pelo seguinte procedimento:

1. Colocar a sub-amostra de betume na estufa de aquecimento durante uma hora sobre um tabuleiro metálico revestido de papel de alumínio e furar o papel de alumínio

que cobre a lata superiormente facilitando a entrada de calor, a uma temperatura de 90°C + temperatura de amolecimento do betume (160°C) e a dez minutos do fim colocar um recipiente com os agregados e o filer pretendidos para o fabrico da argamassa;

2. Ao fim de uma hora na estufa, retirar os materiais com auxílio de luvas térmicas próprias, misturar, por via seca, os agregados e o filer após sua pesagem à saída da estufa. Verter a quantidade de betume previamente determinada no recipiente metálico próprio colocado sobre a balança, e colocar de imediato a mistura de agregados e filer realizada previamente;
3. Depois de vertidas as quantidades exatas dos componentes da argamassa, colocar o recipiente sobre um disco de aquecimento previamente aquecido e efetuar a mistura dos materiais recorrendo a um dispositivo próprio durante cerca de cinco minutos, de modo a garantir a homogeneização da mistura obtida (Figura 3.15);

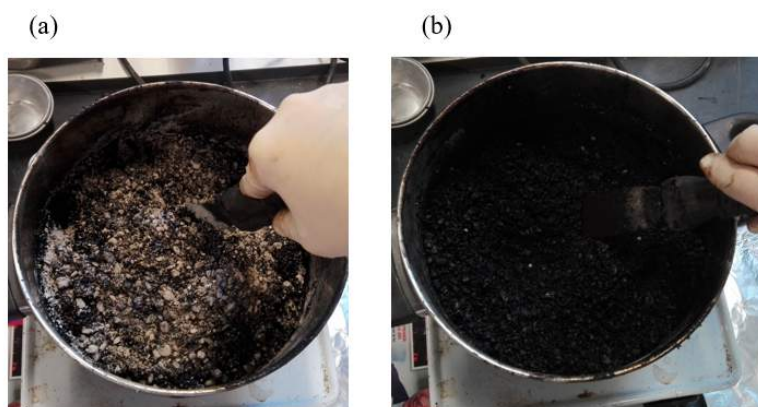


Figura 3.15: Início da mistura da argamassa (a) e mistura da argamassa homogeneizada (b).

4. Após terminado o período de mistura dos materiais, colocar o recipiente na estufa durante 5 minutos, para melhor uniformizar a mistura e garantir uma viscosidade mais adequada;
5. Retirar o recipiente da estufa com as luvas térmicas e de seguida colocar a mistura obtida, com auxílio dum utensílio próprio, no molde cilíndrico metálico que foi previamente lubrificado e aparafusado à base (Figura 3.16 (a));
6. Compactar o topo do provete durante 10 segundos com dispositivo de compactação apropriado;
7. Virar o molde ao contrário, encaixar novamente na base e compactar o outro topo do provete durante 10 segundos (Figura 3.16 (b));

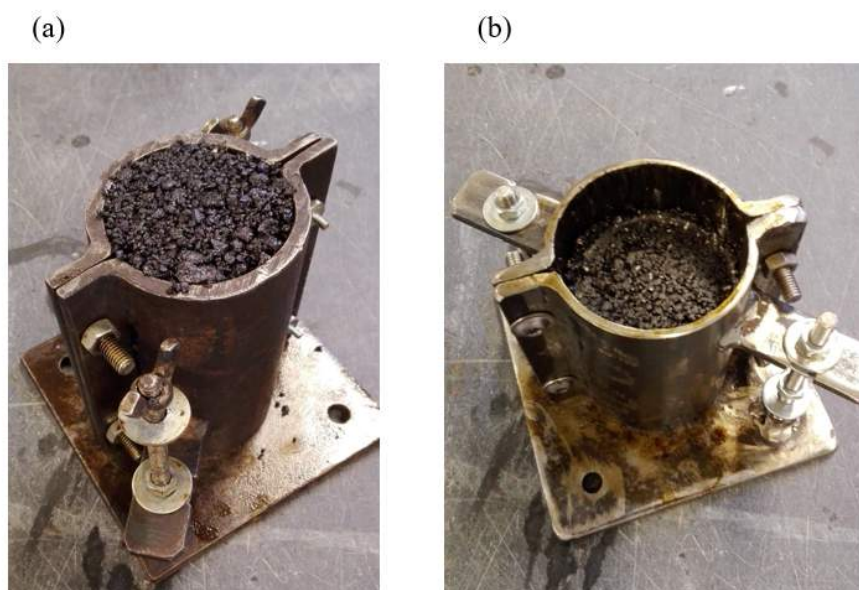


Figura 3.16: Provete antes da compactação (a) e provete após compactação (b).

8. Deixar arrefecer o provete dentro do molde até aos 40°C. Para desmoldagem do provete, retirar o molde da base e desaparafusar as suas faces. Com cuidado, destacar as faces do molde do provete.

Assim, após a desmoldagem obtiveram-se, para cada tipo de argamassa betuminosa, provetes com uma geometria cilíndrica, como se pode observar na Figura 3.17.

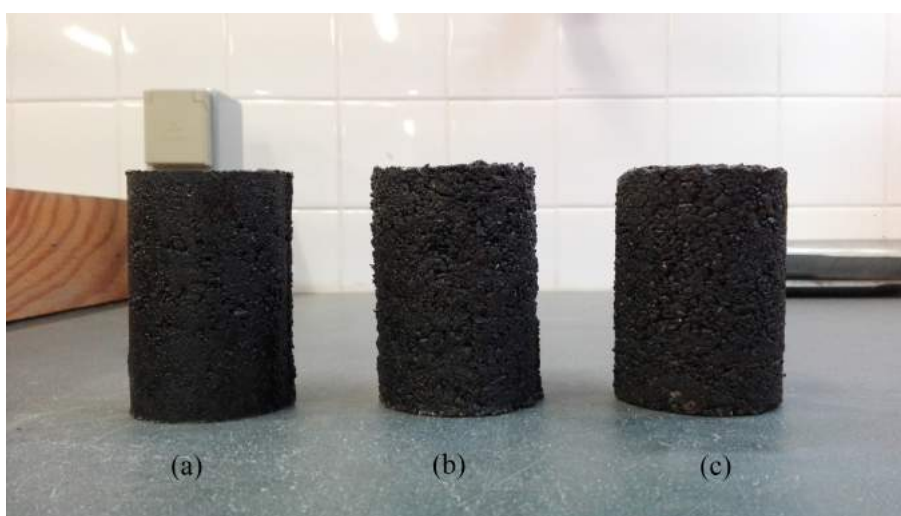


Figura 3.17: Provete de argamassa de pó de pedra (a), provete de argamassa de pó de pedra e granulado de borracha (b) e provete de pó de pedra e granulado de cortiça (c).

3.3 Caracterização dos provetes

A caracterização dos provetes de argamassas betuminosas foi realizada com base na determinação das dimensões dos provetes, da massa volúmica, no cálculo do volume de vazios, do volume de vazios na mistura de agregados e da percentagem de vazios preenchidos com betume.

Massa volúmica

A norma de ensaio EN 12697-6 [90] define os métodos para a determinação da massa volúmica de provetes betuminosos compactados. Esta descreve quatro métodos de ensaio, cuja aplicação varia consoante o tipo de mistura betuminosa a ensaiar. Os métodos de ensaio podem ser aplicáveis à utilização de provetes compactados fabricados em laboratório ou de tarolos retirados do pavimento após colocação e compactação.

Os métodos mais utilizados nos estudos de formulação em Portugal são os métodos B e D da norma de ensaio, mas uma vez que os provetes para além deste ensaio ainda teriam de ser empregues nos ensaios para determinação das características mecânicas, optou-se por realizar somente o método D, que se trata dum método geométrico, para que não fossem afetados os resultados dos ensaios seguintes.

Para se determinar a massa volúmica de cada provete foram executados os seguintes procedimentos indicados na norma de ensaio:

- Efetuaram-se quatro medições, igualmente espaçadas, para a dimensão altura, medindo, com auxílio duma craveira, aproximadamente a 10 mm, para dentro, do bordo do provete;
- Realizaram-se duas medições ao diâmetro perpendiculares entre si no topo, no centro e na base do provete, com auxílio duma craveira;
- Determinaram-se a massa do provete seco (m_1), com auxílio duma balança;
- Calcularam-se a massa volúmica do provete ($\rho_{b,dim}$) através da Equação 3.9.

As dimensões dos provetes foram determinadas em milímetros e para todas as dimensões foram calculadas as respectivas médias. A determinação das dimensões dos provetes seguiu o procedimento indicado na norma EN 12697-29 [92].

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad (3.9)$$

Em que $\rho_{b,dim}$ é a massa volúmica do provete pelo método geométrico (kg/m^3), m_1 é a massa do provete seco (g), h é a média das alturas do provete (mm) e d é a média dos diâmetros do provete (mm).

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES

Depois de determinadas as massas volúmicas dos provetes foi possível obter-se a sua composição volumétrica, como se pode observar na Tabela 3.7, calculada através das massas volúmicas dos materiais e das suas percentagens na composição das argamassas.

Tabela 3.7: Composição volumétrica dos provetes de argamassas betuminosas compactados.

Designação do provete	% Volume de betume	% Volume de filler	% Volume de pó de pedra	% Volume de granulado de borracha	% Volume de granulado de cortiça	% Volume de vazios
	v_b (%)	v_f (%)	v_a (%)	v_R (%)	v_C (%)	v_v (%)
BM6 L S	14,58	5,21	74,15	-	-	6,06
BM6 H S	14,58	5,58	74,15	-	-	5,69
BM7 L S	16,65	5,96	73,32	-	-	4,07
BM7 H S	16,65	6,38	73,32	-	-	3,65
BM8 L S	18,36	6,57	71,10	-	-	3,97
BM8 H S	18,36	7,03	71,10	-	-	3,51
BM6 L SR	11,48	4,10	53,08	12,74	-	18,60
BM6 H SR	11,63	4,45	53,78	12,91	-	17,23
BM7 L SR	13,04	4,66	52,21	12,53	-	17,56
BM7 H SR	13,27	5,08	53,12	12,75	-	15,78
BM8 L SR	14,68	5,25	51,67	12,40	-	16,00
BM8 H SR	14,93	5,72	52,56	12,61	-	14,17
BM6 L SC	5,80	2,08	26,84	-	38,00	27,28
BM6 H SC	6,14	2,35	28,37	-	40,17	22,97
BM7 L SC	6,89	2,46	27,59	-	39,06	24,00
BM7 H SC	7,44	2,85	29,80	-	42,19	17,71
BM8 L SC	7,94	2,84	27,96	-	39,59	21,67
BM8 H SC	8,78	3,36	30,91	-	43,77	13,17

Volume de vazios

O volume de vazios (V_m) é o volume de ar retido entre as partículas de agregado e de betume de uma mistura betuminosa compactada, expresso como uma percentagem do volume total da mistura. Segundo a norma EN 12697-8 [93], o volume de vazios pode ser calculado através da massa volúmica máxima teórica da mistura betuminosa (ρ_m) e da massa volúmica do provete, pela seguinte expressão:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (3.10)$$

Em que V_m é o volume de vazios do provete, expresso como uma percentagem do volume total da mistura (%), ρ_m é a massa volúmica máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m^3) e ρ_b é a massa volúmica do provete (kg/m^3).

A massa volúmica máxima teórica da mistura betuminosa foi calculada, segundo a norma EN 12697-5 [94], pelo método matemático:

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{p_B}{\rho_B} + \frac{p_f}{\rho_f} + \sum_{i=1}^n \frac{p_{ai}}{\rho_{ai}}} \quad (3.11)$$

Em que p_B é a percentagem de betume na mistura (%), ρ_B é a massa volúmica do betume (kg/m^3), p_f é a percentagem de fíler na mistura (%), ρ_f é a massa volúmica do fíler (kg/m^3), p_{ai} é a percentagem do agregado do tipo i (%) e ρ_{ai} é a massa volúmica do agregado do tipo i (kg/m^3).

Volume de vazios na mistura de agregados

O volume de vazios na mistura de agregados (VMA) corresponde ao volume dos vazios intergranulares entre as partículas de agregados de uma mistura betuminosa compactada, que inclui o volume de vazios e o volume de betume da mistura, expresso como uma percentagem do volume total da mistura. Segundo a norma EN 12697-8 [93], o VMA pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$VMA = V_m + p_B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \quad (3.12)$$

Em que V_m é o volume de vazios (%), p_B é a percentagem de betume na mistura (%), ρ_b é a massa volúmica do provete (kg/m^3) e ρ_B é a massa volúmica do betume (kg/m^3).

Percentagem de vazios preenchidos com betume

A Percentagem de Vazios preenchidos com Betume (*Voids Filled with Bitumen*) (VFB) diz respeito à percentagem de vazios na mistura de agregados, preenchidos com betume. Segundo a norma EN 12697-8 [93], a VFB pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$VFB = \frac{p_B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}}{VMA} \times 100 \quad (3.13)$$

Em que p_B é a percentagem de betume na mistura (%), ρ_b é a massa volúmica do provete (kg/m^3), ρ_B é a massa volúmica do betume (kg/m^3) e VMA é o volume de vazios na mistura de agregados (%).

3.4 Análise acústica

A avaliação do ruído foi realizada através da medição da pressão sonora, com auxílio dum sonómetro (Figura 3.18), dos provetes que foram sujeitos aos impactos efetuados por uma

máquina de percussão (Figura 3.19). Para além dos provetes de argamassas betuminosas, também foram analisados: um provete de betão (com 10cm de altura) e um barrote de madeira de pinho (com 8cm de altura), para comparação de resultados (Figura 3.20).



Figura 3.18: Sonómetro.

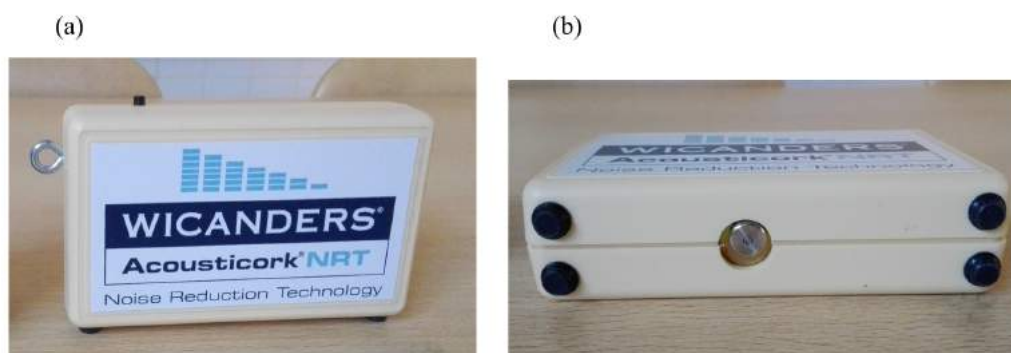


Figura 3.19: Máquina de percussão: Em posição de ensaio (a) e vista da peça percussora(b).

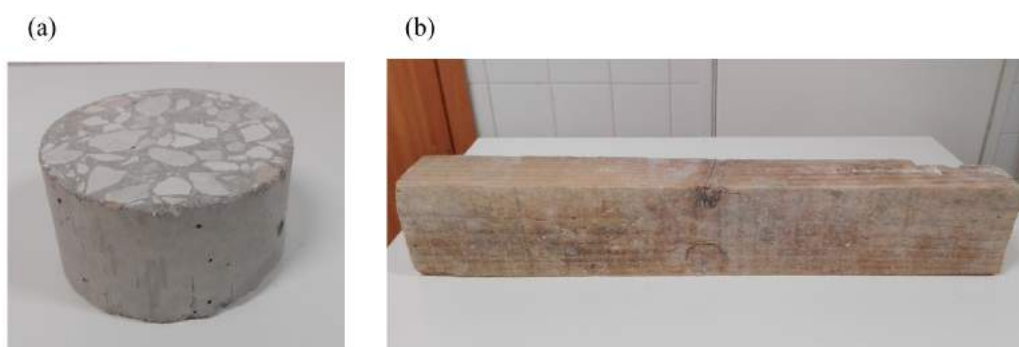


Figura 3.20: Amostras para comparação de resultados: Provete de betão (a) e barrote de madeira de pinho (b).

O procedimento adotado para a medição da pressão sonora foi o seguinte:

1. Medir o ruído ambiente, ligando o sonómetro durante 10s e registando o nível de pressão sonora máximo atingido;
2. Colocar o provete no suporte de ensaio, ajustar a altura e nivelamento do suporte;

3. Ligar a máquina de percussão e em seguida o sonómetro durante 10s (Figura 3.21);
4. Registrar o nível de pressão sonora máximo atingido (L_{max});
5. Repetir o ensaio para outros dois pontos do topo do provete.



Figura 3.21: Ensaio de medição da pressão sonora.

3.5 Ensaios mecânicos monotónicos de compressão

Para se analisar a resistência mecânica e a deformabilidade das argamassas betuminosas com incorporação de outros materiais (granulado de borracha ou granulado de cortiça) foram realizados ensaios de compressão uniaxial com aplicação de carga monotónica crescente. Este ensaio foi realizado com controlo de deslocamento, impondo um aumento de deformação (ou extensão) a uma dada "velocidade de deformação". As velocidades utilizadas foram de $0,005 \text{ mm/seg}$ ou $0,08 \text{ mm/seg}$. Escolheram-se estes valores, pois foram os extremos de velocidade que Moreno [4] aplicou no seu estudo.

As temperaturas de ensaio foram: 25°C ou 40°C . Não foi possível a utilização de uma temperatura mínima de teste inferior a 25°C devido à temperatura ambiente no laboratório durante estes ensaios (funcionamento de outros equipamentos que aquecem o ar ambiente). Para temperatura de 40°C foi necessário a utilização de uma câmara de aquecimento, integrada no equipamento de ensaio, para controlo da temperatura.

Devido à grande quantidade de parâmetros necessários para definir as argamassas betuminosas a ensaiar, foi formulada seguinte terminologia:

- **BM6|L|SR|40|0,005** - **BM6** de percentagem de betume de 6,54%; **L** de fíler recuperado; **SR** de pó de pedra + granulado de borracha; **40°C** a temperatura do ensaio e **0,005 mm/seg.** a velocidade de ensaio.

3.5. ENSAIOS MECÂNICOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO

Na Tabela 3.8 apresenta-se uma síntese de todos os parâmetros e siglas utilizadas nos ensaios monotônicos.

Tabela 3.8: Síntese dos parâmetros e siglas utilizados nos ensaios monotônicos.

Parâmetro	Configuração de ensaio	Sigla
Porcentagem de betume [massa]	6,54% ou 7,41% ou 8,26%	BM6 ou BM7 ou BM8
Fíler	Fíler recuperado ou cal hidráulica	L ou H
Agregado	Pó de pedra ou Pó de pedra + granulado de borracha ou Pó de pedra + granulado de cortiça	S ou SR ou SC
Temperatura do ensaio	25°C ou 40°C	25 ou 40
Velocidade do ensaio	0,005 ou 0,08 mm/seg.	0,005 ou 0,08

Antes de iniciar cada ensaio, ficou garantido que os provetes atingiam um estado de equilíbrio térmico, deixando-os à temperatura de ensaio durante um período de 60 minutos. Os provetes foram colocados entre os pratos do equipamento, na posição vertical e para evitar/atenuar o atrito (efeito de barril) durante o ensaio, os topos dos provetes foram limpos e os pratos do equipamento de ensaio foram limpos e forrados com papel de alumínio, pois apresentavam alguma rugosidade.

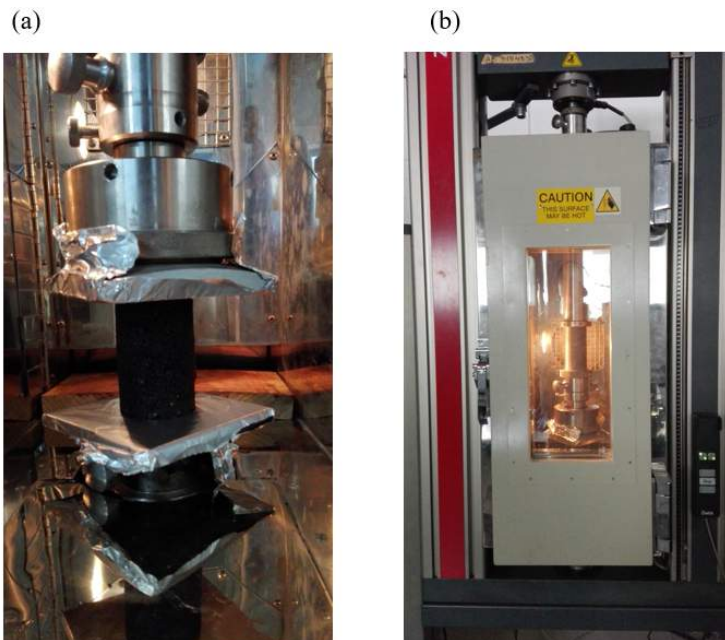


Figura 3.22: Ensaios de compressão uniaxial dos provetes de argamassas a 25°C (a) e a 40°C (b), o mecanismo de ensaio (Zwick) e a câmara de aquecimento para controlo de temperatura.

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

O critério de paragem do ensaio consistiu na cessação do ensaio quando fosse atingida uma deformação igual a 40% da sua altura (32 mm), pois considerou-se que durante esse intervalo todos os provetes atingiriam a rotura.

Após a realização dos ensaios foram recolhidos os valores da força exercida e da deformação apresentada pelo provete, durante o tempo do ensaio. De evidenciar que para cada tipo de argamassa com uma determinada percentagem de betume, tipo de filer e composição de agregados foram fabricados quatro provetes, prefazendo um total de 72 provetes ensaiados. A Figura 3.22 mostra os ensaios das argamassas a 25°C e 40°C, o mecanismo de ensaio (Zwick) e a câmara de aquecimento para controlo de temperatura.

3.6 Ensaios mecânicos cíclicos

Para se analisarem as características reológicas das argamassas betuminosas com incorporação de granulado de borracha e granulado de cortiça foram realizados ensaios cíclicos. Os procedimentos de ensaio utilizados foram adaptados da norma EN 12697-26 [59] para determinação do módulo de rigidez das argamassas betuminosas. Estes ensaios foram realizados impondo deformações de 0,1 e 0,2 mm. Ao serem utilizados estes valores assegura-se que o provete está longe de atingir a rotura, garantindo-se um comportamento viscoelástico linear. Na Figura 3.23 pode observar-se um ciclo completo do ensaio.

