



**Estudo do desempenho
de misturas betuminosas para pavimentação
com incorporação de betão britado reciclado**

José Carlos Correia Lameirão

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Militar

Orientadores: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves
Doutora Ana Cristina Ferreira Oliveira Rosado Freire

Júri

Presidente: Professor Doutor João Torres de Quinhones Levy
Orientador: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves
Vogais: Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos
Tenente-Coronel de Engenharia Carlos Alberto Rocha Afonso

Novembro de 2016

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação só foi possível com a ajuda de um conjunto de pessoas que contribuíram, tanto de uma forma ativa como de uma forma indireta, para a consecução dos objetivos propostos.

Começo por agradecer ao Prof. José Neves, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, orientador desta dissertação, pela disponibilidade e ajuda na realização de todos os trabalhos necessários à elaboração da dissertação.

Agradeço à coorientadora, Doutora Ana Cristina Freire, Investigadora Auxiliar do Departamento de Transportes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo auxílio e disponibilidade prestada nos ensaios laboratoriais realizados nesse laboratório.

Grande parte do trabalho experimental não seria possível sem a preciosa ajuda e experiência do Rui Garcia, técnico do Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico, a quem deixo um agradecimento especial.

Agradeço ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela oportunidade e disponibilidade para a realização de alguns dos ensaios laboratoriais, e em especial aos técnicos de laboratório, Fernando Honrado Calado e José Reimão Costa, pela disponibilidade e trabalho prestado na realização de ensaios experimentais.

Agradeço à CEPSA, na pessoa da Eng^a Teresa Carvalho, pelo fornecimento do betume utilizado neste trabalho.

Por último, mas com a mesma importância, agradeço à minha família, amigos e camaradas da Academia Militar, pelo apoio, preocupação e incentivo demonstrado.

Resumo

O objetivo desta dissertação é estudar o desempenho de misturas betuminosas para pavimentação com incorporação de betão britado reciclado proveniente de resíduos de construção e demolição, para camadas de base. Em particular, pretende-se estudar o fenómeno de interação do betume de pavimentação com agregados reciclados de betão britado. Para isso, foi estudada uma mistura betuminosa com betão britado reciclado como agregado, em substituição do agregado de origem natural, numa taxa de incorporação de 60%, destinada a camadas de base (AC 20 base), e com um betume temperado 35/50 previamente aditivado em refinaria.

O trabalho experimental consistiu primeiramente na caracterização geométrica e física do agregado utilizado, de modo a completar a caracterização mecânica e química previamente já disponível.

A formulação da mistura betuminosa baseou-se no método empírico muito utilizado em Portugal, a metodologia Marshall.

Foram realizados ensaios experimentais de avaliação do desempenho da mistura betuminosas e do seu comportamento em serviço, como o ensaio de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, obtenção do módulo de rigidez e resistência à fadiga.

Os resultados obtidos dos ensaios são discutidos e comparados com trabalhos anteriormente realizados, de modo a poderem ser retiradas as conclusões que respondem ao objetivo inicialmente proposto.

Concluiu-se que, apesar de o betão britado reciclado não cumprir todos as especificações relativas aos agregados para utilização em camadas de base de pavimentação, a mistura betuminosa revelou globalmente um desempenho aceitável. O betão britado reciclado mostrou-se assim um material com potencial para ser utilizado em misturas betuminosas para pavimentação.

Palavras-chave: Pavimentos Rodoviários, Misturas Betuminosas Temperadas, Resíduos de Construção e Demolição, Agregado Reciclado, Betão Britado, Ensaio de Desempenho.

Abstract

The purpose of this thesis is to study the performance of paving bituminous mixtures with incorporation of recycled crushed concrete from construction and demolition waste for asphalt base layers. In particular, we intend to study the phenomenon of interaction paving bitumen with recycled aggregates from crushed concrete. For that, bituminous mixtures were formulated with recycled crushed concrete as aggregate, in replacement of the natural origin aggregate in the amount of 60%, intended asphalt base layers (AC 20 base) and with a 35/50 warm bitumen.