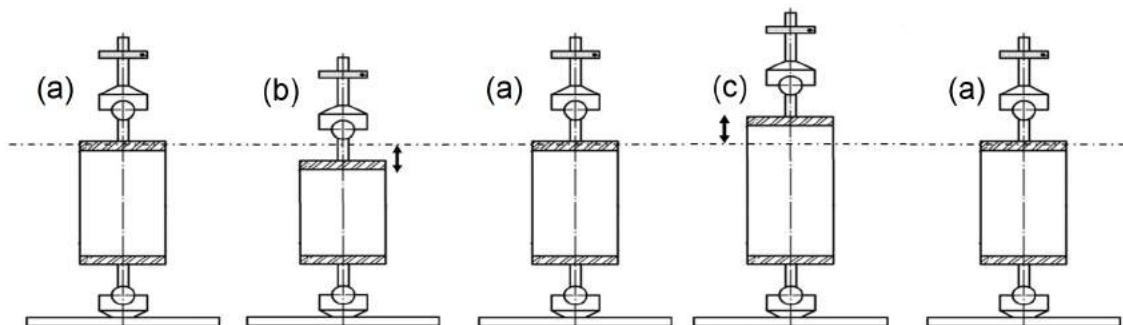


Figura 3.23: Esquema de um ciclo: posição inicial do provete (a), provete em compressão (b) e provete em tração (c) (adaptado de Moreno [4]).

As velocidades utilizadas foram: 0,005 mm/seg, 0,01 mm/seg, 0,02 mm/seg e 0,08 mm/seg, com frequências a variar entre 0,006 e 0,2 Hz. Foram utilizadas estas velocidades, pois foram as que Moreno [4] aplicou no seu estudo.

Quanto à temperatura de ensaio optou-se por se realizar a uma única temperatura, 25°C, devido ao elevado número de ensaios que iria gerar uma variação de temperaturas.

Tal como nos ensaios monotónicos, para estes ensaios também houve necessidade de se formular uma terminologia para definição de todos parâmetros de ensaio das argamassas betuminosas.

- **BM8|H|SC|25|0,2|0,08** - **BM8** de percentagem de betume de 8,26%; **H** de filer de cal hidráulica; **SC** de pó de pedra + granulado de cortiça; 25°C a temperatura do

ensaio; **0,2 mm** a deformação imposta e **0,08 mm/seg.** a velocidade de ensaio.

Na Tabela 3.9 apresenta-se uma síntese de todos os parâmetros e siglas utilizadas nos ensaios cíclicos.

Tabela 3.9: Síntese dos parâmetros e siglas utilizados nos ensaios cíclicos.

Parâmetro	Configuração de ensaio	Sigla
Percentagem de betume [massa]	6,54% ou 7,41% ou 8,26%	BM6 ou BM7 ou BM8
Fíler	Fíler recuperado ou cal hidráulica	L ou H
Agregado	Pó de pedra ou Pó de pedra + granulado de borracha ou Pó de pedra + granulado de cortiça	S ou SR ou SC
Temperatura do ensaio	25°C	25
Deformação imposta	0,1 ou 0,2 mm	0,1 ou 0,2
Velocidade do ensaio	0,005 ou 0,01 ou 0,02 ou 0,08 mm/seg.	0,005 ou 0,01 ou 0,02 ou 0,08

Para a realização destes ensaios os provetes de argamassas betuminosas necessitaram de uma prévia preparação. Essa preparação consistiu nas seguintes tarefas:

1. Preparação dos suportes de ensaio metálicos (Figura 3.24 (a)) para a colagem do provete, colocando os mesmos na estufa pré-aquecida a 180°C durante 15 minutos, para facilitar a sua limpeza;
2. Aplicação da cola, Araldite (Figura 3.24 (b)), nos dois topos do provete e nos dois suportes de ensaio metálicos. E colocação do provete centrado nos suportes de ensaio metálicos;
3. Aguardar um tempo de colagem de 8h antes de ensaiar.

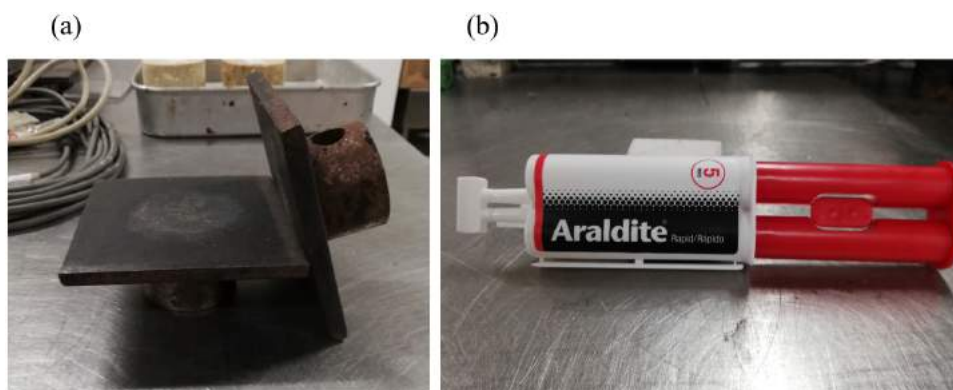


Figura 3.24: Materiais utilizados na preparação prévia dos ensaios cíclicos: (a) suportes de ensaio metálicos e (b) cola Araldite.

Antes de iniciar cada ensaio, ficou garantido que os provetes atingiam um estado de equilíbrio térmico, deixando-os à temperatura de ensaio durante um período de 60 minutos. Em cada ensaio foram realizados onze ciclos de forma a garantir uma estabilização

de comportamento do provete, desconsiderando-se o primeiro ciclo dado corresponder ao período de arranque. Após a realização de cada ensaio foram recolhidos os valores da força exercida e da deformação apresentada pelo provete, durante o tempo do ensaio. De salientar que para cada tipo de argamassa com uma determinada percentagem de betume, tipo de fíler e composição de agregados foram fabricados três provetes, prefazendo um total de 54 provetes, tendo sido ensaiados somente 18 provetes (um de cada tipo de argamassa) devido a ter ocorrido uma avaria prolongada do equipamento de ensaio. A Figura 3.25 mostra os ensaios cíclicos a 25°C no equipamento de ensaio (Zwick).

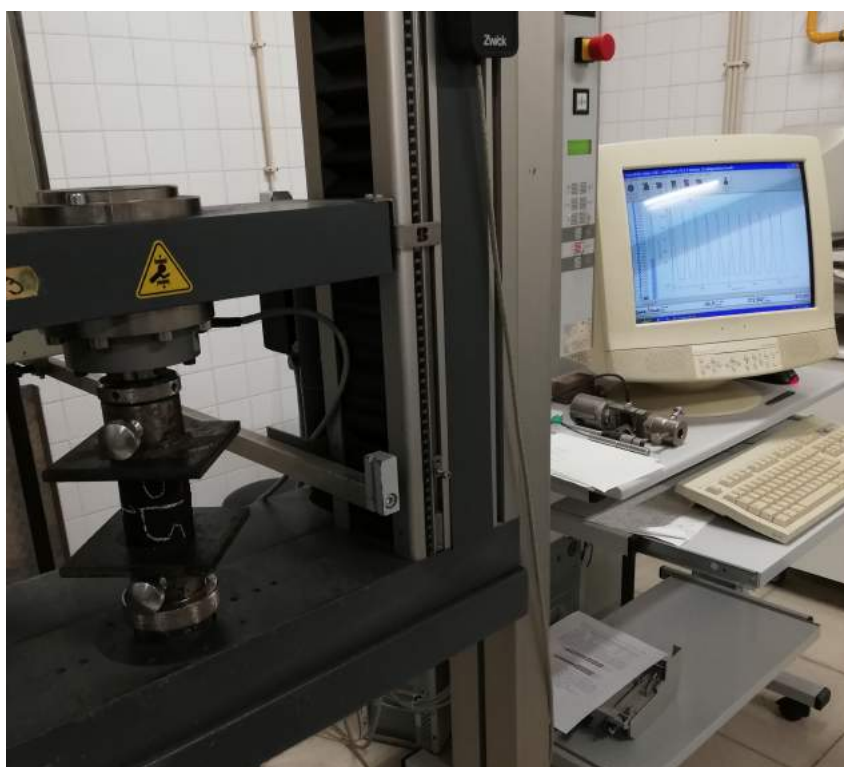


Figura 3.25: Ensaio cíclicos a 25°C no equipamento de ensaio Zwick.

Os valores do módulo complexo e do ângulo de fase foram obtidos através do método dos mínimos quadrados do estudo NCHRP D09-29 [95], que gera uma regressão sinusoidal que se ajusta à curva do ensaio. Para se obterem os valores do módulo complexo e do ângulo de fase seguiram-se as seguintes etapas:

Na primeira etapa centram-se os dados para cada transdutor, subtraindo a média ao valor obtido no ensaio:

$$Y'_{ji} = Y_{ji} - \bar{Y}_j \quad (3.14)$$

Onde Y'_{ji} é o valor centrado para o transdutor j para o tempo i , Y_{ji} é o valor do transdutor para o tempo i e \bar{Y}_j é a média para o transdutor j .

Na segunda etapa do procedimento, a matriz $[X' \quad X]$ foi construída da forma que se mostra a seguir:

$$\left[X' \quad X \right] = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i \cos(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \sin(\omega_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \cos(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos^2(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) \sin(\omega_0 t_i) \\ \sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n t_i \sin(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) \sin(\omega_0 t_i) & \sum_{i=1}^n \sin^2(\omega_0 t_i) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Onde N é o número total de valores do ensaio, ω_0 é a frequência angular e t_i é o tempo de cada valor de ensaio. E ainda, para cada transdutor é construída uma matriz $\left[X' \quad Y_j \right]$ como a apresentada em baixo:

$$\left[X' \quad Y_j \right] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y'_{ji} \\ \sum_{i=1}^n Y'_{ji} t \\ \sum_{i=1}^n Y'_{ji} \cos(\omega_0 t) \\ \sum_{i=1}^n Y'_{ji} \sin(\omega_0 t) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

A coluna com os coeficientes de regressão para cada transdutor é calculada multiplicando a inversa da matriz $\left[X' \quad X \right]$ pela matriz $\left[X' \quad Y_j \right]$, como se pode ver de seguida:

$$\begin{bmatrix} A_{j0} \\ A_{j1} \\ A_{j2} \\ B_{j2} \end{bmatrix} = \left[X' \quad X \right]^{-1} \left[X' \quad Y_j \right] \quad (3.17)$$

Por fim, determinou-se a equação da regressão sinusoidal que define os valores para cada transdutor:

$$\widehat{Y}_{ji} = A_{j0} + A_{j1} t_i + A_{j2} \cos(\omega_0 t_i) + B_{j2} \sin(\omega_0 t_i) + \varepsilon_{ji} \quad (3.18)$$

Onde \widehat{Y}_{ji} é o valor esperado para o transdutor j e ε_{ji} o termo do erro da regressão.

Na terceira etapa do procedimento traçou-se a regressão sinusoidal para os transdutores (força e deslocamento), tendo-se obtido um gráfico, para o caso da força, o provete $BM7|H|SC|25|0,2|0,08$, por exemplo, como mostra a Figura 3.26. Na Figura 3.27 apresenta-se o resultado da combinação da regressão sinusoidal da força e da regressão sinusoidal do deslocamento, num gráfico força/deslocamento.

Das regressões sinusoidais são obtidos os valores de $|Y^*(\sigma)|$ e de $|Y^*(\varepsilon)|$:

$$|Y^*(\sigma)| = \sqrt{A_{j2}^2 + B_{j2}^2} \quad (3.19)$$

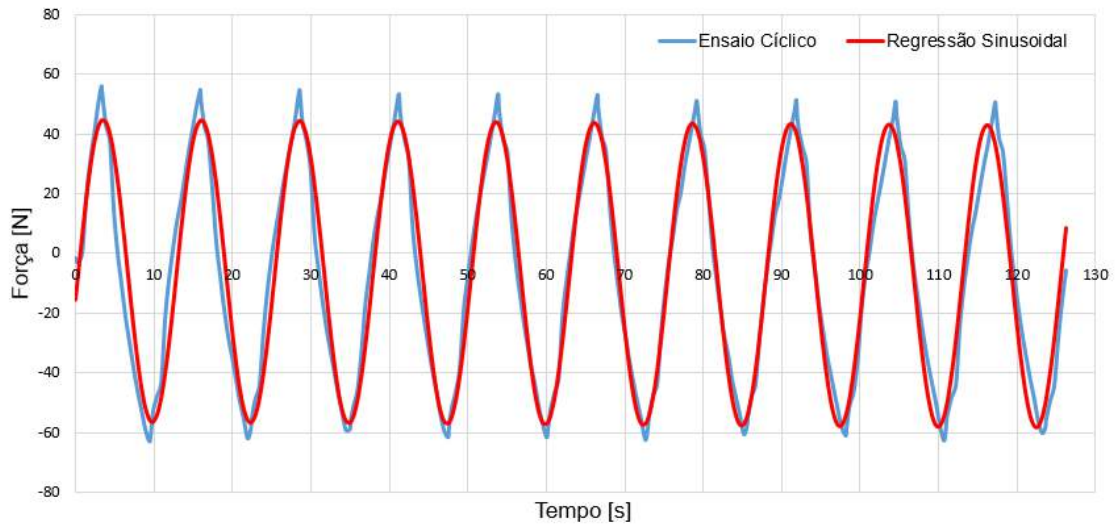


Figura 3.26: Exemplo de uma regressão sinusoidal força/tempo para o provete *BM7|H|SC|25|0,2|0,08*.

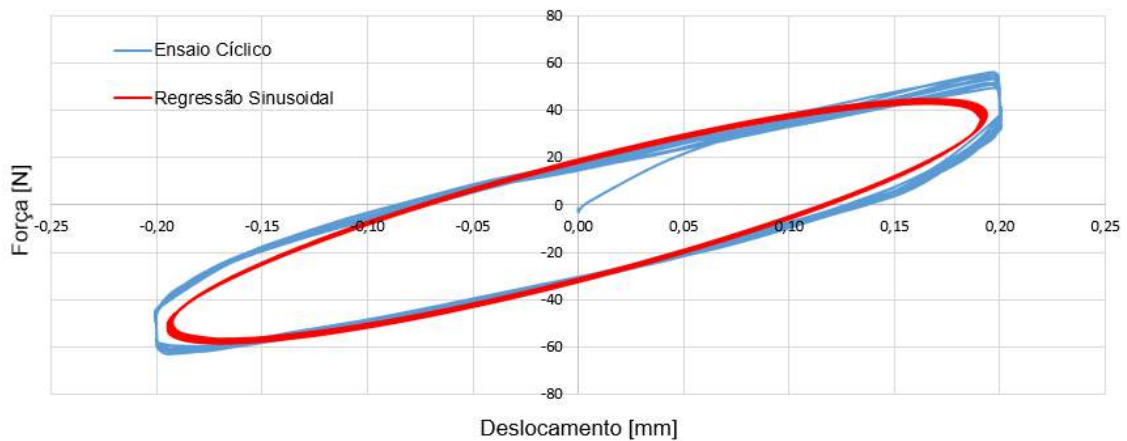


Figura 3.27: Exemplo de um gráfico força/deslocamento para o provete *BM7|H|SC|25|0,2|0,08*, após regressão sinusoidal.

$$|Y^*(\varepsilon)| = \sqrt{a_{j2}^2 + b_{j2}^2} \quad (3.20)$$

Com estes valores é possível calcular o módulo complexo da seguinte forma:

$$|E^*(\omega)| = \frac{|Y_\sigma^*| L_g}{|Y_\varepsilon^*| A} \quad (3.21)$$

Onde $|Y^*(\sigma)|$ é a amplitude para o transdutor da força, A_{j2} e B_{j2} são as constantes da regressão sinusoidal para a força, $|Y^*(\varepsilon)|$ é a amplitude para o transdutor do deslocamento, a_{j2} e b_{j2} são as constantes da regressão sinusoidal para o deslocamento, L_g comprimento médio da deformação imposta e A é a área da secção do provete.

Para calcular o ângulo de fase utilizou-se a seguinte expressão:

$$\varphi(\omega) = |\varphi_\sigma - \varphi_\varepsilon| = \arctan\left(-\frac{B_{j2}}{A_{j2}}\right) - \arctan\left(-\frac{b_{j2}}{a_{j2}}\right) \quad (3.22)$$

Embora se tenha seguido um procedimento de ensaio muito semelhante a Moreno [4] os resultados obtidos, para as argamassas betuminosas não foram admissíveis e tiveram por esse motivo de ser desconsiderados. Em seguida faz-se uma breve explicação dos problemas encontrados:

1. Existiram problemas ao nível da colagem dos provetes, levando a que durante o ensaio estes se descolassem dos suportes metálicos, quando em tração, como se pode observar na Figura 3.28. Este problema ocorreu nos ensaios de todos os provetes de argamassas padrão (S), provavelmente devido à maior rigidez que estes apresentam.

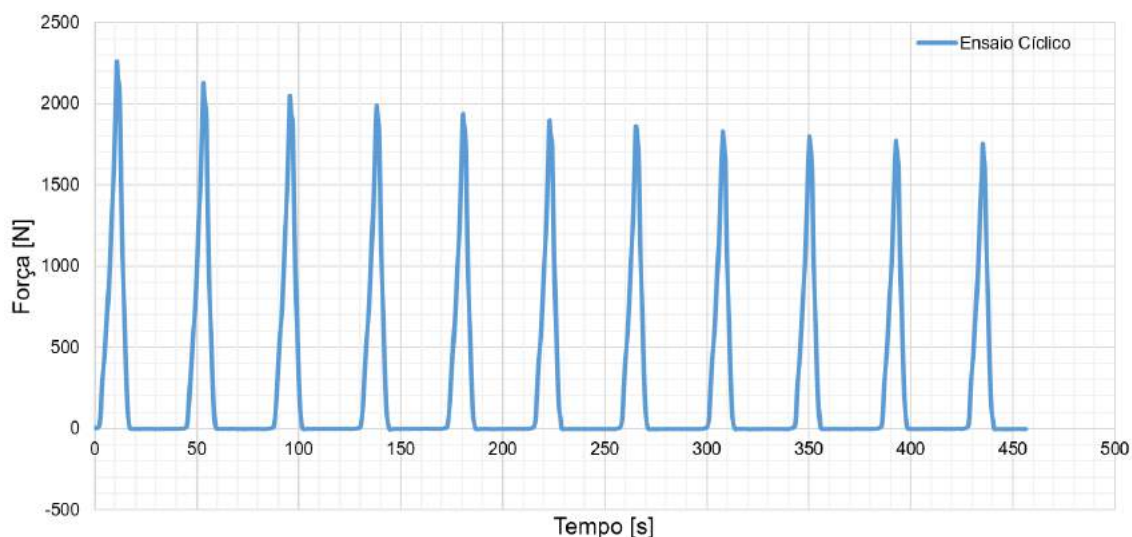


Figura 3.28: Gráfico força/tempo para o provete $BM6|L|S|25|0,2|0,02$.

2. A regressão sinusoidal gerada pelo método dos mínimos quadrados do estudo NCHRP D09-29 [95] não conseguiu ajustar-se aos resultados obtidos nos ensaios, como se pode observar nas Figuras 3.29 a 3.31.
3. Nos casos em que o método gerou regressões sinusoidais com o andamento muito semelhante às curvas de ensaio calcularam-se os valores do módulo complexo e do ângulo de fase. No caso dos ângulos de fase os resultados obtidos não foram aceitáveis, devido aos seus valores terem uma dispersão muito grande para o mesmo tipo de argamassa, como se pode observar na Tabela 3.10.

Parte destes problemas, podem ter surgido devido ao tipo de ensaio realizado ter em cada ciclo, aplicação de compressão e tração. Se tivessem sido realizados ensaios de compressão e tração em separado, como realizou Moreno [4], certamente a regressão gerada pelo método dos mínimos quadrados do estudo NCHRP D09-29 [95] fosse mais ajustada

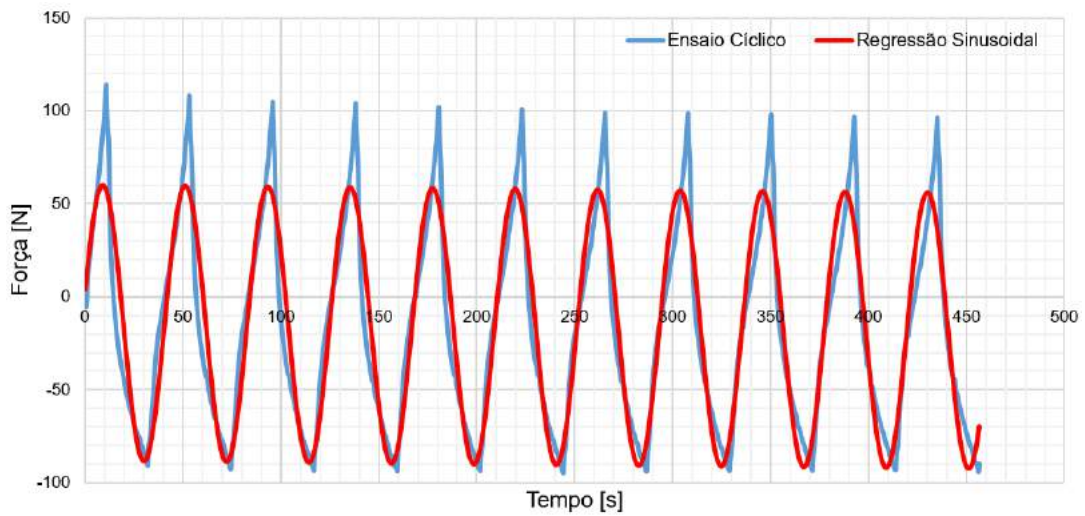


Figura 3.29: Gráfico força/tempo com regressão sinusoidal para o provete $BM6|H|SR|25|0,2|0,02$

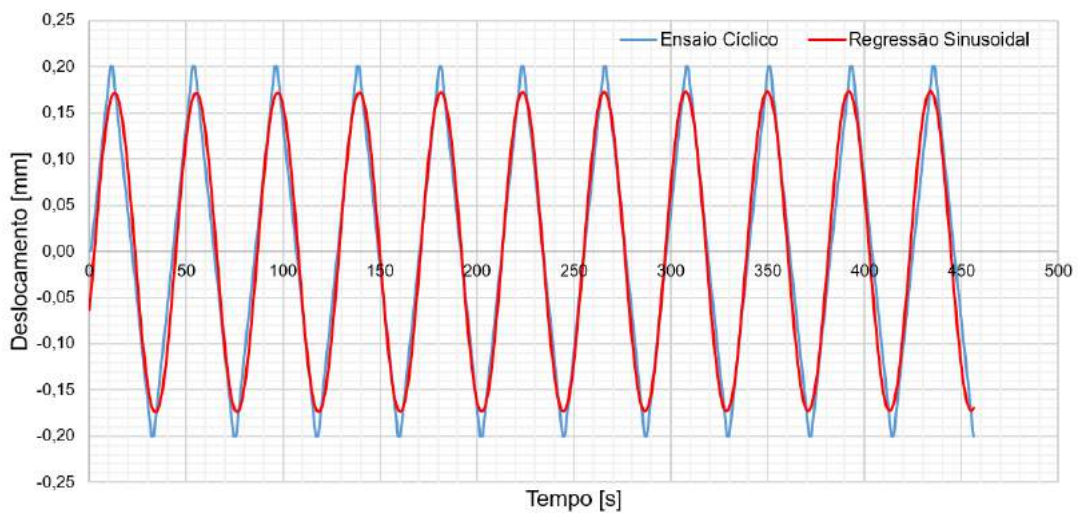


Figura 3.30: Gráfico deslocamento/tempo com regressão sinusoidal para o provete $BM6|H|SR|25|0,2|0,02$.