The experimental work began by the geometrical and physical characterization of the aggregates in order to complete the mechanical and chemical characterization previously available.

In the formulation of the bituminous mixtures it was followed an empirical method widely used in Portugal designated by Marshall method.

In order to analyze the feasibility of the incorporation of the recycled aggregated, there were performed experimental tests that revealed details about the performance of the bituminous mixtures and its in-service behavior, as the determination of the water sensitivity, the resistance to permanent deformation, the stiffness modulus and the resistance to fatigue. Throughout this thesis, they are described in detail the experimental procedures used.

The results obtained from the experimental tests were discussed and compared to previously activities performed so that they can be drawn to conclusions that respond to the initial goal suggested.

It is concluded that the recycled concrete does not meet all the specifications of the aggregates for use in base course layers paving. However, this type of recycled aggregate revealed a similar performance when compared to the natural aggregate in some tests. The recycled crushed concrete was determined as a material with potential for future use in bituminous mixtures.

Keywords: Pavements, Warm Mix Asphalt, Construction and Demolition Waste, Recycled Aggregates, Crushed Concrete, Performance Testing.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Quadros	xiii
Lista de Acrónimos e Siglas	xv
Lista de Símbolos	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objetivos e metodologia.....	3
1.3. Estrutura	4
2. Misturas betuminosas com agregados reciclados	5
2.1. Enquadramento	5
2.2. Misturas betuminosas	6
2.2.1. Ligantes betuminosos.....	12
2.2.2. Agregados	14
2.3. Formulação Marshall.....	19
2.4. Trabalhos no âmbito da temática da dissertação.....	20
3. Estudo experimental	25
3.1. Considerações iniciais.....	25
3.2. Composição das misturas betuminosas estudadas	26
3.2.1. Considerações iniciais	26
3.2.2. Caracterização dos agregados.....	26
3.2.3. Análise granulométrica dos agregados	27
3.3. Afinidade ligante-agregado	29
3.4. Fabrico de misturas e moldagem de provetes cilíndricos	32
3.4.1. Fabrico da mistura betuminosa em laboratório	32
3.4.2. Moldagem de provetes cilíndricos	33
3.5. Baridades	34

3.6.	Características volumétricas	37
3.7.	Ensaio Marshall	37
3.8.	Moldagem de lajes	39
3.9.	Sensibilidade à água	40
3.10.	Resistência à deformação permanente.....	43
3.11.	Módulo de rigidez	45
3.12.	Resistência à fadiga	48
4.	Resultados e discussão	51
4.1.	Considerações iniciais.....	51
4.2.	Afinidade ligante-agregado	51
4.3.	Estudo Marshall.....	52
4.3.1.	Características volumétricas	52
4.3.2.	Resistência e deformação	54
4.3.3.	Percentagem ótima de betume	56
4.4.	Ensaio de desempenho.....	56
4.4.1.	Sensibilidade à água	56
4.4.2.	Deformação permanente.....	59
4.4.3.	Módulo de rigidez	62
4.4.4.	Resistência à fadiga	63
5.	Conclusões	65
5.1.	Síntese do trabalho	65
5.2.	Principais conclusões.....	65
5.3.	Desenvolvimentos futuros	68
	Referências bibliográficas.....	69
	Referências normativas	73
	Anexos	75
	Anexo A – Fichas técnicas dos betumes	77
	A.1 – Betume Temperado 35/50	77
	A.2 – Betume 35/50.....	79
	Anexo B – Ensaio de afinidade	81
	Anexo C – Dados do ensaio Marshall	97

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Produção mundial de misturas betuminosas, dados de 2007 (NAPA & EAPA, 2011).....	2
Figura 2.1 - Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (InIR, s.d.)	5
Figura 2.2 – Composição volumétrica das misturas betuminosas (Silva, 2005)	6
Figura 2.3 - Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Capitão, 1996, citado em Silva, 2005)	7
Figura 2.4 - Misturas betuminosas de acordo com a temperatura de fabrico (CEPSA, 2016a)	8
Figura 2.5 - Agregado calcário proveniente da Serra da Arrábida	17
Figura 3.1 - Peneiração dos agregados	28
Figura 3.2 - Agregados naturais (calcários).....	28
Figura 3.3 - Agregados de RCD (betão britado reciclado)	28
Figura 3.4 - Curvas granulométricas dos agregados naturais de calcário	28
Figura 3.5 - Curva granulométrica do RCD	29
Figura 3.6 - Curva granulométrica da MBT	29
Figura 3.7 - Agregado calcário após a mistura.....	30
Figura 3.8 - Agregado reciclado após a mistura.....	30
Figura 3.9 - Máquina de rotação para ensaio de afinidade ligante-agregado	31
Figura 3.10 - Referência para a estimativa do grau de cobertura betume sobre o agregado (CEN, 2012b)	31
Figura 3.11 – Agregados de RCD divididos por granulometria, para um provete cilíndrico	32
Figura 3.12 - Fabrico da mistura betuminosa	32
Figura 3.13 - Compactador de impacto com bigorna de aço e pedestal de madeira	33
Figura 3.14 - Provetes de MBT desmoldados	34
Figura 3.15 - Medição da altura dos provetes	34
Figura 3.16 - Resultado da calibração do picnómetro	35
Figura 3.17 - Aplicação de vácuo ao picnómetro no ensaio da baridade máxima teórica (método volumétrico).....	36
Figura 3.18 - Representação da estabilidade, S, da deformação, F, e da deformação tangencial, F_t (CEN, 2012f)	38
Figura 3.19 - Proвете na prensa para ensaio Marshall.....	39
Figura 3.20 - Compactador de lajes	40
Figura 3.21 - Laje após compactação	40
Figura 3.22 - Ensaio da resistência à tração indireta	42

Figura 3.23 - Tipos de rotura dos provetes no ensaio de resistência à tração indireta .	42
Figura 3.24 - Ensaio de deformação permanente, <i>Wheel Tracking</i>	44
Figura 3.25 - Ensaio de flexão em quatro pontos (CEN, 2012d).....	45
Figura 3.26 - Desfasamento entre a tensão e a extensão (Quintero, 2011 citado em Martinho, 2014)	46
Figura 4.1 - Resultados do ensaio de afinidade ligante-agregado	52
Figura 4.2 – Resultados da baridade.....	53
Figura 4.3 - Baridades máximas teóricas da MBT.....	53
Figura 4.4 - Resultados da porosidade, V_m , da MBT.....	53
Figura 4.5 - Resultados do VMA da MBT	54
Figura 4.6 - Estabilidade Marshall, S.....	54
Figura 4.7 - Deformação Marshall, F	55
Figura 4.8 - Quociente Marshall, S/F.....	55
Figura 4.9 - Provete na prensa após ensaio de tração indireta.....	58
Figura 4.10 - Provete após ensaio de tração indireta.....	58
Figura 4.11 - Provete aberto após ensaio de tração indireta.....	58
Figura 4.12 - Laje 1 (esquerda) e laje 2 (direita) após o ensaio <i>wheel tracking</i>	60
Figura 4.13 – Valores de RD_{AIR} do ensaio de deformação permanente da MBT realizado a 60 °C.....	60
Figura 4.14 - Comparação dos valores de RD_{AIR} (à esquerda), PRD_{AIR} (ao centro) e WTS_{AIR} (à direita) obtidos nos ensaios de deformação permanente	61
Figura 4.15 - Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos: Módulo de rigidez (ensaio realizado a 20 °C e com uma extensão de 50 $\mu\text{m/m}$)	62
Figura 4.16 - Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos: Ângulo de fase (ensaio realizado a 20 °C e com uma extensão de 50 $\mu\text{m/m}$)	62
Figura 4.17 – Resultados dos ensaios de resistência à fadiga (ensaio realizado a 20 °C e com uma frequência de 10 Hz).....	63
Figura B.1 - Agregado calcário e betume temperado: garrafa 1.....	81
Figura B.2 - Agregado calcário e betume temperado: garrafa 2	82
Figura B.3 - Agregado calcário e betume temperado: garrafa 3	83
Figura B.4 - Agregado calcário e betume aditivado com Sasobit: garrafa 1	84
Figura B.5 - Agregado calcário e betume aditivado com Sasobit: garrafa 2	85
Figura B.6 - Agregado calcário e betume aditivado com Sasobit: garrafa 3	86
Figura B.7 - Agregado reciclado e betume aditivado com Sasobit: garrafa 1	87
Figura B.8 - Agregado reciclado e betume aditivado com Sasobit: garrafa 2	88
Figura B.9 - Agregado reciclado e betume aditivado com Sasobit: garrafa 3	89
Figura B.10 - Agregado calcário e betume aditivado com Rediset: garrafa 1	90
Figura B.11 - Agregado calcário e betume aditivado com Rediset: garrafa 2	91
Figura B.12 - Agregado calcário e betume aditivado com Rediset: garrafa 3	92
Figura B.13 - Agregado reciclado e betume aditivado com Rediset: garrafa 1	93