Tabela 3.10: Valores de módulo complexo e ângulo de fase para as argamassas betuminosas $BM7|L|SR$.

Designação do Provete	$F_{teórica}$ (Hz)	F (Hz)	ω_0 (rad/s)	Ângulo de Fase ($^\circ$)	Módulo Complexo (kPa)
BM7 L SR 25 0,1 0,08	0,2	0,13	0,810	81,90	25,86
BM7 L SR 25 0,1 0,02	0,05	0,044	0,280	16,83	15,43
BM7 L SR 25 0,1 0,01	0,025	0,024	0,148	24,56	12,05
BM7 L SR 25 0,1 0,005	0,0125	0,0121	0,076	19,57	9,31
BM7 L SR 25 0,2 0,08	0,1	0,1	0,492	49,75	31,93
BM7 L SR 25 0,2 0,02	0,025	0,024	0,148	10,88	19,82
BM7 L SR 25 0,2 0,01	0,0125	0,0121	0,076	5,33	15,31
BM7 L SR 25 0,2 0,005	0,00625	0,00616	0,039	5,27	11,56

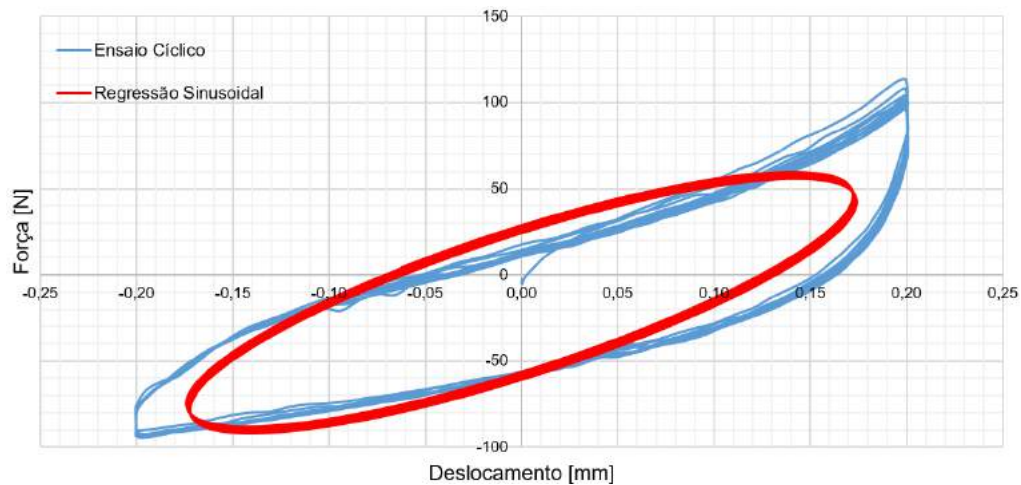


Figura 3.31: Gráfico força/deslocamento com regressão sinusoidal para o provete *BM6-|H|SR|25|0,2|0,02*.

aos resultados de ensaio. Outro fator que poderá ter gerado este tipo de incongruências nos resultados poderá dever-se ao facto do equipamento de ensaios utilizado não ser o mais indicado para a realização deste tipo de ensaios. A utilização de frequências muito baixas também poderá ter sido uma das razões para que os resultados obtidos para o módulo complexo e ângulo de fase não estivessem dentro de valores esperados.

O equipamento de ensaio teve uma avaria prolongada, o que fez com que não se pudessem repetir os ensaios realizados, para os provetes sobrantes, com novos ajustes, por forma, ao método dos mínimos quadrados anteriormente referido, gerar uma regressão sinusoidal com um melhor ajuste e por conseguinte se obterem valores de ângulo de fase e módulo complexo dentro do intervalo esperado.

Capítulo 4

Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos: nos ensaios de caracterização dos provetes, nos ensaios mecânicos monotônicos e nos ensaios de análise acústica. Para cada ensaio será efetuada uma comparação dos resultados obtidos entre as argamassas betuminosas com substituição parcial do agregado por granulados de borracha ou granulados de cortiça e as argamassas betuminosas padrão (sem substituição do agregado).

4.1 Caracterização dos provetes

Nesta secção os provetes das diferentes argamassas betuminosas são caracterizados quanto às suas dimensões e propriedades volumétricas. O resumo dos resultados obtidos na caracterização dos provetes pode ser consultado no Apêndice A.

4.1.1 Altura média dos provetes

A variação da altura dos provetes de argamassas betuminosas é apresentada na Figura 4.1. Pode observar-se que os provetes das argamassas betuminosas com substituição parcial de agregado por granulados de cortiça (SC) ou granulados de borracha (SR) apresentam valores superiores para a altura média dos provetes, em relação às misturas padrão (S). Assim, a altura média foi de 82,76 *mm* para os provetes com granulados de cortiça (SC), 83,41 *mm* para os provetes com granulados de borracha (SR) e 75,13 *mm* para os provetes padrão (S). Este facto deve-se à tendência destes materiais recuperarem elasticamente após ser-lhes retirado o peso do equipamento compactador do topo do provete.

Comparando as alturas médias dos provetes de argamassas betuminosas relativamente às diferentes percentagens de betume (BM6, BM7 e BM8), pode verificar-se que,

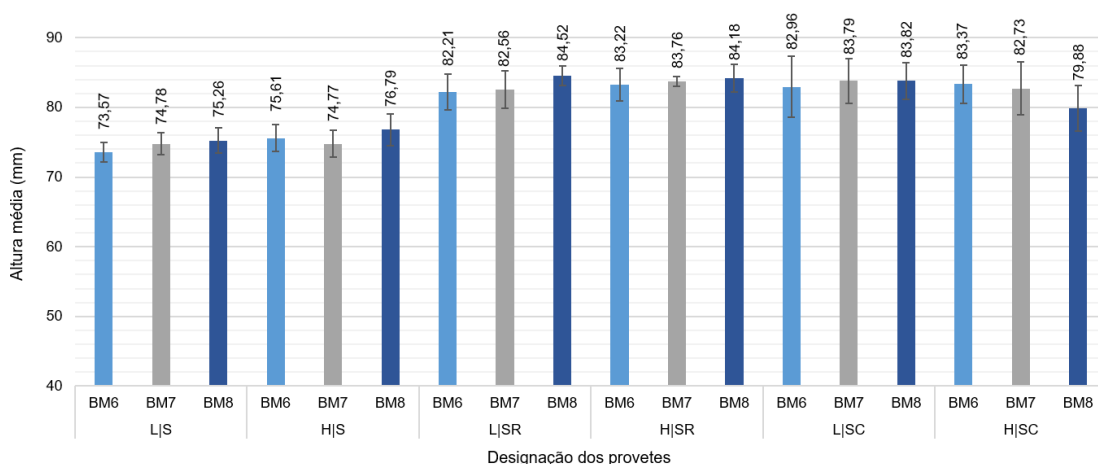


Figura 4.1: Altura média dos provetes de argamassas betuminosas.

na generalidade das argamassas, com o aumento da percentagem de betume existe um ligeiro aumento (entre 1 a 2 mm) da altura média dos provetes.

Relativamente ao tipo de fíler (L ou H), os provetes não exibem variações consideráveis em termos da altura média.

Quanto ao desvio padrão, pode verificar-se maior amplitude do intervalo para as misturas com substituição parcial de agregado (SR e SC). As misturas que contêm cortiça (SC) exibem a maior amplitude (3,3 mm), devido à dificuldade de compactação destes materiais com o equipamento compactador disponível para o efeito.

4.1.2 Diâmetro médio dos provetes

A variação do diâmetro médio dos provetes de argamassas betuminosas é apresentada na Figura 4.2. Pode observar-se que todos os provetes sofreram uma ligeira expansão após desmoldagem, em relação ao seu diâmetro inicial de 50 mm (diâmetro do molde).

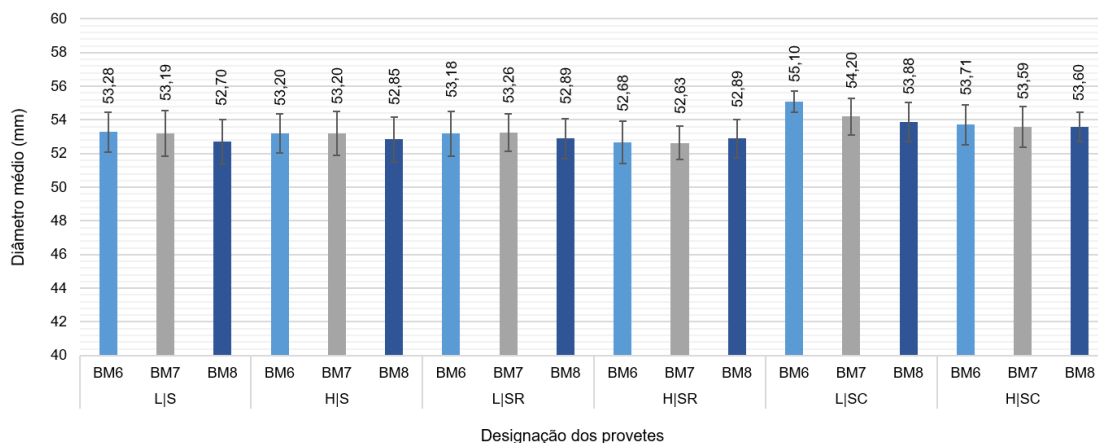


Figura 4.2: Diâmetro médio dos provetes de argamassas betuminosas.

Os provetes com granulado de cortiça (SC), comparativamente aos restantes (S e SR), exibem uma maior expansão diametral, na ordem dos 4 *mm*.

Na generalidade dos casos, o diâmetro médio dos provetes diminuí ligeiramente quanto maior é a percentagem de betume (de BM6 para BM8).

Relativamente ao tipo de fíler (L ou H), os provetes não exibem variações consideráveis em termos do diâmetro médio.

Quanto ao desvio padrão, pode observar-se que o intervalo é semelhante em todos os tipos de provetes, sendo da ordem dos 1,16 *mm*, não existindo uma dispersão de valores muito grande.

4.1.3 Massa volúmica média e Volume de vazios (V_m) dos provetes

A variação da massa volúmica média dos provetes de argamassas betuminosas é apresentada na Figura 4.3. Pode constatar-se que a massa volúmica dos provetes cresce ligeiramente, em média 26,8 Kg/m^3 , com o aumento da percentagem de betume (de BM6 para BM8).

Quanto ao tipo de fíler, as argamassas com fíler de cal hidráulica (H) têm massas volúmicas superiores, em média 43,9 Kg/m^3 , que as de fíler recuperado (L).

As massas volúmicas dos provetes de argamassas com cortiça (SC) e com borracha (SR) são menores que dos provetes de argamassas betuminosas padrão (S) devido às massas volúmicas dos materiais que as constituem, a borracha e a cortiça, serem muito inferiores à massa volúmica do pó de pedra e, tal como se pode verificar em seguida, ao volume de vazios destas misturas ser superior ao das argamassas padrão (S). Assim, as massas volúmicas médias para os provetes de argamassas betuminosas com cortiça (SC) foi de 993,29 Kg/m^3 , para os provetes de argamassas betuminosas com borracha (SR) foi de 1831,06 Kg/m^3 e para dos provetes de argamassas betuminosas padrão foi de 2299,32 Kg/m^3 .

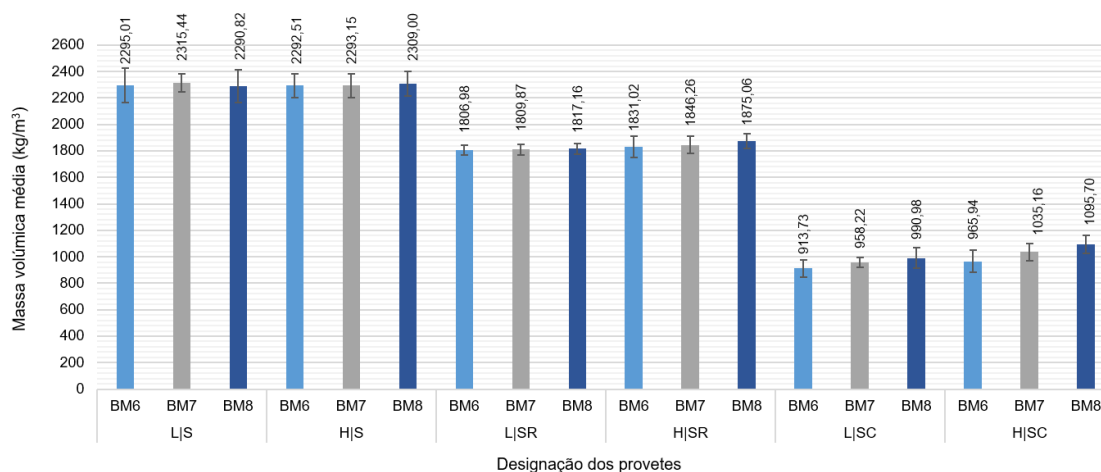


Figura 4.3: Massas volúmicas médias dos provetes de argamassas betuminosas.

A variação do volume de vazios dos provetes de argamassas betuminosas é apresentada na Figura 4.4. Pode verificar-se que os valores do volume de vazios decrescem em média 2,2 % à medida que a percentagem de betume nas argamassas betuminosas aumenta (de BM6 para BM8). Este facto deve-se ao aumento da quantidade de betume produzir uma redução do atrito interno entre os agregados durante a compactação.

Quanto ao tipo de fíler presente nas argamassas betuminosas, as argamassas com fíler recuperado (L) apresentam valores ligeiramente superiores de volume de vazios, cerca de 3,1 %, que as argamassas com fíler de cal hidráulica (H).

Ao nível do tipo de agregado fino, as argamassas betuminosas com granulados de borracha (SR) ou granulados de cortiça (SC) exibem valores maiores de volume de vazios comparativamente com as argamassas padrão (S). Assim, o volume de vazios foi de 4,53% para os provetes de argamassas padrão (S), 16,59 % para provetes de argamassas com borracha (SR) e 21,14 % para provetes de argamassas com cortiça (SC). Tal facto deve-se, como já referido anteriormente, à recuperação elástica (na altura dos provetes) e à expansão do diâmetro, após a desmoldagem, que estes provetes apresentaram.

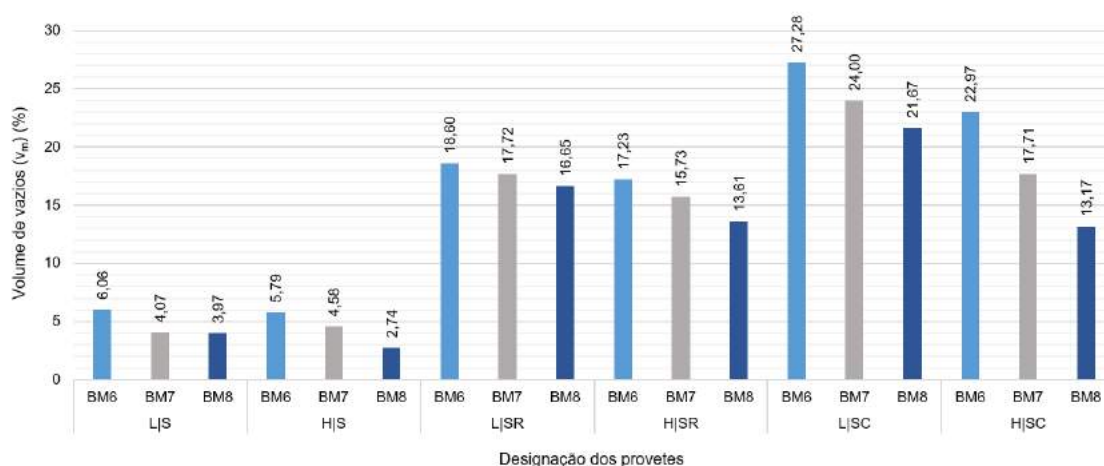


Figura 4.4: Volume de vazios dos provetes de argamassas betuminosas.

4.1.4 Volume de Vazios na Mistura de Agregados (VMA) e Percentagem de Vazios preenchidos com Betume (VFB) dos provetes

A variação de volume de vazios na mistura de agregados dos provetes de argamassas betuminosas é apresentada na Figura 4.5. Pode observar-se que para as argamassas betuminosas padrão (S) e para as argamassas com borracha (SR) os valores de volume de vazios na mistura de agregados (VMA) aumentam muito ligeiramente, cerca de 0,6%, com o incremento da percentagem de betume (de BM6 para BM8). Já as argamassas betuminosas com granulados de cortiça (SC) exibem um comportamento contrário às anteriores. Os valores de VMA para os provetes de argamassas com cortiça diminuem, cerca de 2,7%, com o aumento da percentagem de betume (de BM6 para BM8), resultante do efeito que a

substituição de 10% do agregado mineral pelos granulados de cortiça, que possivelmente devido à sua porosidade absorveram parte do betume presente na mistura.

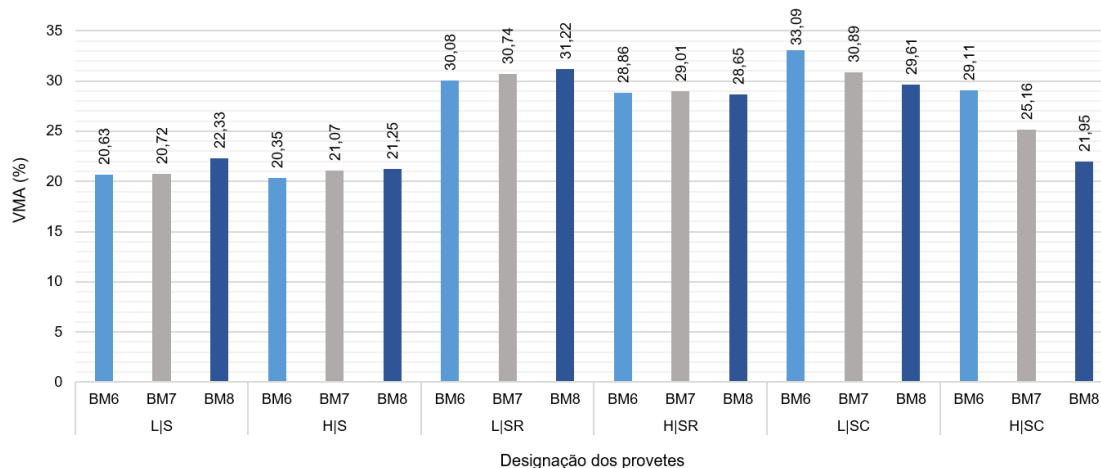


Figura 4.5: Volume de vazios na mistura de agregados (VMA) dos provetes de argamassas betuminosas.

Relativamente ao tipo de fíler, pode verificar-se que as argamassas com fíler de cal hidráulica (H) têm valores de VMA inferiores, cerca de 2,7%, às argamassas com fíler recuperado (L).

Quanto à influência do tipo de agregado fino nos valores de VMA dos provetes de argamassas betuminosas, pode constatar-se que os valores de VMA são inferiores para os provetes de argamassas betuminosas padrão (S), em média 21,1%, e superiores para as argamassas com granulados de borracha (SR), em média 29,8%, e granulados de cortiça (SC), em média 28,3%.

A variação da percentagem de vazios preenchidos com betume dos provetes de argamassas betuminosas é apresentada na Figura 4.6. Pode verificar-se que a percentagem de vazios preenchidos com betume (VFB) aumenta, cerca de 6,3%, com o incremento da percentagem de betume das argamassas betuminosas (de BM6 para BM8).

Quanto à relação entre a VFB e o tipo de agregado fino das argamassas betuminosas, pode constatar-se que por o volume de vazios das argamassas com granulados de borracha e cortiça (SR e SC) ser superior às argamassas padrão (S) há um menor preenchimento dos vazios destas misturas por betume. Sendo que as argamassas betuminosas com granulados de cortiça (SC) exibem valores de VFB menores, em média 26,2%, que as argamassas com granulados de borracha (SR), em média 44,3%. Este facto deve-se à porosidade que os grânulos de cortiça apresentam e que os grânulos de borracha criogénicos não têm por a sua superfície ser vítrea.

Relativamente ao tipo de fíler presente nas argamassas betuminosas, observa-se que as argamassas com fíler de cal hidráulica (H) apresentam uma percentagem de vazios preenchidos com betume (VFB) ligeiramente superior, cerca de 4,8%, às argamassas com fíler recuperado (L). Tal facto deve-se ao mesmo motivo anteriormente descrito, as argamassas

com fíler recuperado (L) têm volume de vazios ligeiramente superiores às argamassas com fíler de cal hidráulica (H).

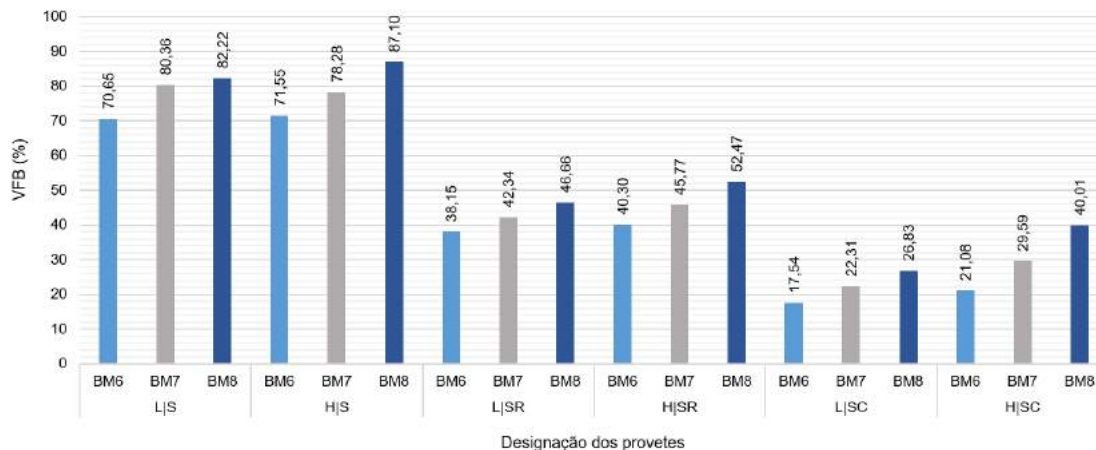


Figura 4.6: Percentagem de vazios preenchidos com betume (VFB) dos provetes de argamassas betuminosas.

4.2 Ensaios mecânicos monotónicos de compressão

Nesta secção são analisados os resultados dos ensaios mecânicos monotónicos de compressão uniaxial aos provetes de argamassas betuminosas. Devido a durante a realização destes ensaios não ter sido medida a variação de diâmetro do provete ao longo do tempo de ensaio, os resultados que se seguem são forças e deslocamentos, em vez de tensões e extensões. Os valores obtidos de força e deslocamento na rotura, para os ensaios de todos os provetes, são apresentados no Apêndice C.

Em seguida são discutidos os resultados obtidos.

4.2.1 Resultados por tipo argamassa betuminosa

Pode observar-se, pelo formato das curvas força/deslocamento, que os provetes de argamassas betuminosas padrão (S) (Figura 4.7) apresentam elevada rigidez em relação aos provetes de argamassas betuminosas com granulado de borracha (SR) (Figura 4.8) ou com granulado de cortiça (SC) (Figura 4.9), pois apresentam valores de força de rotura muito superiores aos de outros agregados e as curvas de força/deslocamento têm um formato com um pico mais pronunciado. As curvas força/deslocamento para os provetes com granulados de borracha (SR) ou de cortiça (SC) são mais suaves, sendo as do último tipo as mais suaves, tal deve-se à maior ductilidade deste material em relação aos restantes.

Os valores de força e deslocamento para os provetes com granulado de cortiça, $T = 25^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,08\text{mm/s}$ tiveram que ser excluídos da análise comparativa, que se segue, pois tiveram uma deformação transversal muito grande durante o ensaio, o que fez com que não seja possível identificar os valores de força e deslocamento na rotura do provete. Os

restantes gráficos força/deslocamento, não mencionados nesta secção, são apresentados no Apêndice B.

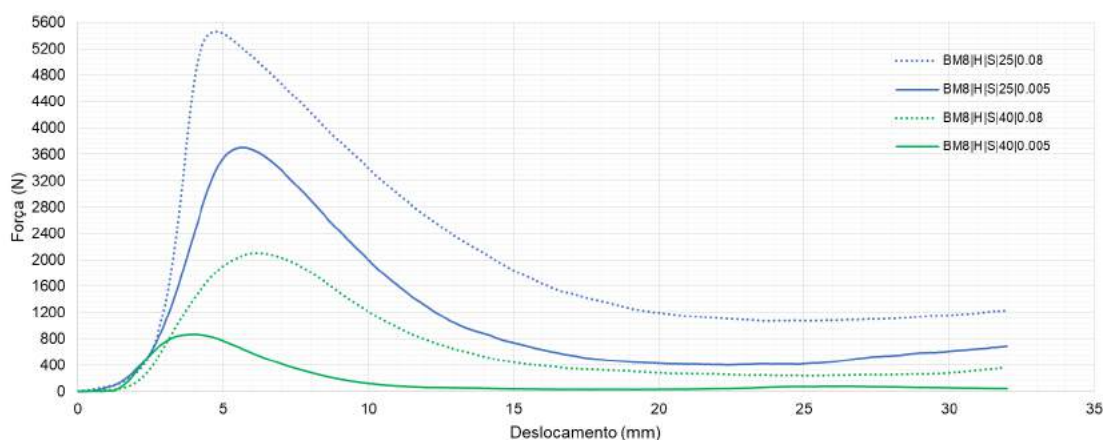


Figura 4.7: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra (S).

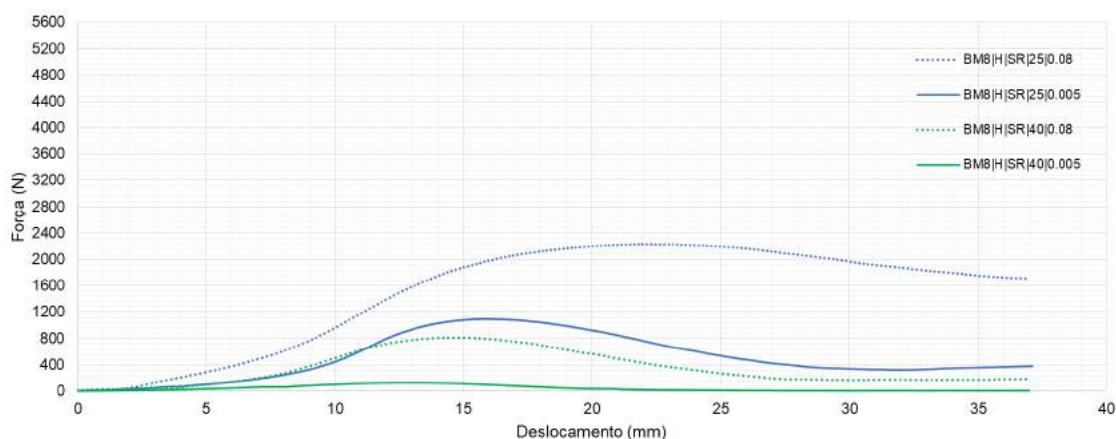


Figura 4.8: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).

No que diz respeito aos tipos de rotura que as diversas argamassas apresentaram, existiram dois modos de deformação distintos.

Os provetes de argamassas padrão (S) exibiram uma rotura por corte. Previamente apresentaram, também, uma ligeira deformação transversal. Por esse motivo a variação do seu volume foi pouco significativa.

Por outro lado, os provetes de argamassas com granulados de borracha (SR) apresentaram, antes da rotura, uma grande deformação transversal, sem variação do seu volume, a que se dá o nome de efeito de barril. Este fenómeno é usual devido ao coeficiente de Poisson (ν) da borracha ser 0,5, significando que é um material incompressível. Já os provetes de argamassas betuminosas com granulados de cortiça (SC), que devido ao coeficiente

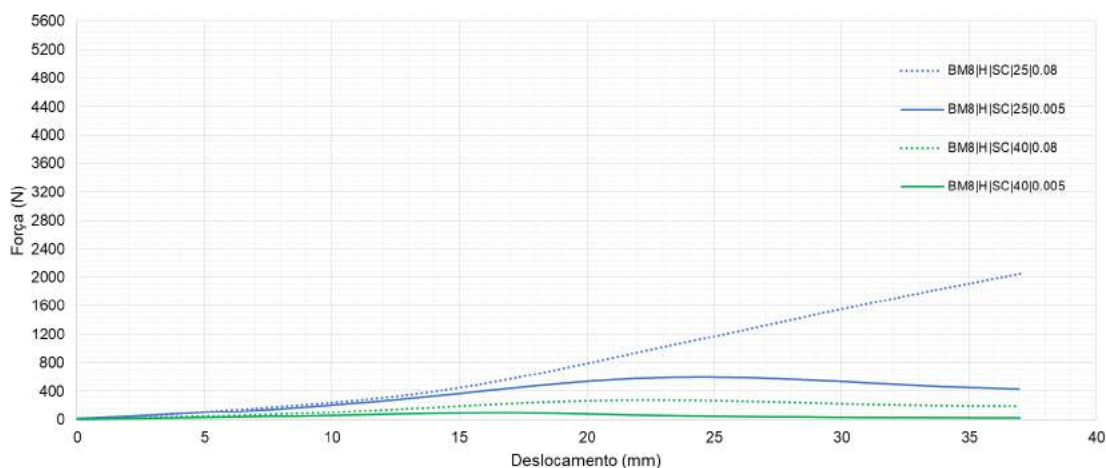


Figura 4.9: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).

de Poisson da cortiça ser nulo ($\nu = 0$) fizesse esperar que não fossem existir deformações transversais, comportaram-se, inesperadamente, de forma semelhante aos provetes com granulados de borracha (Figura 4.10). Este facto pode-se explicar pelas características dos restantes materiais que compõem as argamassas: betume ($\nu = 0,45$) e o pó de pedra ($\nu = 0,40$).

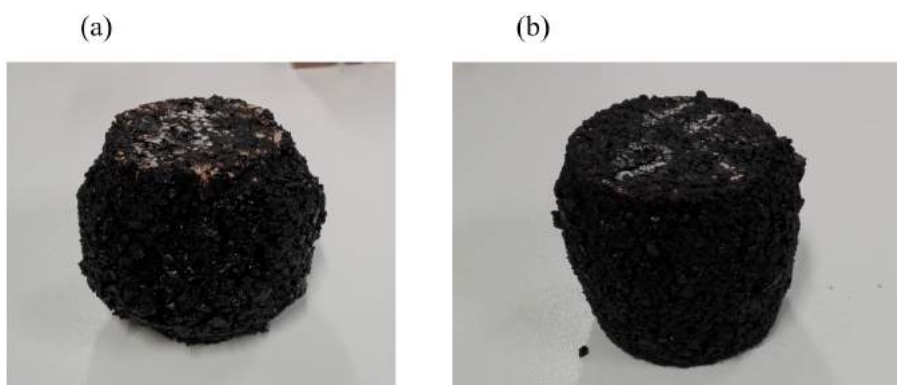


Figura 4.10: Provede após ensaio de compressão uniaxial:(a) argamassa betuminosa com granulados de borracha e (b) argamassas betuminosa com granulados de cortiça.

4.2.2 Análise comparativa dos resultados obtidos

A análise comparativa dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial é efetuada para o valor de força de rotura e deslocamento na rotura de cada provete. Esta análise é realizada através da influência de várias condicionantes.

Influência da temperatura de ensaio

As Figuras 4.11 a 4.14 visam avaliar se a temperatura de ensaio tem influência nos valores de força de rotura e deslocamento na rotura. Nestas figuras são comparados os valores de força na rotura obtidos para temperaturas de ensaio de $T = 25^{\circ}\text{C}$ e $T = 40^{\circ}\text{C}$, com as mesmas condicionantes (velocidade de ensaio, percentagem de betume, tipo de filer e combinação de agregados).

A partir da análise das Figuras 4.11 e 4.12 é possível verificar que os provetes de argamassas betuminosas ensaiados a $T = 25^{\circ}\text{C}$ apresentam maiores valores de força de rotura que os provetes ensaiados a $T = 40^{\circ}\text{C}$. Nos ensaios a $v = 0,08 \text{ mm/s}$ os valores da força de rotura obtidos para a temperatura de ensaio a $T = 25^{\circ}\text{C}$ são 2,3 vezes superiores aos valores obtidos a $T = 40^{\circ}\text{C}$. Nos ensaios a $v = 0,005 \text{ mm/s}$ os valores da força de rotura obtidos para a temperatura de ensaio a $T = 25^{\circ}\text{C}$ são 6,9 vezes superiores aos valores obtidos a $T = 40^{\circ}\text{C}$. Isto deve-se ao facto da rigidez do betume diminuir com o aumento da temperatura.

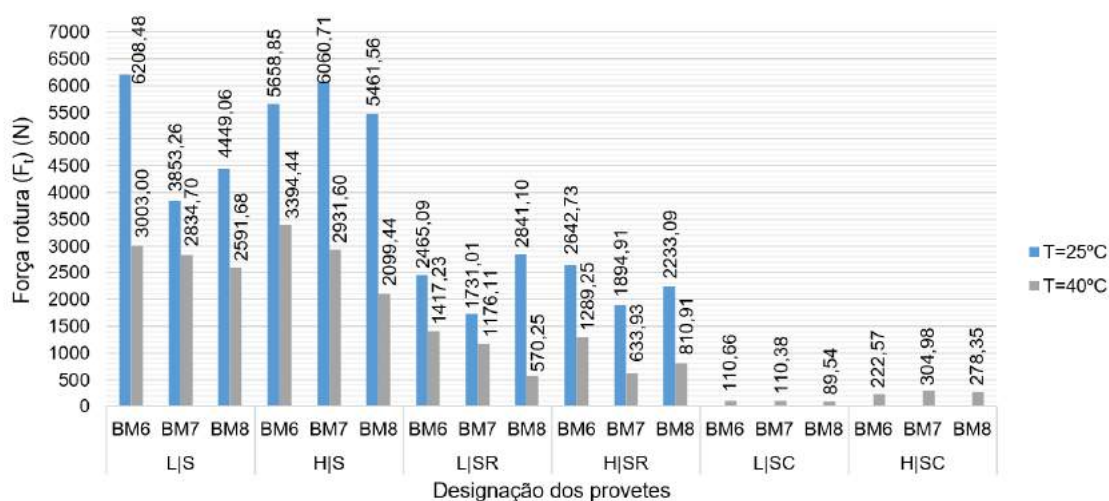


Figura 4.11: Influência da temperatura de ensaio no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $v = 0,08 \text{ mm/s}$.

Relativamente ao deslocamento na rotura, após análise das Figuras 4.13 e 4.14 observa-se que, para generalidade das argamassas, nos ensaios realizados a $T = 25^{\circ}\text{C}$ o deslocamento na rotura é maior do que para os ensaios realizados a $T = 40^{\circ}\text{C}$, com uma variação entre $0,17 \text{ mm}$ e $11,99 \text{ mm}$. Tal facto não é verificado para os provetes padrão (S) a uma velocidade de ensaio de $v = 0,08 \text{ mm/s}$, que obtiveram valores de deslocamento na rotura maiores para a temperatura de ensaio $T = 40^{\circ}\text{C}$, com uma variação entre $0,34 \text{ mm}$ e $1,49 \text{ mm}$.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

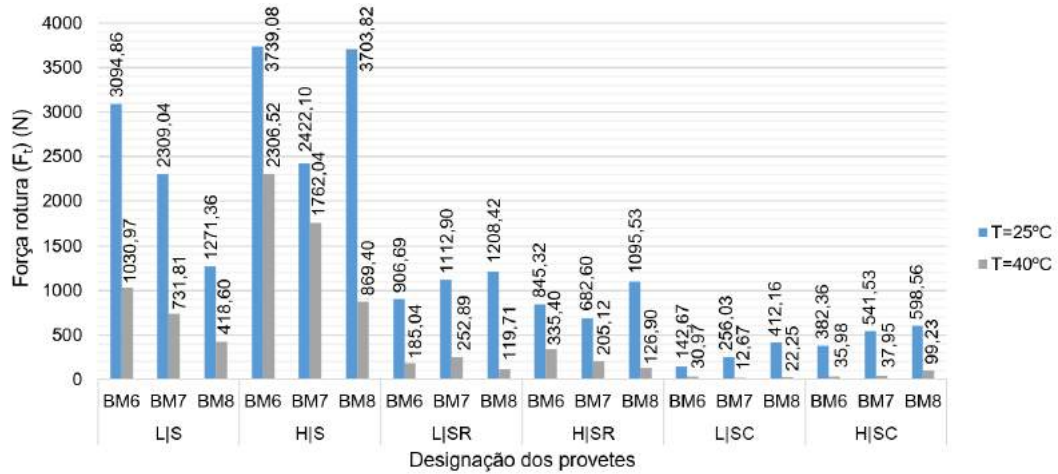


Figura 4.12: Influência da temperatura de ensaio no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $v = 0,005 \text{ mm/s}$.

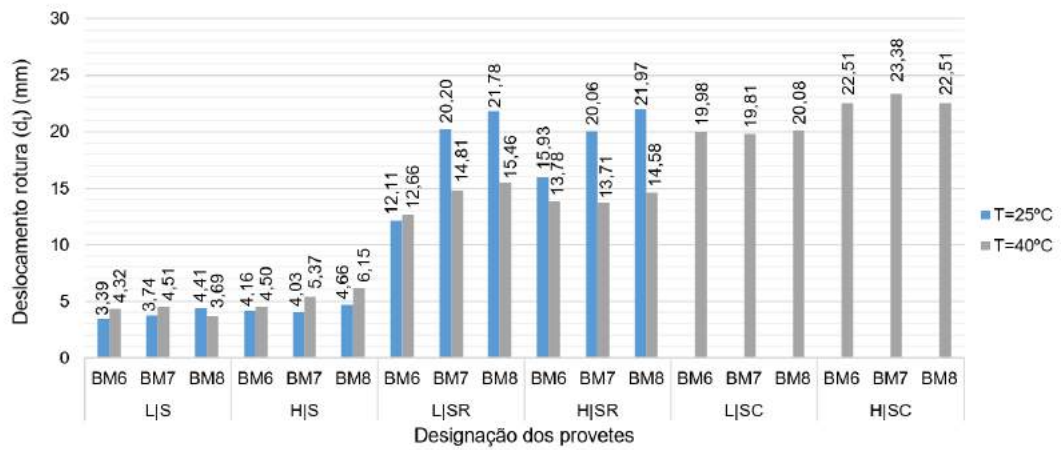


Figura 4.13: Influência da temperatura de ensaio no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $v = 0,08 \text{ mm/s}$.

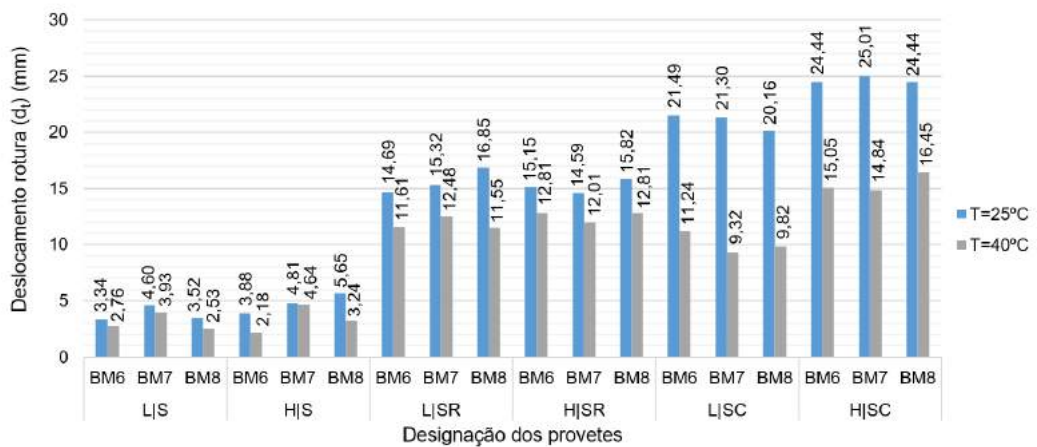


Figura 4.14: Influência da temperatura de ensaio no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $v = 0,005 \text{ mm/s}$.

Influência da velocidade de ensaio

A influência da velocidade de ensaio, $v = 0,08 \text{ mm/s}$ ou $v = 0,005 \text{ mm/s}$, nos valores da força de rotura e deslocamento na rotura foi analisada através das Figuras 4.15 a 4.18, para as mesmas condicionantes (temperatura de ensaio, percentagem de betume, tipo de filer e combinação de agregados).

Nas Figuras 4.15 e 4.16 pode observar-se que para a velocidade, $v = 0,08 \text{ mm/s}$, foram obtidos valores de força de rotura muito superiores, tanto para $T = 25^\circ\text{C}$ como para $T = 40^\circ\text{C}$. Nos ensaios a $T = 25^\circ\text{C}$ os valores da força de rotura obtidos para a velocidade de ensaio $v = 0,08 \text{ mm/s}$ são 2,3 vezes superiores aos valores obtidos para $v = 0,005 \text{ mm/s}$. Nos ensaios a $T = 40^\circ\text{C}$ os valores da força de rotura obtidos para a velocidade de ensaio $v = 0,08 \text{ mm/s}$ são 4,6 vezes superiores aos valores obtidos para $v = 0,005 \text{ mm/s}$.

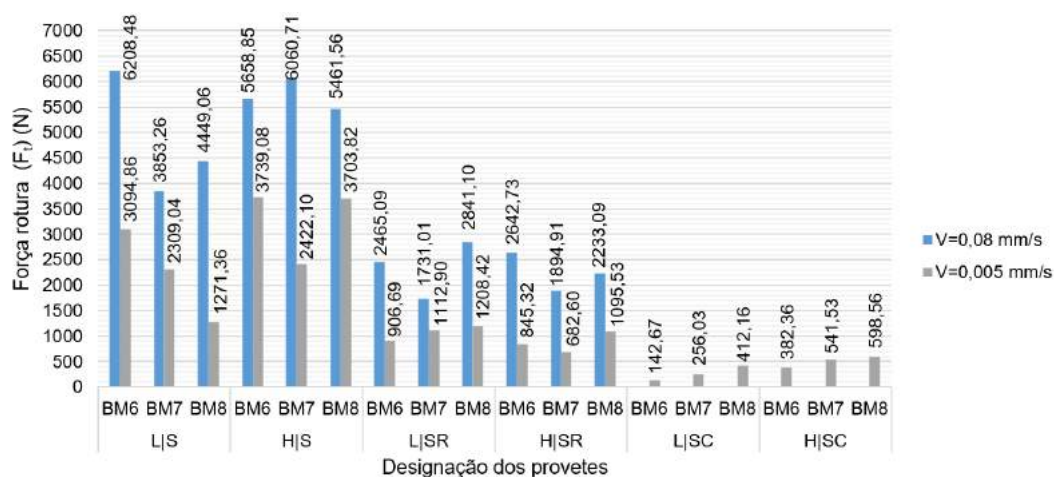


Figura 4.15: Influência da velocidade de ensaio no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $T = 25^\circ\text{C}$.