Figura B.14 - Agregado reciclado e betume aditivado com Rediset: garrafa 2	94
Figura B. 15 - Agregado reciclado e betume aditivado com Rediset: garrafa 3	95
Figura C.1 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 1 (3,5% de betume)	97
Figura C.2 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 2 (3,5% de betume)	97
Figura C.3 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 3 (4,0% de betume)	98
Figura C.4 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 4 (4,0% de betume)	98
Figura C.5 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 5 (4,5% de betume)	99
Figura C.6 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 6 (4,5% de betume)	99
Figura C.7 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 7 (5,0% de betume)	100
Figura C.8 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 8 (5,0% de betume)	100
Figura C.9 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 9 (5,5% de betume)	101
Figura C.10 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 10 (5,5% de betume) ..	101

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Designação das misturas betuminosas para camadas de base (Estradas de Portugal, 2014a).....	10
Quadro 2.2 - Requisitos/propriedades - Camadas de misturas betuminosas a quente: Camadas de base (Estradas de Portugal, 2014a)	11
Quadro 2.3 - Requisitos/propriedades dos betumes de pavimentação (Estradas de Portugal, 2014a)	13
Quadro 2.4 - Requisitos do fuso granulométrico - Camadas de MBQ: Camadas de base (Estradas de Portugal, 2014a)	15
Quadro 2.5 - Requisitos/propriedades dos agregados (Estradas de Portugal, 2014a).....	16
Quadro 2.6 – Valores limites de lixiviação dos resíduos passíveis de serem reutilizados (Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de Agosto do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2009)	18
Quadro 3.1 - Organização do estudo experimental.....	25
Quadro 3.2 - Características das MBT formuladas	26
Quadro 3.3 - Características dos agregados utilizados nas misturas betuminosas (Martinho, 2014)	26
Quadro 3.4 - Composição do RCD utilizado nas misturas betuminosas (Martinho, 2014)	26
Quadro 3.5 - Análise do eluato e do resíduo, após ensaio de lixiviação, dos agregados utilizados (Martinho, 2014).....	27
Quadro 3.6 - Tempo de carregamento e velocidade média da circulação na corrente de tráfego em função da frequência de aplicação da carga	47
Quadro 4.1 - Identificação das MBT M08, M09, M23 e M25 (Martinho, 2014).....	51
Quadro 4.2 - Avaliação da percentagem ótima de betume	56
Quadro 4.3 - Características dos provetes de MBT para o ensaio de sensibilidade à água....	57
Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios de sensibilidade à água das MBT	57
Quadro 4.5 - Sensibilidade à água das MBT de referência (Martinho, 2014)	58
Quadro 4.6 - Características dos provetes de MBQ para o ensaio de sensibilidade à água ...	59
Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de sensibilidade à água das MBQ	59
Quadro 4.8 - Características das lajes ensaiadas no WTT	60
Quadro 4.9 - Resultados dos ensaios de deformação permanente realizados a 60 °C para a MBT	60
Quadro 4.10 - Ensaio de deformação permanente a 60 °C das MBT de referência (Martinho, 2014)	61
Quadro 4.11 - Resultados dos ensaios de resistência à fadiga (ensaio a 20 °C e a 10 Hz)....	63