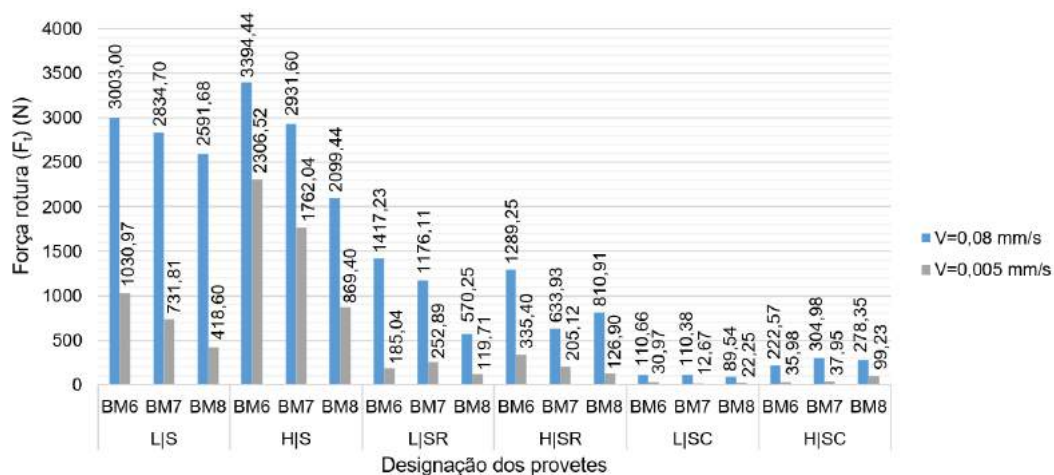


Figura 4.16: Influência da velocidade de ensaio no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $T = 40^\circ\text{C}$.

Em relação aos valores do deslocamento na rotura pode verificar-se nas Figuras 4.17 e 4.18, que estes não apresentam uma diferença de valores tão expressiva como os anteriores. Contudo também apresentam valores superiores para a maior velocidade ($v = 0,08 \text{ mm/s}$). As argamassas betuminosas com granulados de cortiça (SC) apresentam maior diferença de valores de deslocamento na rotura entre velocidades de ensaio, em média $8,6 \text{ mm}$, que as restantes argamassas (S e SR), em média $2,1 \text{ mm}$.

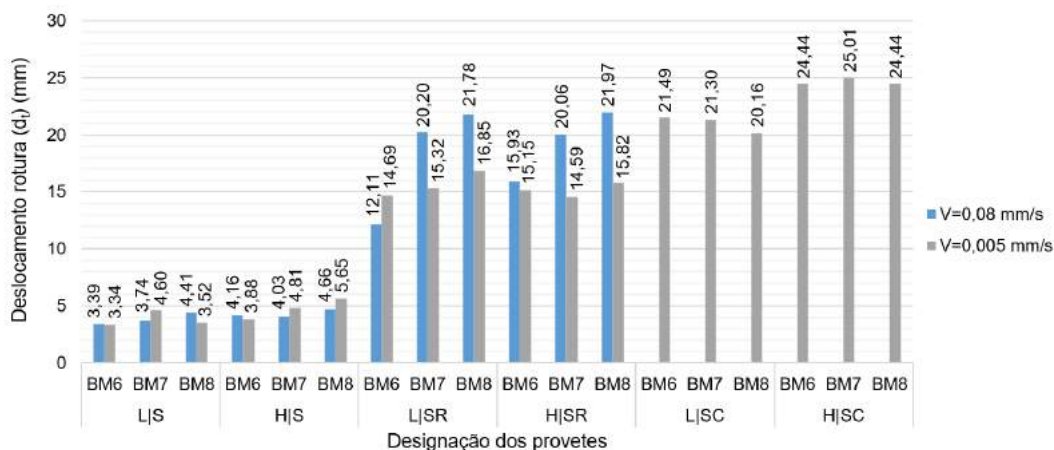


Figura 4.17: Influência da velocidade de ensaio no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $T = 25^\circ\text{C}$.

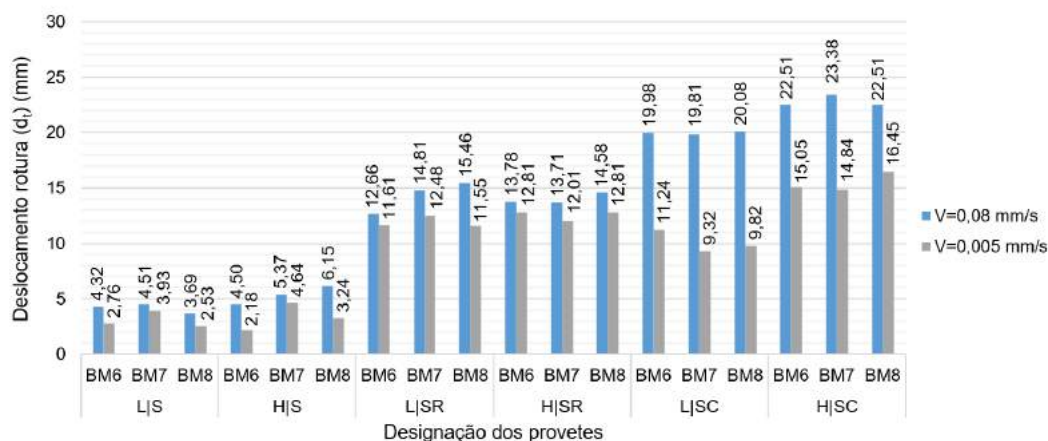


Figura 4.18: Influência da velocidade de ensaio no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas ensaiados com $T = 40^\circ\text{C}$.

Influência do tipo de fíler

As Figuras 4.19 a 4.24 visam avaliar se o tipo de fíler tem influência nos valores de força de rotura e deslocamento na rotura. Nestas figuras são comparados os valores de força de rotura e deslocamento na rotura obtidos para os dois tipos de fíler utilizados no fabrico das argamassas betuminosas, para as mesmas condicionantes (velocidade de ensaio, temperatura de ensaio, percentagem de betume e combinação de agregados).

4.2. ENSAIOS MECÂNICOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO

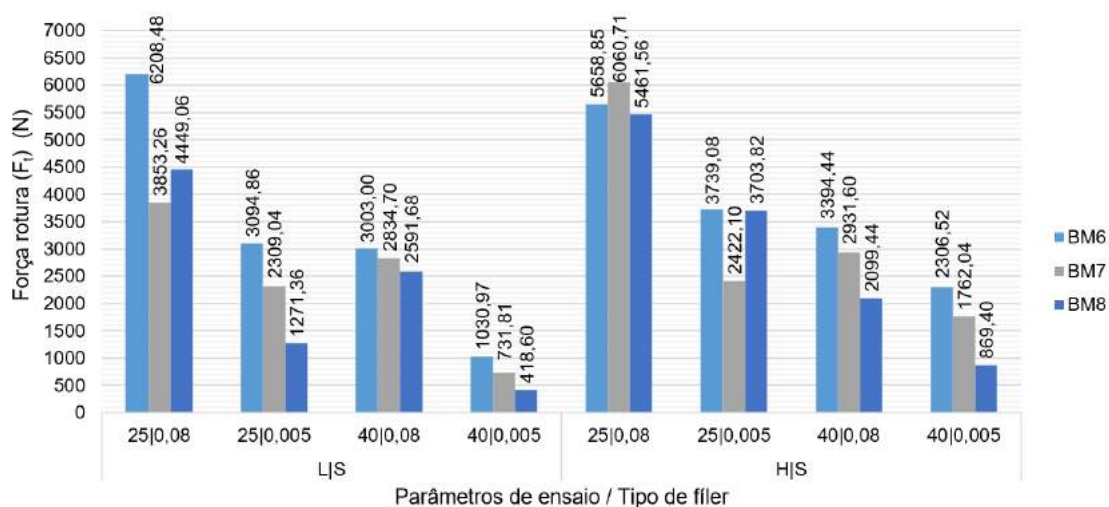


Figura 4.19: Influência do tipo de filer no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra (S).

A partir das Figuras 4.19 a 4.21 é possível verificar que os valores de força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com filer de cal hidráulica (H) são superiores às dos provetes de argamassas betuminosas com filer recuperado (L). Os provetes de argamassas padrão (S) com filer de cal hidráulica (H) apresentam valores de forças de rotura 1,5 vezes superiores que os com filer recuperado (L). Os provetes de argamassas com cortiça (SC) com filer de cal hidráulica (H) apresentam valores de forças de rotura 2,5 vezes superiores que os com filer recuperado (L). A exceção foram os provetes de argamassas com granulados de borracha (SR) que tiveram um comportamento contrário, tendo-se obtido valores 1,2 vezes superiores de força de rotura para provetes com filer recuperado (L) em relação aos provetes com filer de cal hidráulica (H).

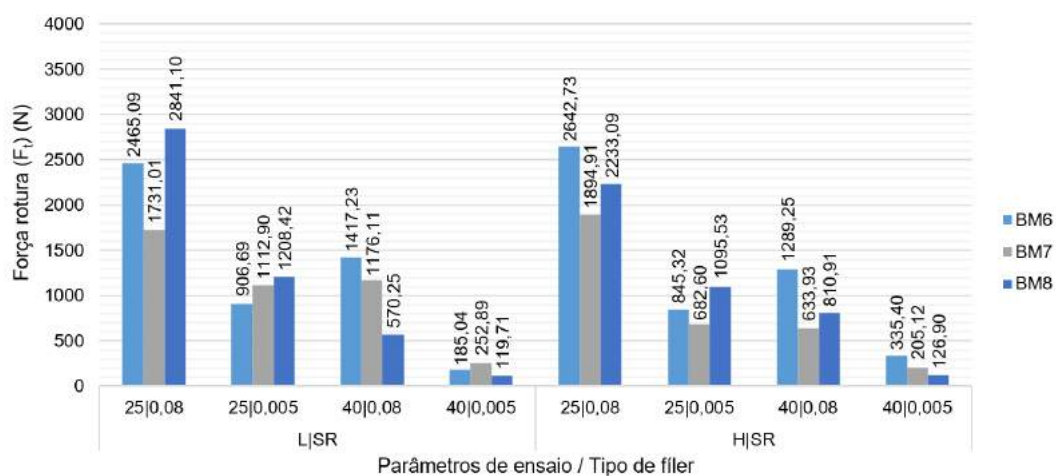


Figura 4.20: Influência do tipo de filer no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de borracha (SR).

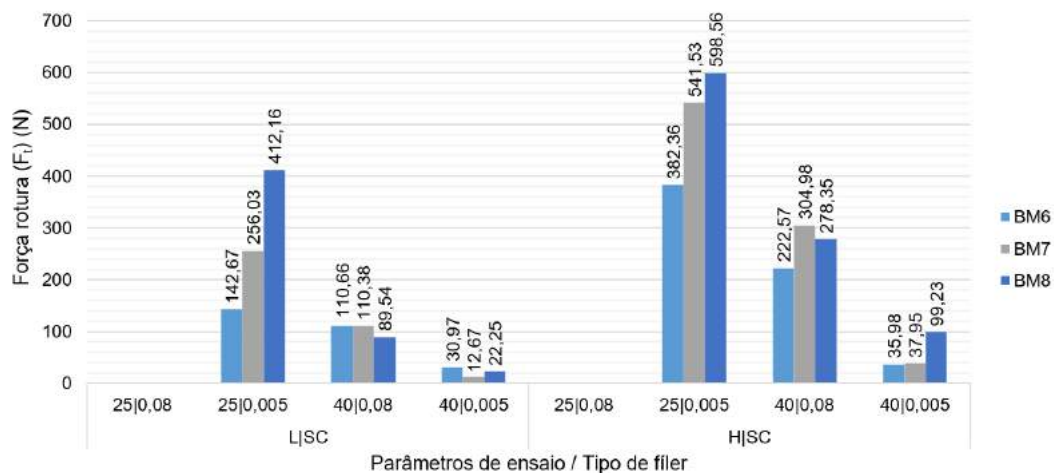


Figura 4.21: Influência do tipo de fíler no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de cortiça (SC).

Os valores de deslocamento na rotura (Figuras 4.22 a 4.24) são maiores no caso dos provetes de argamassas betuminosas com fíler de cal hidráulica (H), que com fíler recuperado (L), para todos as combinações de agregados (S, SR ou SC), com uma variação entre 0,14 mm e 6,64 mm.

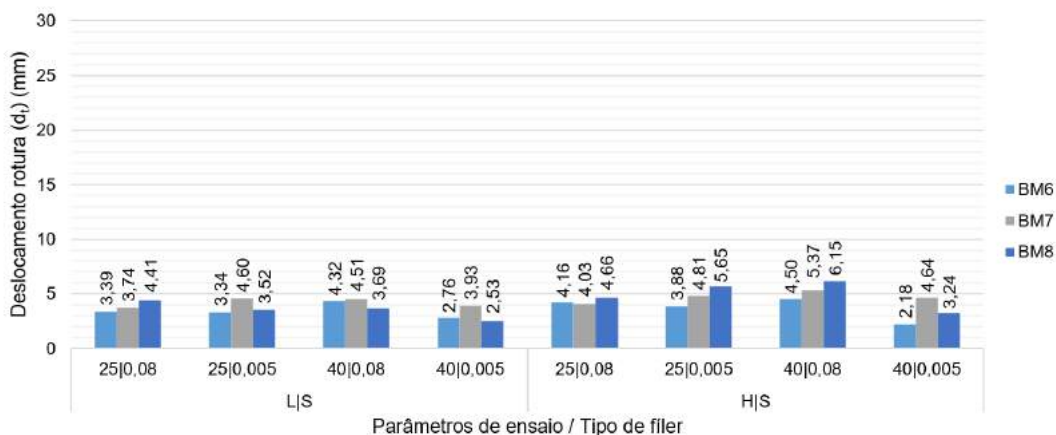


Figura 4.22: Influência do tipo de fíler no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra (S).

4.2. ENSAIOS MECÂNICOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO

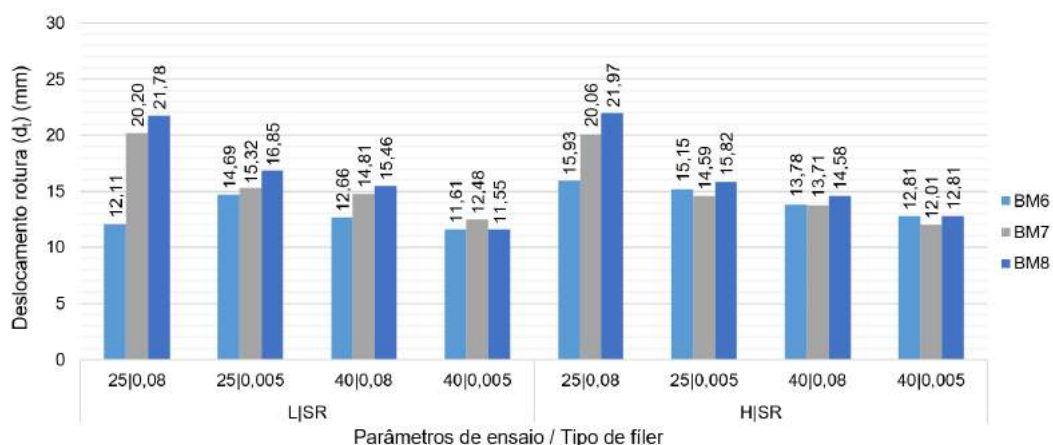


Figura 4.23: Influência do tipo de fíler no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de borracha (SR).

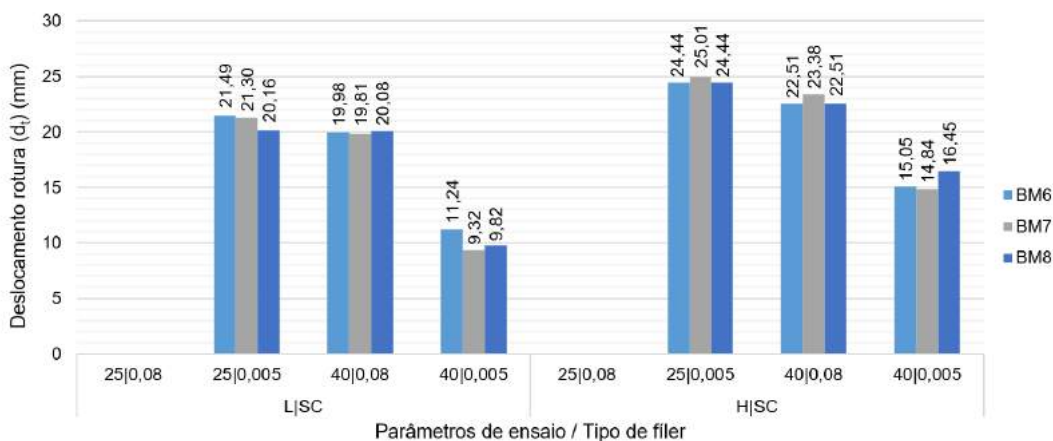


Figura 4.24: Influência do tipo de fíler no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de cortiça (SC).

Influência do tipo de agregado fino

A influência da combinação de agregados, com que as argamassas betuminosas foram fabricadas (S, SR e SC), nos valores da força de rotura e deslocamento na rotura foi analisada através das Figuras 4.25 a 4.28, para as mesmas condicionantes (temperatura de ensaio, velocidade de ensaio, percentagem de betume e tipo de fíler).

Os valores de força de rotura (Figuras 4.25 e 4.26) para as argamassas betuminosas padrão (S) são 3,5 vezes superiores que as argamassas com borracha (SR) e 22,1 vezes superiores que as argamassas com cortiça (SC). O comportamento das argamassas betuminosas com granulados de cortiça (SC), nos ensaios de compressão uniaxial, foi 5,9 vezes inferior em relação às argamassas com granulados de borracha (SR) devido aos provetes serem compostos por 40% de granulados de cortiça (em volume), que é um material menos rígido que o granulado de borracha. Os provetes com granulados de borracha (SR)

são compostos por 12% de granulados de borracha (em volume) fazendo com que o seu comportamento em relação aos provetes padrão (S), neste tipo de ensaio, não apresente uma variação tão grande como os anteriores, embora tenham sido obtidos valores muito inferiores de força de rotura. Estas diferenças de valores também se devem à borracha e à cortiça serem materiais mais dúcteis que o pó de pedra.

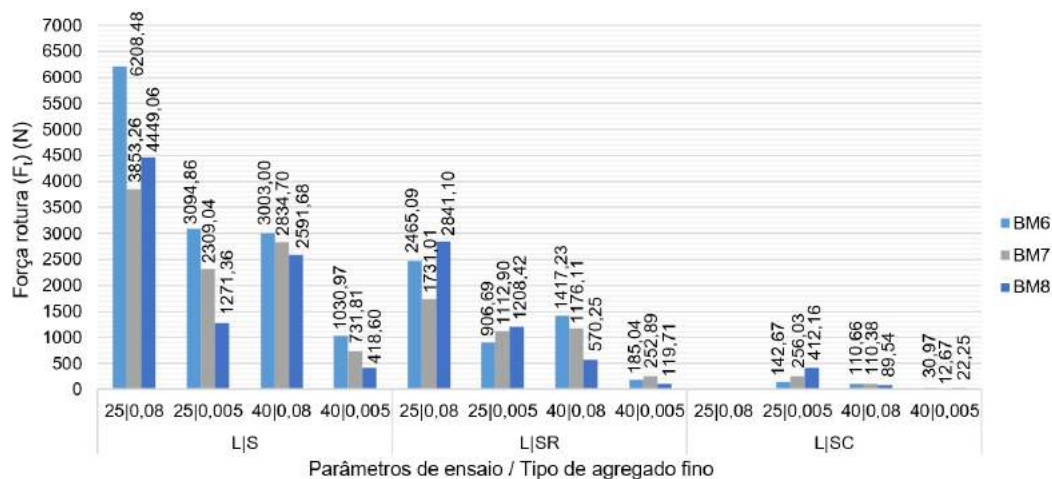


Figura 4.25: Influência do tipo de agregado fino no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com fíler recuperado (L).

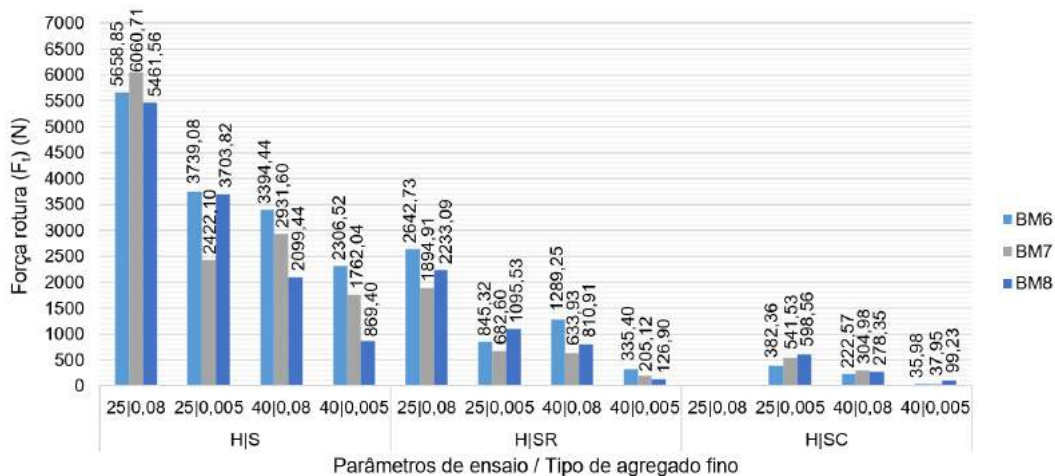


Figura 4.26: Influência do tipo de agregado fino no valor da força de rotura dos provetes de argamassas betuminosas com fíler de cal hidráulica (H).

Os valores de deslocamento na rotura (Figuras 4.27 e 4.28) para as argamassas betuminosas padrão (S) é muito menor, em média 4,08 mm, do que as argamassas betuminosas com borracha (SR), em média 15,11 mm, e as argamassas com cortiça (SC), em média 18,99 mm. Os valores dos deslocamentos na rotura, nos ensaios de compressão uniaxial, para as argamassas betuminosas com granulados de borracha (SR) ou com granulados de cortiça (SC) são maiores que os provetes padrão (S) devido ao volume de vazios destas

4.2. ENSAIOS MECÂNICOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO

argamassas, 16,6% e 21,1%, ser muito superior aos volume de vazios das argamassas padrão, 4,5%. Estas diferenças de valores também se devem à borracha e à cortiça serem materiais mais deformáveis que o pó de pedra.