Lista de Acrónimos e Siglas

ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Européen de Normalisation
CETO	Caderno de Encargos Tipo Obra
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EN	European Standard
EP	Estradas de Portugal
InIR	Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ITS	Resistência à tração indireta
ITS_d	Resistência à tração indireta média do subconjunto molhado
ITS_w	Resistência à tração indireta média do subconjunto seco
ITSR	Razão da resistência à tração indireta
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MBT	Mistura Betuminosa Temperada
MBQ	Mistura Betuminosa fabricadas a Quente
NP	Norma Portuguesa
NAPA	National Asphalt Pavement Association
PRD_{AIR}	Percentagem da profundidade da rodeira em N ciclos
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RD_{AIR}	Profundidade da rodeira ao fim de N ciclos
SSD	Saturated Surface Dry
VMA	Volume de Vazios na Mistura de Agregados
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WTS_{AIR}	Taxa de deformação média no ar da amostra
WTT	Wheel Tracking Test
4PB	Four Point Bending

Lista de Símbolos

c	Fator de correção no ensaio Marshall
B	Porcentagem de betume do provete (%)
d₅₀₀₀	Profundidade de rodeira ao fim de 5000 ciclos
d₁₀₀₀₀	Profundidade de rodeira ao fim de 10000 ciclos
d_p	Diâmetro do provete (mm)
D	Diâmetro do rolo na compactação das lajes (mm)
e	Espessura final da laje (mm)
F	Deformação Marshall (mm)
F_r	Carga aplicada sobre o rolo na compactação das lajes (kN)
F_t	Deformação tangencial Marshall (mm)
h	Altura do provete (mm)
h₁	Altura do provete, primeira medição (mm)
h₂	Altura do provete, segunda medição (mm)
h₃	Altura do provete, terceira medição (mm)
h₄	Altura do provete, quarta medição (mm)
h_{média}	Altura média das quatro medições de cada provete (mm)
l	Largura interior do molde para a compactação das lajes (mm)
L	Comprimento interior do molde para a compactação das lajes (mm)
L_r	Carga aplicada na roda no ensaio de deformação permanente (kN)
m_{imerso}	Massa do provete imerso na água (g)
m_{p+t}	Massa do picnómetro juntamente com a tampa (g)
m_{p+t+a}	Massa do picnómetro juntamente com a tampa e a amostra (g)
m_{seco}	Massa do provete seco (g)
m_{ssd}	Massa do provete saturado com superfície seca (g)
m_{total}	Massa do picnómetro juntamente com a tampa, a amostra e a água (g)
M	Massa da laje (kg)
N	Número de ciclos no ensaio de deformação permanente
P	Carga máxima no ensaio de sensibilidade à água (kN)
P_i	Carga de pico aplicada na rotura, no ensaio de tração indireta (kN)
S	Estabilidade Marshall (kN)
S/F	Quociente Marshall (kN/mm)
T	Temperatura (°C)
v	Porosidade da laje (%)
V_m	Porosidade da mistura betuminosa (%)
V_p	Volume do picnómetro, com água até à marca de referência (m ³)
w	Largura do pneu do ensaio de deformação permanente (mm)
ρ_B	Densidade do betume (kg/m ³)

ρ_{bssd}	Baridade do provete, no método SSD (kg/m^3)
ρ_{mv}	Baridade máxima teórica determinada pelo método volumétrico (kg/m^3)
ρ_w	Massa volúmica da água (kg/m^3)

1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

Em Portugal, como em outros países, a rede rodoviária é essencial ao desenvolvimento sócio económico do país, uma vez que representa a principal infraestrutura de transporte de pessoas e mercadorias (Branco et al., 2006).