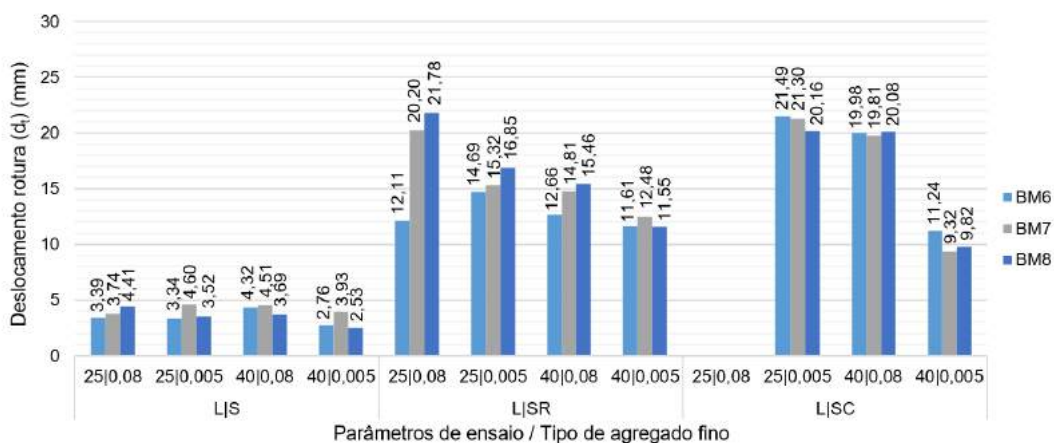


Figura 4.27: Influência do tipo de agregado fino no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com filer recuperado (L).

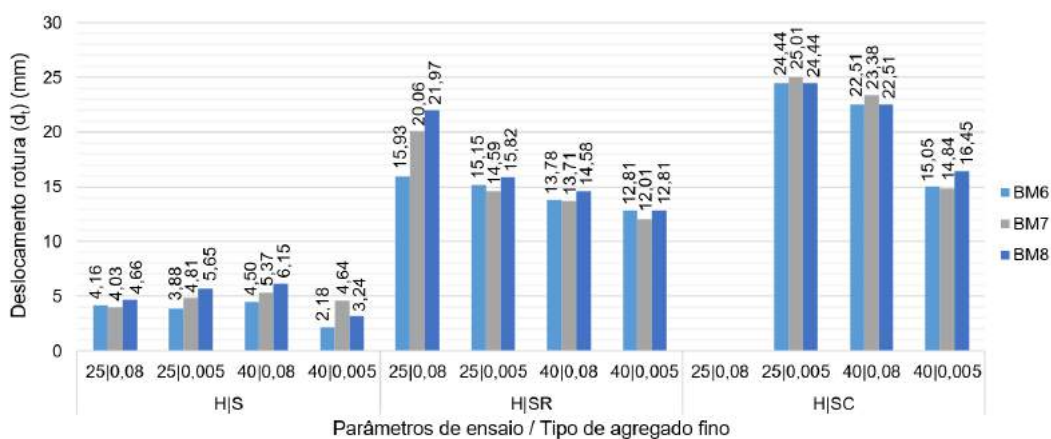


Figura 4.28: Influência da do tipo de agregado fino no valor do deslocamento na rotura dos provetes de argamassas betuminosas com filer de cal hidráulica (H).

4.3 Análise acústica

Nesta secção é avaliado o desempenho acústico das diferentes argamassas betuminosas e são comparados os resultados obtidos com os de dois materiais de construção correntes, o betão e a madeira de pinho. Esta avaliação dos comportamentos acústicos foi realizada através da medição da pressão sonora máxima gerada por impactos, efetuados por uma máquina de percussão, nos provetes de argamassas betuminosas, no provete de betão e no barrote de madeira de pinho. Foi registada, durante os ensaios, uma pressão sonora ambiente de 67,6 dB.

Na Figura 4.29 pode observar-se que quanto maior a percentagem de betume das argamassas, maior foi a pressão sonora registada. Esta diferença dos valores de pressão entre percentagens de betume é mais visível nos provetes de argamassas padrão (S), em que para o caso das argamassas com fíler recuperado (L) a diferença entre a menor e a maior percentagem de betume é de $-3,8$ dB e no caso das argamassas com fíler de cal hidráulica (H) a mesma diferença é de $-6,7$ dB. A diferença de pressão sonora entre a menor e a maior percentagem de betume das restantes argamassas é da ordem dos -2 dB.

Em relação ao tipo de fíler, as argamassas betuminosas com fíler recuperado (L) apresentam valores de pressão sonora superiores às argamassas betuminosas com fíler de cal hidráulica (H).

Quanto ao tipo de agregado fino, as argamassas betuminosas com substituição parcial de agregado (SR ou SC) obtiveram um menor valor de pressão sonora que as argamassas padrão (S), devido às características anti-vibráticas da borracha e da cortiça. Essa diferença relativamente às argamassas padrão (S) foi na ordem dos $-6,3$ dB para as argamassas com granulados de borracha e $-9,0$ dB para as argamassas com granulados de cortiça.

Sobre os materiais de construção correntes que serviram para comparação dos resultados obtidos, pode observar-se que para o betão se obteve valores de pressão sonora da mesma ordem que os provetes padrão (S) com maior percentagem de betume (BM8) e que para a madeira se obteve valores de pressão sonora da mesma ordem que os provetes de argamassas com granulados de cortiça (SC).

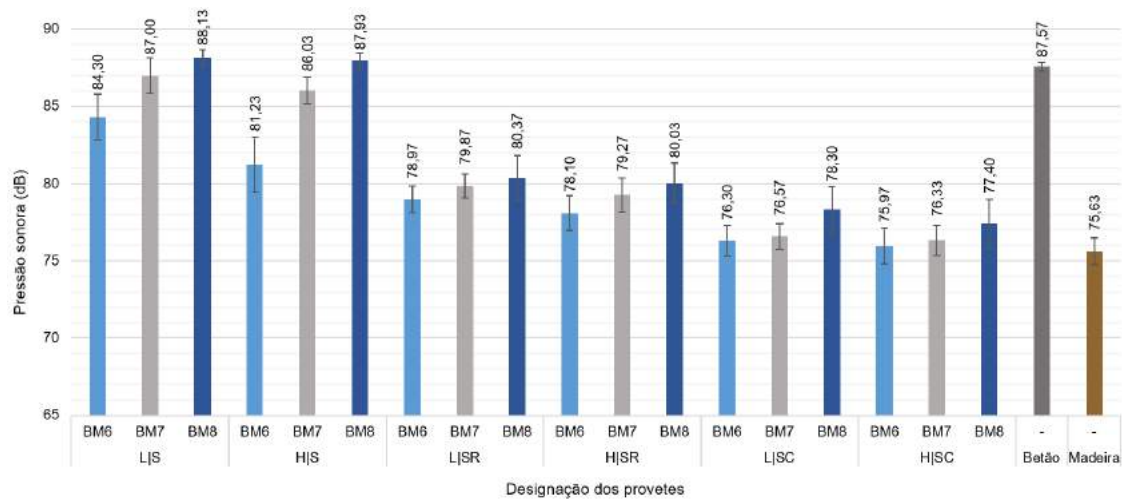


Figura 4.29: Pressão sonora dos provetes sujeitos a impactos por equipamento de percussão.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Considerações finais

No presente estudo caracterizaram-se argamassas betuminosas com granulados de borracha e de cortiça com o objectivo de contribuir para uma indústria de pavimentação mais sustentável. As argamassas betuminosas foram concebidas por forma a substituir 10% do agregado mineral por materiais provenientes da reciclagem de resíduos industriais, a borracha de pneus em fim de vida útil e os granulados de cortiça, reduzindo, assim, a sua deposição em aterros. Ao introduzir borracha e cortiça nas argamassas betuminosas é esperada uma modificação das suas propriedades mecânicas, nomeadamente em termos de resposta às aplicações de carga, e uma redução da produção de ruído da interação pneu-pavimento, devido às propriedades acústicas e anti-vibráticas que estes materiais apresentam. Posto isto, neste estudo caracterizaram-se as argamassas betuminosas com granulados de borracha e de cortiça com base na determinação das propriedades volumétricas dos provetes, na determinação da força e deslocamento na rotura (ensaio de compressão uniaxial) e na avaliação do desempenho acústico.

Enfatiza-se o facto dos estudos existentes na literatura sobre a incorporação destes materiais sustentáveis em misturas betuminosas serem relativamente recentes e a informação disponível sobre esta temática ser escassa. Em virtude de todas as condicionantes acima referidas, este estudo tornou-se ainda mais desafiante, devido ao desenvolvimento de processos e metodologias de fabrico de provetes e de procedimentos de ensaios.

Nos ensaios mecânicos de compressão uniaxial, por terem sido utilizadas várias variantes de ensaio como a temperatura, a velocidade, o tipo de fíler, o tipo de agregado fino e a percentagem de betume, originando uma ampla gama de combinações, o programa experimental foi bastante longo. No decorrer dos ensaios depararam-se com alguns constrangimentos inerentes às características do equipamento de ensaio e da sua utilização.

Assim, as principais conclusões que podem ser tiradas deste estudo são as seguintes:

- As argamassas com granulados de borracha (SR) e de cortiça (SC) apresentaram alturas médias maiores que as argamassas padrão (S) devido ao efeito da recuperação elástica dos materiais após compactação;
- As argamassas com granulados de cortiça (SC) exibiram diâmetros médios superiores às restantes devido à maior expansão transversal após desmoldagem;
- O volume de vazios das argamassas foi influenciado pela percentagem de betume, tipo de fíler e tipo de agregado fino. O seu valor diminui com o aumento da percentagem de betume na mistura. Para argamassas com fíler recuperado (L) obtiveram-se valores superiores que para argamassas com fíler de cal hidráulica (H). As argamassas com borracha e com cortiça apresentaram valores de volume de vazios superiores às argamassas padrão (S) devido ao efeito da recuperação elástica e da expansão após desmoldagem;
- As massas volúmicas dos provetes de argamassas betuminosas foram influenciadas de forma contrária ao volume de vazios. Destaca-se o facto de devido às massas volúmicas da borracha e da cortiça serem inferiores à massa volúmica do pó de pedra, as argamassas com estes materiais terem obtido valores inferiores de massa volúmica para além do facto dos seus volumes de vazios serem superiores às argamassas padrão (S);
- O volume de vazios na mistura de agregados (VMA) para as argamassas padrão (S) e para as com granulados de borracha (SR) aumenta com o incremento da percentagem de betume, tal como esperado. No caso das argamassas com granulados de cortiça (SC) os valores de VMA diminuíram com o aumento da percentagem de betume, possivelmente devido à porosidade que os grânulos de cortiça apresentam e que absorvem parte do betume presente na mistura;
- A percentagem de vazios preenchidos com betume (VFB) aumenta com o aumento da percentagem de betume, tal como esperado. As argamassas betuminosas com granulados de borracha (SR) e de cortiça (SC) obtiveram valores de VFB inferiores às argamassas padrão (S) devido ao seu volume de vazios ser superior. As argamassas com cortiça (SC) apresentaram valores de VFB menores que as restantes devido à porosidade dos seus grânulos, que absorvem parte do betume da mistura;
- Os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial foram influenciados pela temperatura de ensaio, pela velocidade de ensaio, pelo tipo de fíler, pelo tipo de agregado e pela percentagem de betume;
- Temperaturas de ensaio superiores ($T = 40^{\circ}\text{C}$) conduziram a menores valores de força de rotura, logo menor resistência das argamassas, devido às propriedades

reológicas do betume. Contrariamente ao esperado, o aumento da temperatura de ensaio resultou em menores deformações na rotura, ou seja, menor deformabilidade das argamassas betuminosas. Este facto poderá ter sido devido aos ensaios efetuados terem um carregamento superior ao que usualmente se utiliza para caracterizar este tipo de materiais, por exemplo nos ensaios cíclicos;

- Velocidades de ensaio superiores ($v = 0,08\text{mm/s}$) conduziram a maior resistência das argamassas e, ao contrário do que era esperado, a maiores deformações na rotura, ou seja maior deformabilidade das argamassas. Este facto poderá dever-se ao motivo anteriormente referido;
- As argamassas betuminosas com granulados de borracha (SR) atingiram maiores valores de força de rotura para o fíler recuperado (L), enquanto que as argamassas com cortiça (SC) e as argamassas padrão (S) atingiram maiores valores para o fíler de cal hidráulica (H). As deformações na rotura foram menores para as argamassas com fíler recuperado (L);
- As argamassas betuminosas com cortiça (SC) foram as que obtiveram menores valores de força de rotura (menor resistência), seguindo-se as argamassas com borracha (SR) e as que apresentaram maior resistência foram as argamassas padrão (S). Esta diferença de resistência deve-se à menor resistência dos materiais que constituem as argamassas com borracha (SR) e com cortiça (SC). As deformações na rotura foram superiores para as argamassas com cortiça devido à maior deformabilidade da cortiça em relação à borracha e ao pó de pedra;
- As argamassas betuminosas com maiores percentagens de betume apresentaram valores de força de rotura menores (menor resistência) e, na generalidade dos casos, maior deformação na rotura (maior deformabilidade);
- A pressão sonora registada no ensaio de produção de ruído gerado por impactos sobre os provetes foi menor para as argamassas betuminosas com granulados de borracha (SR) e de cortiça (SC), provando-se que estes materiais conferem melhoria acústica às misturas betuminosas onde são empregues. Os provetes de argamassas com granulados de cortiça foram os que obtiveram o melhor desempenho acústico, registando menores valores de pressão sonora.

Concluí-se, que os granulados de borracha e de cortiça conferem às argamassas betuminosas propriedades diferentes das argamassas convencionais e que embora a resistência mecânica seja inferior às argamassas convencionais, quando aplicadas em misturas betuminosas podem conferir um comportamento mecânico diferente, como por exemplo, ao nível da ductilidade. Para além da sua utilização em pavimentos rodoviários, também poderá existir outro tipo de aplicações em que estas argamassas sejam apropriadas.

Os resultados obtidos podem ter sido influenciados pela compactação realizada aquando do fabrico dos provetes. O procedimento efetuado pode não ser o que conduz à melhor compactação dos provetes com este tipo de materiais.

Relativamente às propriedades acústicas das argamassas betuminosas, o ensaio de medição da pressão sonora mostrou que os granulados de borracha e de cortiça melhoram as características acústicas.

Considera-se que o presente estudo constitui uma contribuição para o desenvolvimento de novas metodologias de ensaio de argamassas betuminosas incluindo técnicas de preparação de provetes e procedimentos de ensaio.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Após a elaboração desta dissertação, considera-se importante dar continuação ao presente estudo fazendo algumas alterações e melhoramentos.

Relativamente à formulação das argamassas e fabrico dos provetes sugerem-se: a utilização de outras percentagens de substituição do agregado pelos granulados de borracha e de cortiça e estudar métodos alternativos para o procedimento de compactação dos provetes.

Em relação aos procedimentos de ensaio, poderá realizar-se ensaios de compressão uniaxial com medição das deformações transversais dos provetes, de forma a obter as tensões de compressão, e alterar o procedimento realizado para os ensaios cíclicos, de modo a caracterizar as propriedades viscoelásticas das argamassas betuminosas.

Por último, considera-se interessante permitir que em estudos posteriores, seja possível correlacionar as características das misturas betuminosas com agregado de maiores dimensões com o comportamento das argamassas betuminosas que essas misturas integram.

Referências Bibliográficas

- (1) Branco, F.; Pereira, P.; Picado-Santos, L., *Pavimentos rodoviários*; Edições Almedina: Coimbra, 2011.
- (2) Fortes, M. A.; Rosa, M. E.; Pereira, H., *A cortiça*; IST Press Lisboa: 2004.
- (3) Guerra, A. Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de mastiques betuminosos com o reómetro de corte dinâmico., Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- (4) Moreno, A. Caracterização reológica de mastiques betuminosos., Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- (5) EAPA What is Asphalt. European Asphalt Pavement Association, <http://www.eapa.org/promo.php?c=173> (acedido em 21/09/2018).
- (6) Silva, H. Caracterização do mástico betuminoso e da ligação agregado-mástico, Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas., Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, 2005.
- (7) JAE Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional.; Junta Autónoma de Estradas, Almada, 1995.
- (8) IPQ, *NP EN 13108-1:2011 - Misturas betuminosas. Especificações dos materiais, Parte 1: Betão betuminoso*, Caparica (Portugal), 2011.
- (9) EP, *Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03 - Pavimentação - Características dos Materiais*; Estradas de Portugal, S.A.: 2014.
- (10) Asphalt-Institute, *Asphalt technology and construction practices*; Asphalt Institute, ES-1: Maryland, 1983.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (11) Cepsa Capítulo 5: Misturas Betuminosas. http://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Admin_WebMaster/Contenidos_comunes/Documentos/Cap%205.pdf (acedido em 11/09/2018).
- (12) IPQ, NP EN 12591:2011 - *Betumes e ligantes betuminosos - Especificações para betumes de pavimentação*, Caparica (Portugal), 2011.
- (13) Lombardi, B., *Du Pétrole Brut Au Bitume: La Longue Marche*; n.707; Revue Général des Routes et des Aérodomes: 1993, pp. 25-70.
- (14) Whiteoak, D.; Read, J., *The Shell Bitumen Handbook*, Fifth Edition; Shell Bitumen, Thomas Telford Publishing: London (UK), 2003.
- (15) LNEC em *Vocabulário de Estradas e Aeródromos*; LNEC: Lisboa, 1962.
- (16) IPQ, NP EN 13043:2004 - *Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação*, Caparica (Portugal), 2004.
- (17) Velho, J.; Gomes, C.; Romariz, C., *Minerais Industriais*; Gráfica de Coimbra: Coimbra, 1998.
- (18) Santana, H. em, 29º Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, Brasil, 1995.
- (19) Huang, B.; S., X.; Chen, X., *Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties*; International Journal of Pavement Engineering: 2007; vol. 8:1, pp. 1-9.
- (20) IPQ, NP EN 933-10:2003 - *Ensaio para determinação das propriedades geométricas dos agregados, Parte 10: Determinação do teor de finos. Granulometria dos fileres (peneiração por jato de ar)*, Caparica (Portugal), 2003.
- (21) IPQ, NP EN 12697-4:2003 - *Ensaio das propriedades físicas e mecânicas dos agregados, Parte 4: Determinação dos vazios do filer seco compactado*, Caparica (Portugal), 2003.
- (22) IPQ, NP EN 1097-7:2012 - *Ensaio das propriedades físicas e mecânicas dos agregados, Parte 7: Determinação da massa volúmica do filer. Método do picnómetro*, Caparica (Portugal), 2012.
- (23) Antunes, V. *Influência do filer no comportamento de mastiques betuminosos.*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- (24) Conselho da União Europeia Directiva No 2008/98/CE relativa aos resíduos e que revoga certas directivas., 2008.
- (25) Baptista, A. M. *Misturas betuminosas recicladas a quente em central.*, Tese de Doutoramento em Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.
- (26) Fernandes G. and Capitão, S.; Picado-Santos, L. em, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2013.

- (27) Pena, D. Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória (Brasil), 2004.
- (28) Marques, P. Contribuição para o estudo da viabilidade de escórias de aciaria em misturas betuminosas., Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- (29) Kalantar, Z.; Karim, M.; Mahrez, A., *A review of using waste and virgin polymer in pavement*; Construction and Building Materials: 2012; vol. 85, pp. 7–8.
- (30) Yildirim, Y., *Polymer modified asphalt binders*; Construction and Building Materials: 2007; vol. 21, pp. 66–72.
- (31) Costa L. and Fernandes, S.; Silva H. and Oliveira, J. em, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2013.
- (32) Valorpneu Indicadores Valorpneu. http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?caso=GRAFICOS&lang=pt&id_object=1330&name=Indicadores-Valorpneu (acedido em 21/11/2018).
- (33) Zanetti, M. C.; Santagata, E.; Dalmazzo, D.; Lanotte, M. A., *Characterization of crumb rubber from end-of-life tyres for paving applications*; Waste Management: 2015.
- (34) Goodyear Charles Goodyear and the strange story of rubber. Goodyear, <https://corporate.goodyear.com/en-US/about/history.html> (acedido em 23/11/2018).
- (35) CEDEX Manual de empleo de caucho NFU en mezclas bituminosas., 2007.
- (36) Dias, J. L. Misturas betuminosas incorporando por via seca borracha de pneus usados - Caracterização e validação tecnológica., Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.
- (37) Recipneu Produtos - Granulado criogénico. <http://www.recipneu.com/default.aspx?cntx=R93joPryNb07ybT6rJyLGtpa0IoIkoMmXWex54bSLko%3D> (acedido em 21/11/2018).
- (38) Biosafe Produtos - BioRG. http://www.biosafe.pt/pt/media/35248/biorg_fp.pdf (acedido em 21/11/2018).
- (39) Recipav Engenharia e Pavimentos, S. Produtos pavimentos. <http://www.recipav.pt/> (acedido em 23/11/2018).
- (40) Miranda, H.; Neves, J.; Batista, F.; Antunes, M.; Fonseca, P. em, 5º Congresso Rodoviário Português, Estoril, 2008.
- (41) Rodrigues, R. Análise da aplicação do betume modificado com borracha em Portugal., Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- (42) Gil, L., *Manual Técnico: A cortiça como material de construção*; APCOR, Portugal: 2007.

- (43) Gil, L., *Cork Composites: A Review*; 3; *Materials*: 2009; vol. 2, pp. 776–789.
- (44) Amorim A cortiça. <http://www.amorim.com/a-cortica/localizacao-do-montado/> (acedido em 26/11/2018).
- (45) Gil, L., *A Química da Cortiça: ponto de situação*; nº 50; *Química*: 1993.
- (46) Silva, S. P.; Sabino, M. A.; Fernandes, E. M.; Correló, V. M.; Boesel, L. F.; Reis, R. L., *Cork: properties, capabilities and applications*; 6; *International Materials Reviews*: 2005; vol. 50, pp. 345–365.
- (47) Cortiça Natural. <http://www.amorimcork.com/natural-cork/raw-material-and-production-process/> (acedido em 26/11/2018).
- (48) Gil, L., *Cork powder waste: An overview*; C; *Biomass e Bioenergy*: 1997; vol. 13, pp. 59–61.
- (49) Amorim A cortiça. <http://www.amorim.com/a-cortica/o-que-e/> (acedido em 26/11/2018).
- (50) Pereira, S.; Oliveira, J.; Freitas, E.; Machado, P., *Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes*; *Construction and Building Materials*: 2013.
- (51) Barnes, H.; J., H.; K., W., *An Introduction to Rheology*; Elsevier Publishers: Amesterdão, 1989.
- (52) Santos, A. Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados., *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- (53) Yildirim, Y.; Solaimanian, M.; Kennedy, T. W. *Mixing and compactation Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete*; Report nº 1250-5; University of Texas, Austin, 2000.
- (54) Cavadas, A. Hidrodinâmica de jactos de impacto confinados escoamento de fluidos newtonianos e não newtonianos., *Doutor em Engenharia Mecânica*, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- (55) AMETEK Brookfield, *More solutions to sticky problems*; Laboratories, B. E., ed.; Brookfield Engineering Laboratories, Middleboro: 2017.
- (56) Neves, J. M.; Correia, A. G., *Caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos*; nº 26; *Revista Engenharia Civil*, Universidade do Minho, Guimarães: 2006, pp. 61–74.
- (57) Neves, J. M. Contribuição para a modelação do comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis., *Tese de Doutoramento*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2001.

- (58) Martinho, F. Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de subprodutos Industriais - Caracterização e Validação Tecnológica., Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2014.
- (59) CEN, EN 12697-26:2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt, Part 26: Stiffness*, Brussels (Belgium), 2004.
- (60) Eurobitume, *Rheology of Bituminous Binders: Glossary of Rheological Terms - A Practical Summary of the Most Common Concepts*; European Bitumen Association: 1996.
- (61) Pereira, A. Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de betumes com o reómetro de corte dinâmico., Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- (62) Yussof, N. Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders., PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 2012.
- (63) Airey, G. Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens., PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 1997.
- (64) Batista, F. Novas técnicas de reabilitação de pavimentos – Misturas betuminosas densas a frio., Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.
- (65) CEN, EN 12697-25:2005 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt, Part 25: Cyclic compression test*, Brussels (Belgium), 2005.
- (66) Freire, A. Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários., Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2002.
- (67) Groover, M., *Fundamentals of Modern Manufacturing - Materials, Processes, and Systems*, 4th ed.; Wiley: 1996.
- (68) Santos, A. Estudo da eficácia na redução do ruído de tráfego em pavimentos drenantes., Dissertação de Mestrado em Engenharia Rodoviária, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2007.
- (69) Wayson, R., *Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise*; NCHRP - Synthesis of Highway Practice 268, Transportation Research Board, Washington, D.C. (USA): 1998.
- (70) Cunha, C. Perceção de ruído de tráfego rodoviário., Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2013.
- (71) IA, *O ruído e a cidade*; Instituto do Ambiente: 2004.
- (72) Agency, E. E., *Noise in Europe*, 2014.
- (73) Murphy, E.; King, E., *Environmental Noise Pollution*; Elsevier: 2014.
- (74) Consortium, T. S., *Guidelines for road traffic noise abatement*, 2003.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (75) Sainio, P. *Notra- Noise trailer in pavement evolution measurements*; rel. téc.; TKK Autolaboratorio, 2004.
- (76) Kropp, W.; Kihlman, T.; Forssen, J.; Ivarsson, L., *Reduction Potential of Road Traffic Noise*; Alfa Print, Stockholm: 2007.
- (77) Gibbs, D.; Iwasaki, R.; Bernhard, R.; Bledsoe, J.; Carlson, D.; Corbisier, C.; Fults, K.; Hearne, T.; McMullen, K.; Newcomb, D.; Roberts, J.; Rochat, J.; Scofield, L.; Swanlund, M., *Quiet Pavement Systems in Europe*; Federal Highway Administration - U.S. Department of Transportation: 2005.
- (78) Ripke, O.; Andersen, B.; Bendtsen, H.; Sandberg, U., *Report of promising new road surfaces for testing Work Package WP F.2 New production technologies for surfaces on urban main roads*; EUROPEAN COMMISSION DG RESEARCH: 2005.
- (79) Bendtsen, H.; Nielsen, E., *DRI – DWW thin layer project – final report*; Danish Road Institute, Denmark: 2008.
- (80) CEN, *EN 1426:2007 - Bitumen and Bituminous binders - Determination of needle penetration*, Brussels (Belgium), 2007.
- (81) CEN, *EN 1427:2007 - Bitumen and Bituminous binders - Determination of the softening point, Ring and ball method*, Brussels (Belgium), 2007.
- (82) IPQ, *NP EN 933-1:2000 - Ensaio para determinação das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*, Caparica (Portugal), 2000.
- (83) IPQ, *NP EN 932-2:2002 - Ensaio das propriedades gerais dos agregados, Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais*, Caparica (Portugal), 2002.
- (84) IPQ, *NP EN 1097-6:2013 - Ensaio das propriedades físicas e mecânicas dos agregados, Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*, Caparica (Portugal), 2013.
- (85) ISO, *ISO 2030:1990 - Granulated cork - Size analysis by mechanical sieving*, Geneva (Switzerland), 1990.
- (86) Micaelo, R. *Compactação de misturas betuminosas - Ensaio de campo e modelação numérica.*, Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- (87) Matos, P. *Temperaturas de Fabrico e Compactação de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados: Interação Agregado-Betume.*, Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- (88) Gameiro, A. *Produção de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados: Compactabilidade e Comportamento Mecânico.*, Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

- (89) CEN, EN 12697-32:2007 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt, Part 26: Laboratory compaction of bituminous mixtures by vibratory compactor*, Brussels (Belgium), 2007.
- (90) CEN, EN 12697-6:2012 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt, Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*, Brussels (Belgium), 2012.
- (91) IPQ, NP EN 12594:2009 - *Betumes e ligantes betuminosos - Preparação de amostras de ensaio*, Caparica (Portugal), 2011.
- (92) CEN, EN 12697-29:2002 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt, Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen*, Brussels (Belgium), 2002.
- (93) CEN, EN 12697-8:2003 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt, Part 8: Determination of void characteristics of bituminous mixtures*, Brussels (Belgium), 2003.
- (94) CEN, EN 12697-5:2009 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt, Part 5: Determination of the maximum density*, Brussels (Belgium), 2009.
- (95) Bonaquist, R.; Christensen, D.; Stump, W., *NCHRP Report 513 – Simple Performance Tester for Superpave Mix Design, NCHRP Project D09-29 - First-Article Development and Evaluation*; The National Academies Press, Washington, D.C.(USA): 2003.

Apêndice A

Resultados da caracterização dos provetes

Tabela A.1: Altura média, diâmetro médio e massa volúmica média dos provetes de argamassas betuminosas e respectivos desvios padrão.

Provete	Altura média (mm)	Desvio padrão (Altura média) (mm)	Diâmetro médio (mm)	Desvio padrão (Diâmetro médio) (mm)	ρ_b , dim média (kg/m ³)	Desvio padrão (ρ_b , dim média) (kg/m ³)
BM6 L S	73,57	1,36	53,28	1,18	2295,01	129,19
BM6 H S	75,61	1,96	53,20	1,15	2292,51	87,86
BM7 L S	74,78	1,55	53,19	1,35	2315,44	67,73
BM7 H S	74,77	1,91	53,20	1,29	2293,15	91,08
BM8 L S	75,26	1,76	52,70	1,34	2290,82	123,44
BM8 H S	76,79	2,29	52,85	1,34	2309,00	94,49
BM6 L SR	82,21	2,57	53,18	1,33	1806,98	38,61
BM6 H SR	83,22	2,34	52,68	1,25	1831,02	79,73
BM7 L SR	82,56	2,67	53,26	1,12	1777,87	42,15
BM7 H SR	83,76	0,68	52,63	1,00	1796,26	64,77
BM8 L SR	84,52	1,42	52,89	1,18	1817,16	39,28
BM8 H SR	84,18	1,99	52,89	1,15	1875,06	56,53
BM6 L SC	82,96	4,42	55,10	0,62	913,73	65,03
BM6 H SC	83,37	2,75	53,71	1,19	965,94	83,91
BM7 L SC	83,79	3,21	54,20	1,08	958,22	34,91
BM7 H SC	82,73	3,79	53,59	1,21	1035,16	62,37
BM8 L SC	83,82	2,61	53,88	1,16	990,98	78,38
BM8 H SC	79,88	3,24	53,60	0,86	1095,70	69,33

APÊNDICE A. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES

Tabela A.2: Massa volúmica máxima teórica, volume de vazios, volume de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume dos provetes de argamassas betuminosas.

Provete	$\rho_{\text{máx}_t}$ (kg/m^3)	V_m (%)	VMA (%)	VBF (%)
BM6 L S	2442,97	6,06	20,63	70,65
BM6 H S	2433,43	5,79	20,35	71,55
BM7 L S	2413,65	4,07	20,72	80,36
BM7 H S	2403,11	4,58	21,07	78,28
BM8 L S	2385,55	3,97	22,33	82,22
BM8 H S	2374,08	2,74	21,25	87,10
BM6 L SR	2220,00	18,60	30,08	38,15
BM6 H SR	2212,12	17,23	28,86	40,30
BM7 L SR	2199,72	17,72	30,74	42,34
BM7 H SR	2190,96	15,73	29,01	45,77
BM8 L SR	2180,16	16,65	31,22	46,66
BM8 H SR	2170,58	13,61	28,65	52,47
BM6 L SC	1256,55	27,28	33,09	17,54
BM6 H SC	1254,02	22,97	29,11	21,08
BM7 L SC	1260,86	24,00	30,89	22,31
BM7 H SC	1257,98	17,71	25,16	29,59
BM8 L SC	1265,13	21,67	29,61	26,83
BM8 H SC	1261,90	13,17	21,95	40,01

Apêndice B

Resultados dos ensaios monotônicos de compressão - Gráficos força / deslocamento

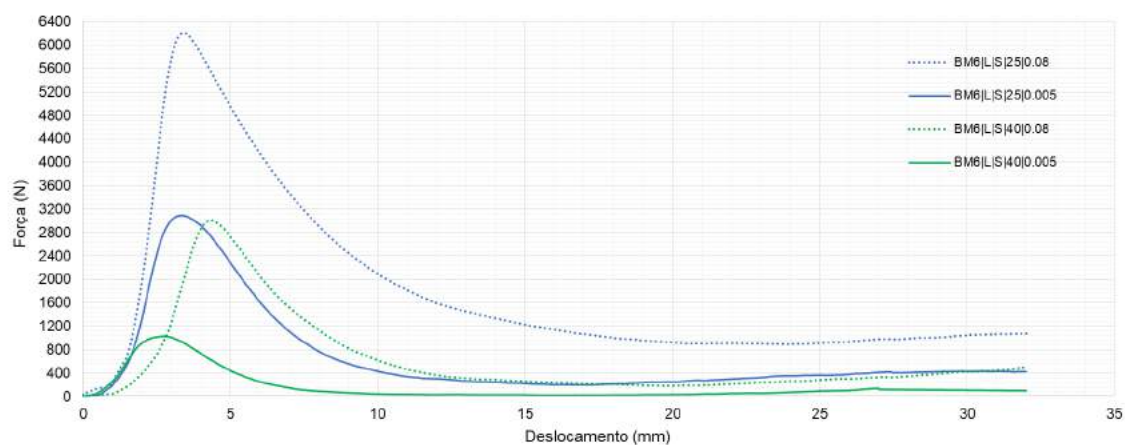


Figura B.1: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), filer recuperado (L) e pó de pedra (S).

APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO -
GRÁFICOS FORÇA / DESLOCAMENTO

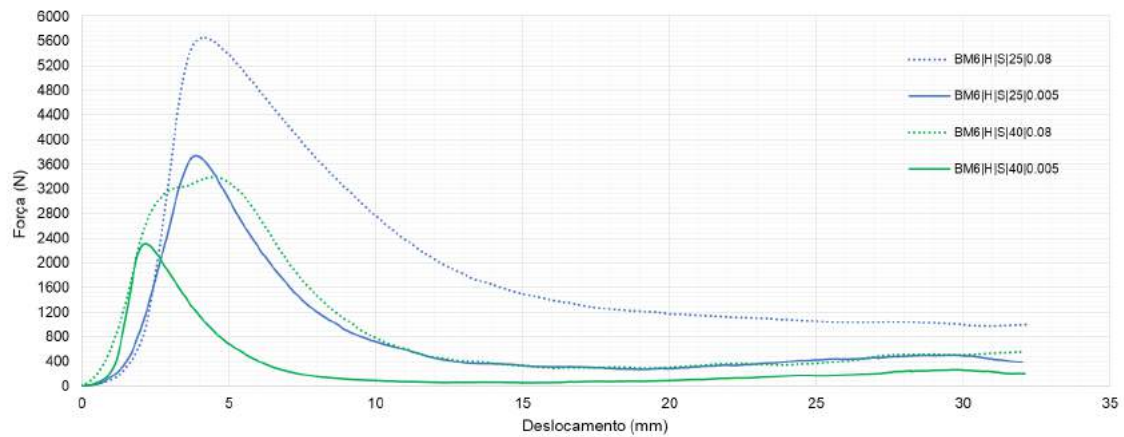


Figura B.2: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove-tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra (S).

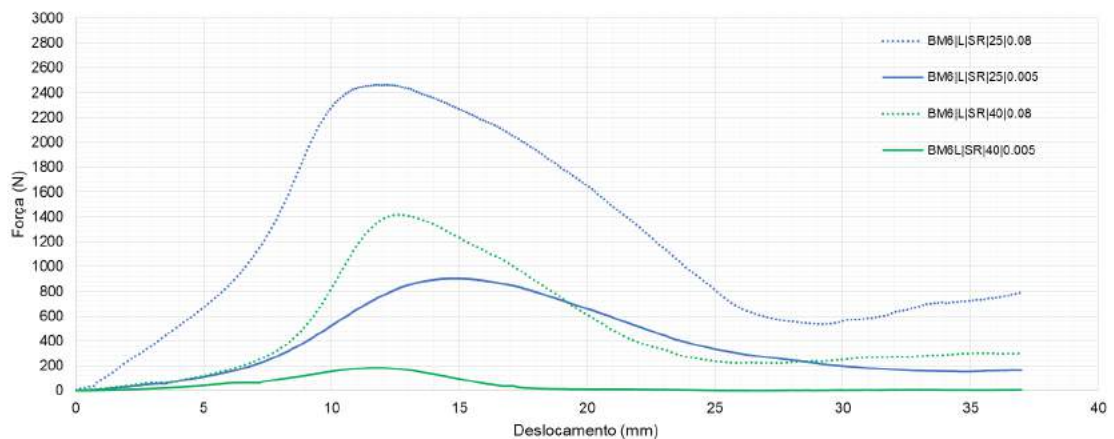


Figura B.3: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove-tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).

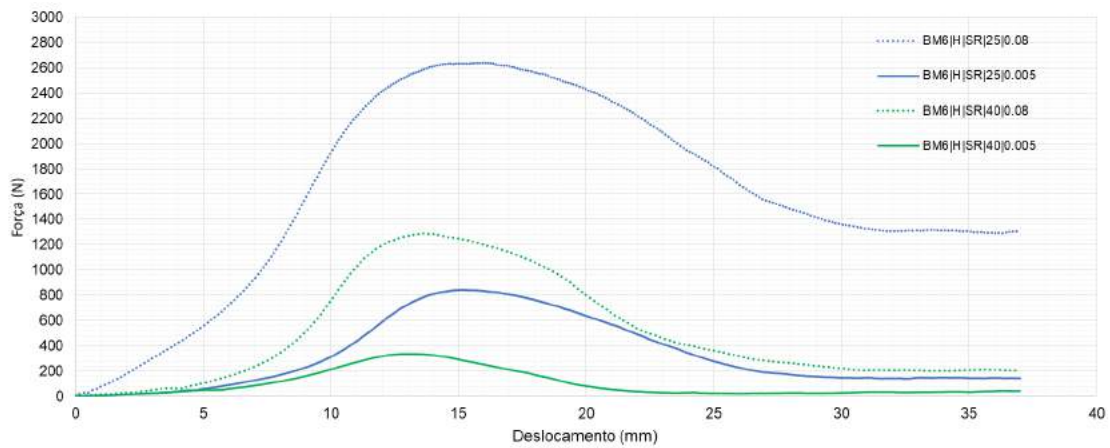


Figura B.4: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove-tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).

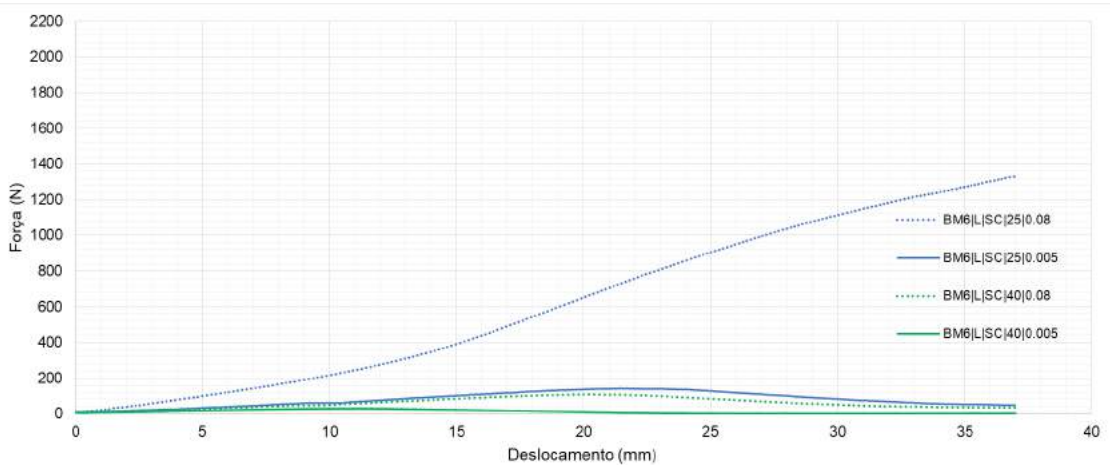


Figura B.5: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove-tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).

APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO -
GRÁFICOS FORÇA / DESLOCAMENTO

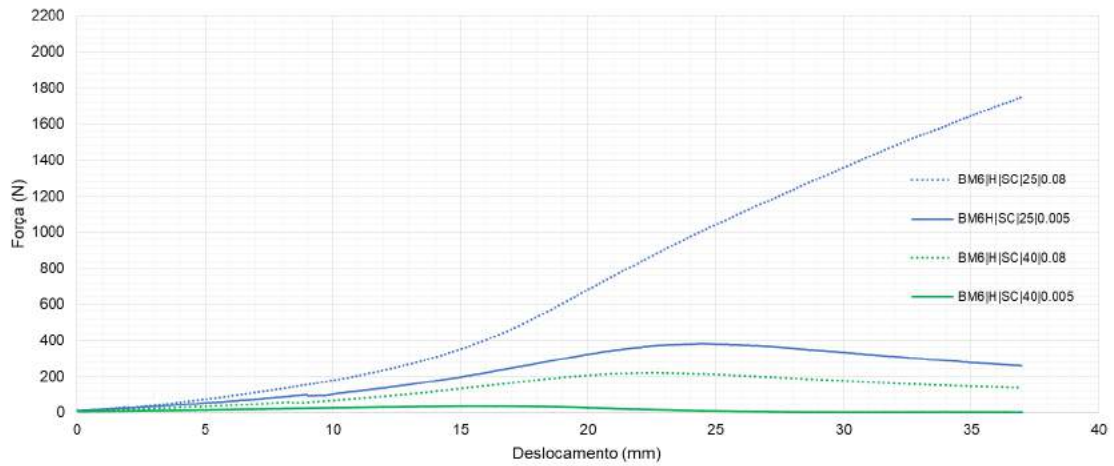


Figura B.6: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove-tes de argamassas betuminosas com $P_b = 6,54\%$ (BM6), filer de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).

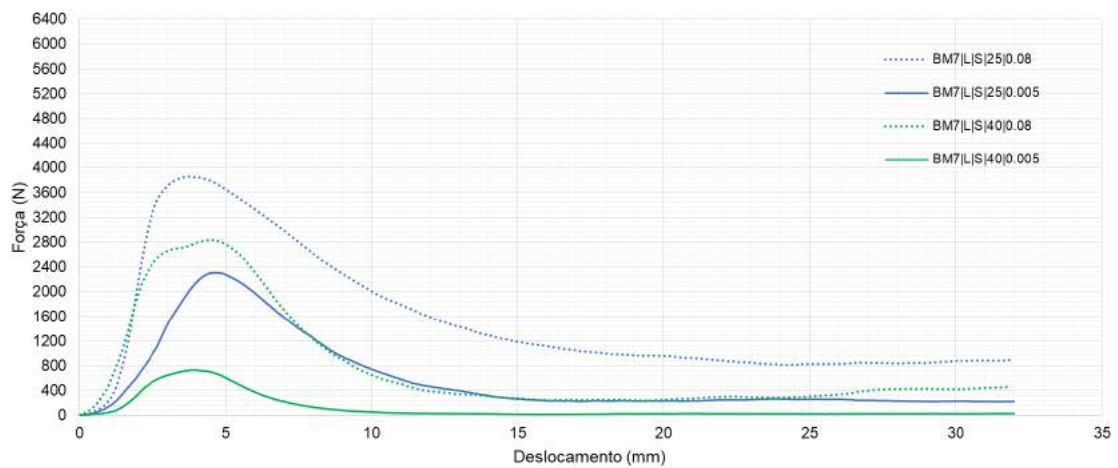


Figura B.7: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove-tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), filer recuperado (L) e pó de pedra (S).

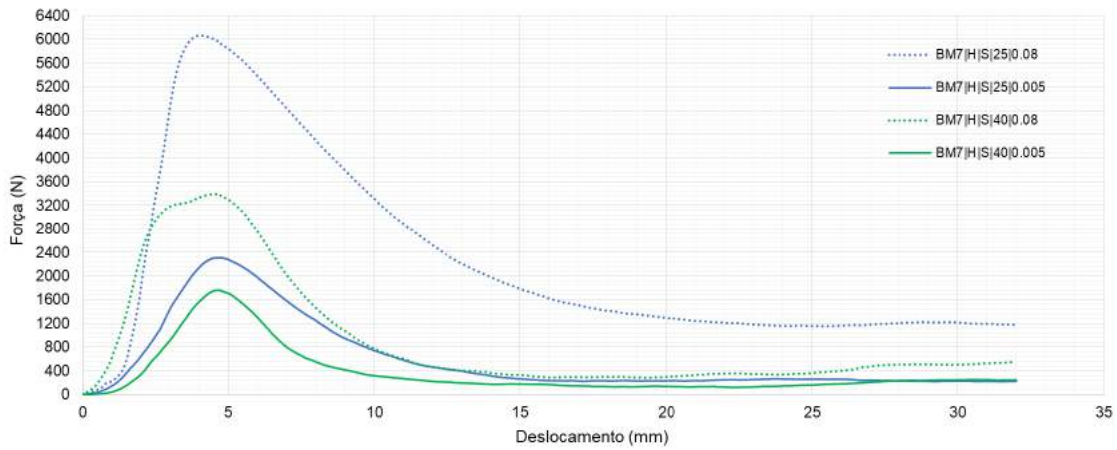


Figura B.8: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove-tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra (S).

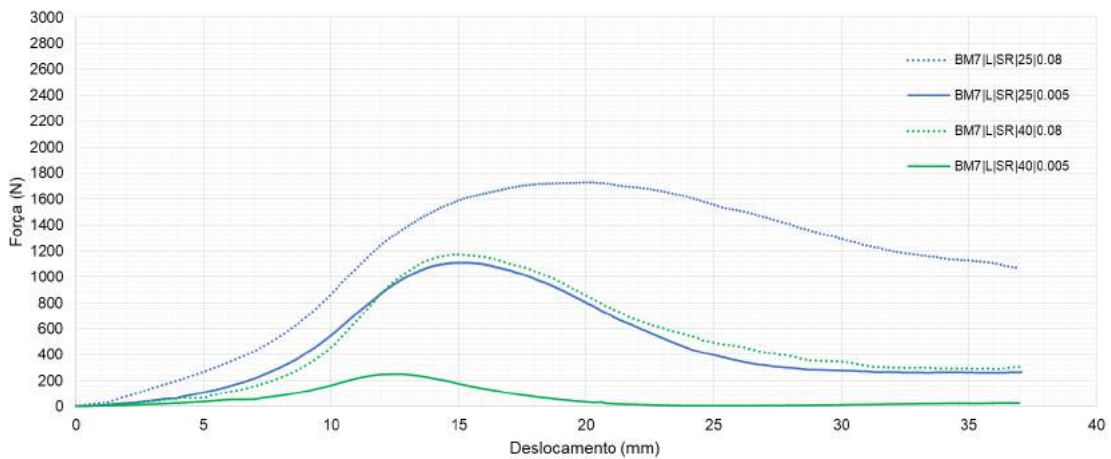


Figura B.9: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos prove-tes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).

APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO -
GRÁFICOS FORÇA / DESLOCAMENTO

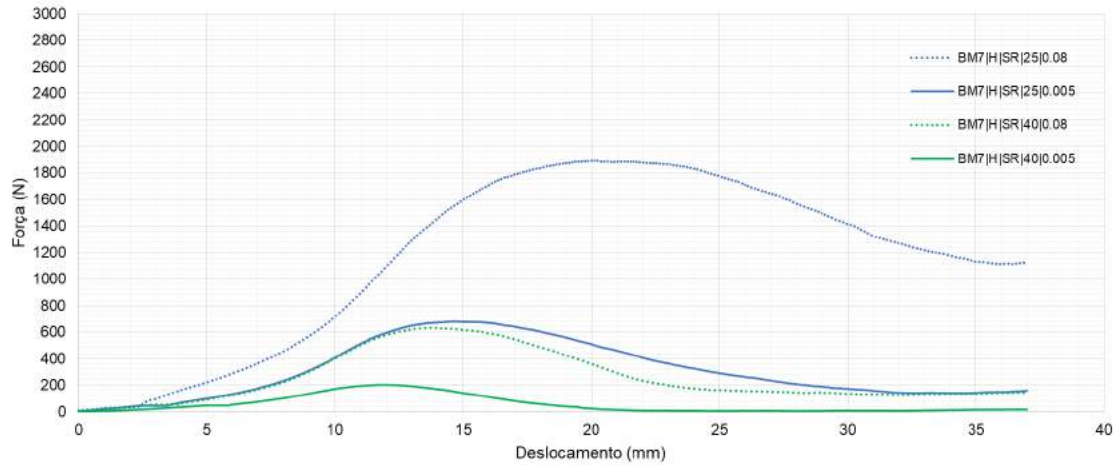


Figura B.10: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos protótipos de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).

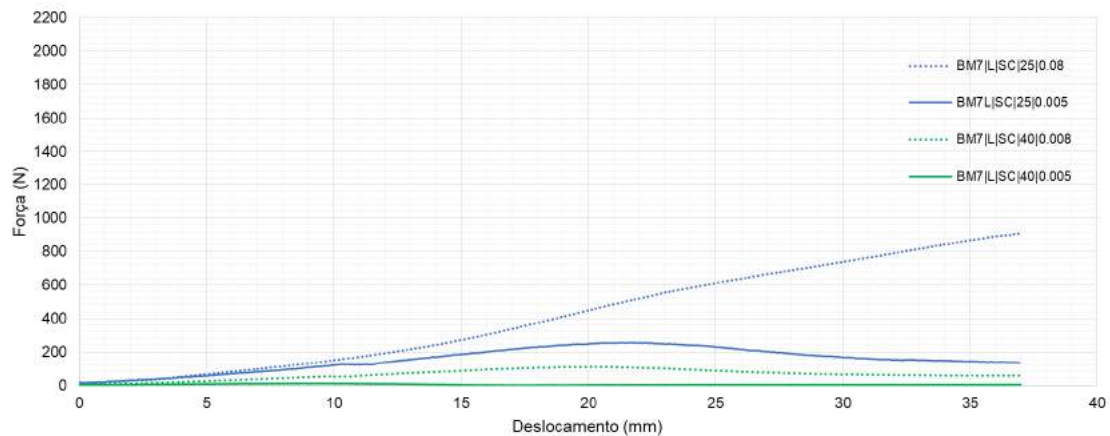


Figura B.11: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos protótipos de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler recuperado (L) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).

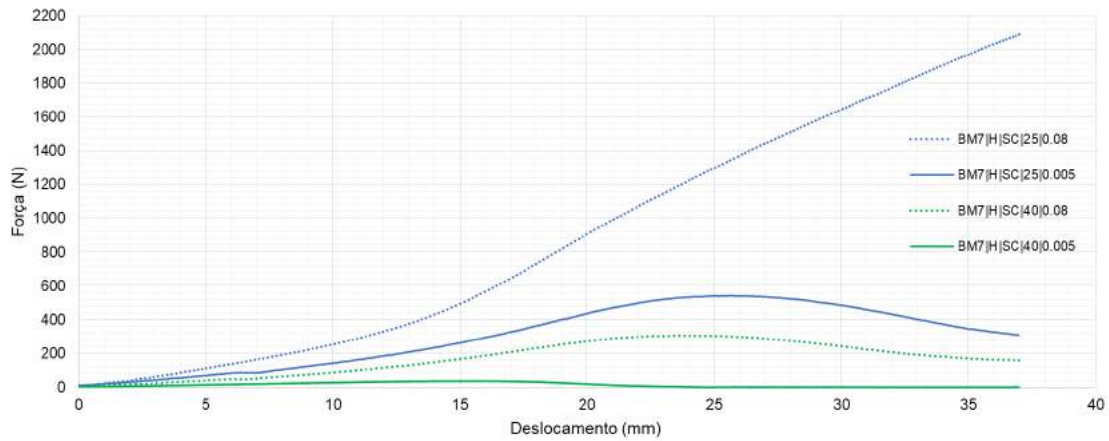


Figura B.12: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 7,41\%$ (BM7), fíler de cal hidráulica (H) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).

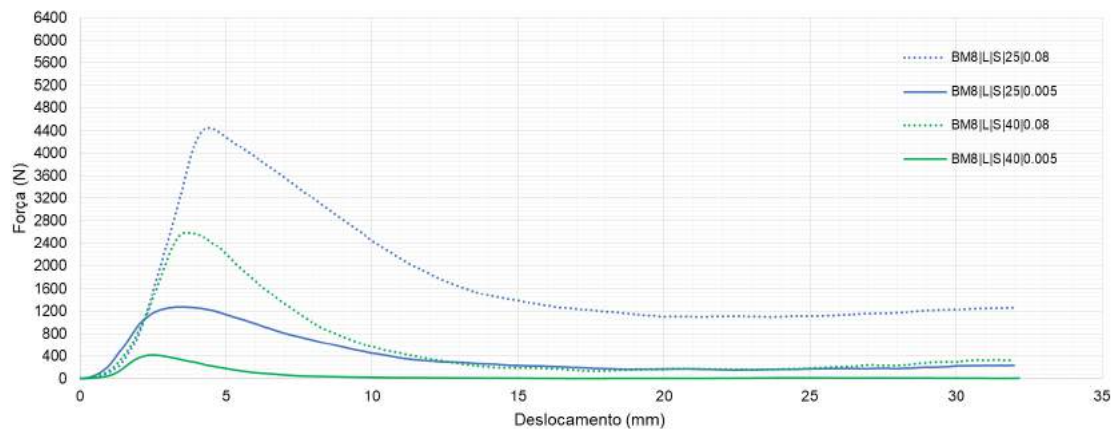


Figura B.13: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), fíler recuperado (L) e pó de pedra (S).

APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO -
GRÁFICOS FORÇA / DESLOCAMENTO

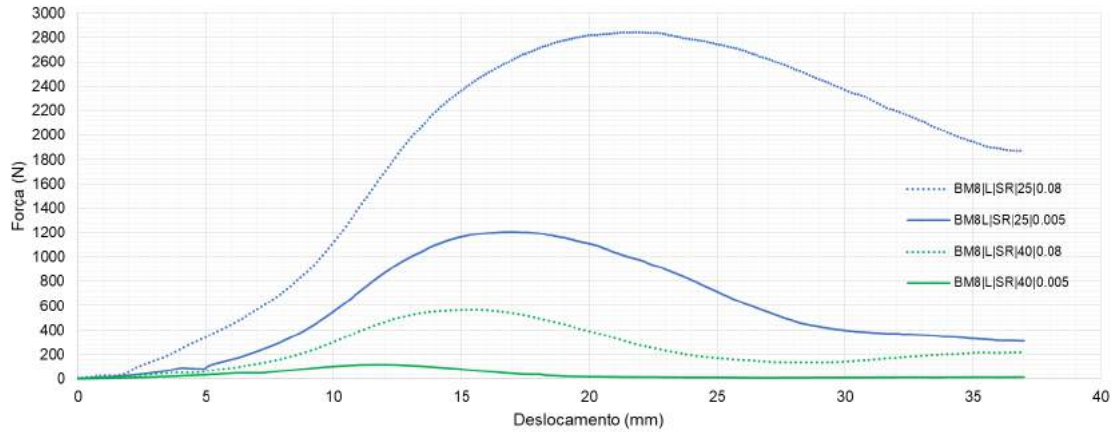


Figura B.14: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), filer recuperado (L) e pó de pedra + granulado de borracha (SR).

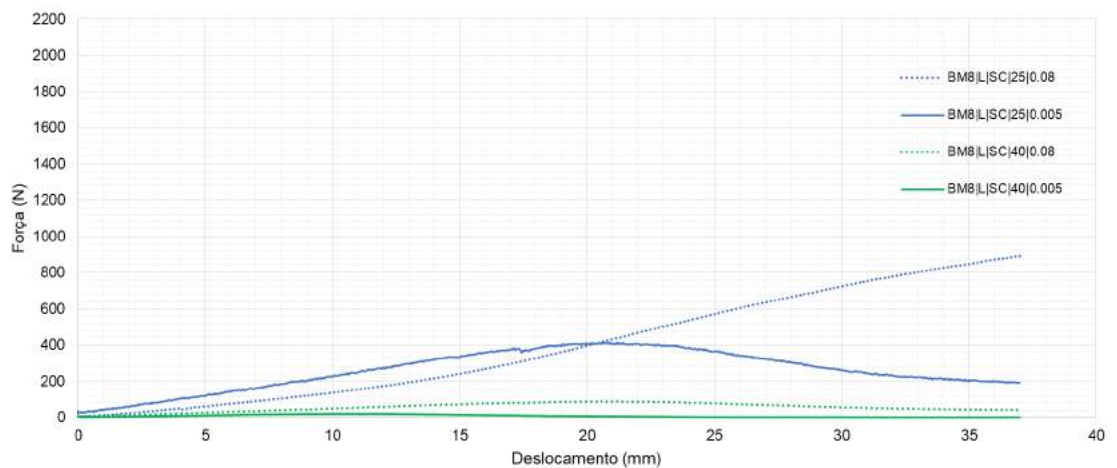


Figura B.15: Gráfico força/deslocamento para as várias configurações de ensaio dos provetes de argamassas betuminosas com $P_b = 8,26\%$ (BM8), filer recuperado (L) e pó de pedra + granulado de cortiça (SC).

Apêndice C

Resultados dos ensaios monotônicos de compressão - Valores de força e deslocamento na rotura

Tabela C.1: Valores de força e deslocamento na rotura obtidos para argamassas betuminosas com pó de pedra (S), com fíler recuperado (L) ou fíler de cal hidráulica (H), para as várias configurações de ensaio.

Provete	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	F _t (N)	d _t (mm)	Provete	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	F _t (N)	d _t (mm)
BM6 L S	25	0,08	6208,48	3,39	BM6 H S	25	0,08	5658,85	4,16
		0,005	3094,86	3,34			0,005	3739,08	3,88
	40	0,08	3003,00	4,32		40	0,08	3394,44	4,50
		0,005	1030,97	2,76			0,005	2306,52	2,18
BM7 L S	25	0,08	3853,26	3,74	BM7 H S	25	0,08	6060,71	4,03
		0,005	2309,04	4,60			0,005	2422,10	4,81
	40	0,08	2834,70	4,51		40	0,08	2931,60	5,37
		0,005	731,81	3,93			0,005	1762,04	4,64
BM8 L S	25	0,08	4449,06	4,41	BM8 H S	25	0,08	5461,56	4,66
		0,005	1271,36	3,52			0,005	3703,82	5,65
	40	0,08	2591,68	3,69		40	0,08	2099,44	6,15
		0,005	418,60	2,53			0,005	869,40	3,24

APÊNDICE C. RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS DE COMPRESSÃO - VALORES DE FORÇA E DESLOCAMENTO NA ROTURA

Tabela C.2: Valores de força e deslocamento na rotura obtidos para argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de borracha (SR), com fíler recuperado (L) ou fíler de cal hidráulica (H), para as várias configurações de ensaio.

Provete	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	F _t (N)	d _t (mm)	Provete	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	F _t (N)	d _t (mm)
BM6 L SR	25	0,08	2465,09	12,11	BM6 H SR	25	0,08	2642,73	15,93
		0,005	906,69	14,69			0,005	845,32	15,15
	40	0,08	1417,23	12,66		40	0,08	1289,25	13,78
		0,005	185,04	11,61			0,005	335,40	12,81
BM7 L SR	25	0,08	1731,01	20,20	BM7 H SR	25	0,08	1894,91	20,06
		0,005	1112,90	15,32			0,005	682,60	14,59
	40	0,08	1176,11	14,81		40	0,08	633,93	13,71
		0,005	252,89	12,48			0,005	205,12	12,01
BM8 L SR	25	0,08	2841,10	21,78	BM8 H SR	25	0,08	2233,09	21,97
		0,005	1208,42	16,85			0,005	1095,53	15,82
	40	0,08	570,25	15,46		40	0,08	810,91	14,58
		0,005	119,71	11,55			0,005	126,90	12,81

Tabela C.3: Valores de força e deslocamento na rotura obtidos para argamassas betuminosas com pó de pedra + granulado de cortiça (SC), com fíler recuperado (L) ou fíler de cal hidráulica (H), para as várias configurações de ensaio.

Provete	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	F _t (N)	d _t (mm)	Provete	Temperatura (°C)	Velocidade (mm/s)	F _t (N)	d _t (mm)
BM6 L SC	25	0,08	-	-	BM6 H SC	25	0,08	-	-
		0,005	142,67	21,49			0,005	382,36	24,44
	40	0,08	110,66	19,98		40	0,08	222,57	22,51
		0,005	30,97	11,24			0,005	35,98	15,05
BM7 L SC	25	0,08	-	-	BM7 H SC	25	0,08	-	-
		0,005	256,03	21,30			0,005	541,53	25,01
	40	0,08	110,38	19,81		40	0,08	304,98	23,38
		0,005	12,67	9,32			0,005	37,95	14,84
BM8 L SC	25	0,08	-	-	BM8 H SC	25	0,08	-	-
		0,005	412,16	20,16			0,005	598,56	24,44
	40	0,08	89,54	20,08		40	0,08	278,35	22,51
		0,005	22,25	9,82			0,005	99,23	16,45

Apêndice D

Resultados da análise acústica

Tabela D.1: Valores de pressão sonora dos provetes sujeitos a impactos por equipamento de percussão.

Provete	L_{max} (dB)	Desvio padrão (L_{max}) (dB)
BM6 L S	84,30	1,48
BM6 H S	81,23	1,79
BM7 L S	87,00	1,16
BM7 H S	86,03	0,86
BM8 L S	88,13	0,54
BM8 H S	87,93	0,50
BM6 L SR	78,97	0,86
BM6 H SR	78,10	1,14
BM7 L SR	79,87	0,77
BM7 H SR	79,27	1,12
BM8 L SR	80,37	1,44
BM8 H SR	80,03	1,31
BM6 L SC	76,30	1,00
BM6 H SC	75,97	1,15
BM7 L SC	76,57	0,84
BM7 H SC	76,33	0,99
BM8 L SC	78,30	1,51
BM8 H SC	77,40	1,61
Betão	87,57	0,29
Madeira	75,63	0,87

Anexo I

**Certificado de qualidade do betume
modificado PMB 45/80-65**

ANEXO I. CERTIFICADO DE QUALIDADE DO BETUME MODIFICADO PMB 45/80-65



Certificado de Qualidade



Nº de série: CQ13RM094

Tipo de produto: Betume Performance PMB 45/80-65 Lote: B13RM05/Amostra
 Local de Expedição: Rio Maior Data de emissão: 28-Mai-13
Emitido pelo Laboratório de Probigalp
 Nº Amostra: A 2013/0298

Descrição do Produto:

Betume Modificado com Polímero

Características:

Propriedades (1)	Norma	Unidade	Classe	Valor	Valores		
					Min	Max	
Ensaio sobre betume original	Penetração a 25°C, 100g, 5s	NP EN1426	0,1 mm	Classe 4	51	45	80
	Temperatura de amolecimento, A&B	Nº EN1427	°C	Classe 5	70,4	65	
	Ponto fragilidade Fraass	EN12503	°C	Classe 7	-17 t)		-15
	Recuperação elástica a 25°C	EN13398	%	Classe 3	91 t)	70	
	Estabilidade ao armazenamento	EN13399	°C	Classe 2	4,2 t)		5
	Varição da temperatura de amolecimento ou	EN1426					
	Estabilidade ao armazenamento na penetração	Varição EN13399 EN1427	0,1 mm	Classe 2	0 t)		9
Ponto de inflamação	EN ISO2592	°C	Classe 3	335 t)	235		
Durabilidade depois do ensaio de envelhecimento (EN12607-1)	Varição de massa	EN12607-1	%	Classe 5	-0,05 t)		1
	Penetração retica	EN1426	%	Classe 7	96 t)	60	
	Aumento de temperatura de amolecimento	EN1427	°C	Classe 3	-2,6 t)		10

Observações :

t) Valor de referência

Notas:

{1} - De acordo com a Norma Europeia EN 14023:2010 - Especificações de betumes modificados com polímero.



Probigalp, SA
 Fábrica de Rio Maior
Confirmação
 O presente CQ reproduz fielmente o respectivo ficheiro informático.
 Data: 28/05/13 Assinatura: [Signature]

P'º Responsável:

probigalp
 Augusto Almeida
 28-Mai-13
 Ligantes Betuminosos, SA

Nota: Documento processado por computador. Quando enviado por via electrónica não necessita assinatura.

Probigalp - Ligantes Betuminosos, SA | Zona Industrial de Rio Maior | 2040-998 Rio Maior | 00351 243 999 240 | riomaior@probigalp.pt

Figura I.1: Certificado de qualidade do betume modificado PMB 45/80-65.

Anexo II


Declaração de conformidade CE do fíler NHL5



DECLARAÇÃO DE CONFORMIDADE CE

SECIL MARTINGANÇA, SA	
Sede:	Fábrica:
Apartado 2 EC MACEIRA	Rua do Mercado, s/nº
2406-909 MACEIRA LRA	2405-018 MACEIRA LRA
Telef. 244 770 220 Fax 244 777 997	Telef. 244 770 220 Fax: 244 777 997
e-mail: geral@secilmartinganca.pt	
www.secilmartinganca.pt	

Fíler Comercial - Cal Hidráulica Natural NHL5

 09	Norma de referência: NP EN 13043
	Utilização prevista: Agregado para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.
Características	
Granulometria:	% de passado (massa)
2 mm	100
0,125 mm	95 ± 5
0,063 mm	80 ± 5
Teor em água	≤1 %
Finura (blaine)	5000 a 6400 cm ² /g
Massa Volúmica do Fíler	2,70 a 2,90 Mg/ m ³
Vazios de fíler seco compactado	28/45 %
Variação de temperatura anel e bola	DND ⁽¹⁾
Número de betume do fíler comercial	DND ⁽¹⁾
Solubilidade em água	WS ₁₀
Susceptibilidade em água	DND ⁽¹⁾
Azul de metileno	MB _{F10}
Massa Volúmica aparente (querosene)	0,5 a 0,9 Mg/m ³
<small>(1) - desempenho não determinado (anexo ZA, secção ZA. 1 da NP EN 13043)</small>	

Certificado de Controlo de Produção da Fábrica
1328 - CPD - 0148

Directo^r Geral


Luís Godcha dos Santos

11 de Novembro de 2010

TC.E.0355/1

SECIL MARTINGANÇA S.A.

Apartado 2
2406-909 MACEIRA LRA - PORTUGAL
Tel: 244 770 220 - Fax: 244 777 997
geral@secilmartinganca.pt
www.secilmartinganca.pt

Figura II.1: Declaração de conformidade CE do fíler NHL5.