Segundo a Infraestruturas de Portugal (2016), desde meados dos anos 80, altura da segunda publicação do Plano Nacional Rodoviário, verificou-se um importante aumento da rede rodoviária principal, que veio dar resposta à grande expansão e desenvolvimento tecnológico do automóvel e às novas metodologias de desenvolvimento verificadas nessa altura. De acordo com a mesma fonte, a rede rodoviária nacional compreende 17 874 km de extensão (dados de Junho de 2016). Mais de 90% destas estradas possuem pavimento do tipo flexível, que é um tipo de pavimento que tem na sua constituição camadas de misturas betuminosas (Batista, 2004).

Associada à evolução da estrutura da rede rodoviária, foram ocorrendo alterações nas características exigidas aos diferentes tipos de vias. Daqui resultou um acréscimo da importância das várias componentes da obra rodoviária, como as terraplenagens, drenagem, pavimentação, sinalização e segurança, passando a ser objeto de especificações mais exigentes. A pavimentação tem sido alvo de uma atenção especial, por ser uma componente com grande peso no custo da construção rodoviária, pelo facto de a qualidade da superfície de rolamento ser em grande parte associada à comodidade e segurança da circulação (Branco et al., 2006).

Nas últimas décadas, surgiu, assim, uma profunda evolução na conceção dos pavimentos, nos materiais utilizados, nos métodos de dimensionamento e nas práticas construtivas (Branco et al., 2006).

A Europa e América do Norte possuem a mais extensa rede rodoviária mundial. Na Europa, estima-se que mais de 90% dos 5,2 milhões de quilómetros da rede rodoviária, e nos Estados Unidos da América mais de 92% dos 4 milhões de quilómetros, possuam pavimentos que têm misturas betuminosas aplicadas (NAPA & EAPA, 2011).

Segundo a NAPA e EAPA (2011), em 2007, último ano do qual existem dados estatísticos, foram produzidas cerca de 1,6 mil milhões de toneladas de misturas betuminosas em todo o mundo, dados que se podem verificar na Figura 1.1.

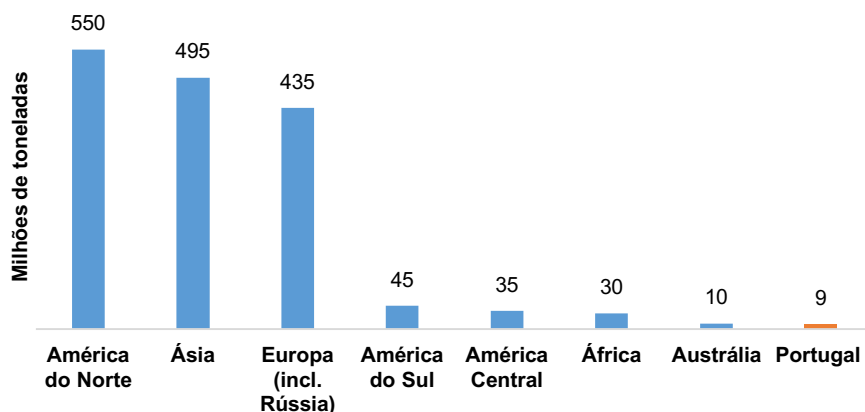


Figura 1.1 - Produção mundial de misturas betuminosas, dados de 2007 (NAPA & EAPA, 2011)

Associada à produção das misturas betuminosas está o consumo de energia e a consequente libertação de gases de efeitos de estufa, com origem na secagem e aquecimento dos agregados e betumes. De modo a promover um desenvolvimento sustentável e a redução do consumo energético começaram a ser desenvolvidas técnicas para a redução das temperaturas de fabrico e de aplicação das misturas betuminosas, implicando algumas delas a modificação das propriedades do betume utilizado (Martinho, 2014). Torna-se assim interessante o estudo destas misturas, de modo a aumentar o conhecimento relacionado com misturas betuminosas mais sustentáveis, uma vez que a mitigação das questões ambientais é, nos dias de hoje, muito importante.

Cerca de 1 300 milhões de toneladas de resíduos são gerados na Europa a cada ano, dos quais 40%, ou 510 milhões de toneladas, são provenientes das atividades de construção e demolição (WBCSD, 2009).

Em Portugal, a indústria da construção lida anualmente com milhares de toneladas de materiais. Parte dessas enormes quantidades de material acabam por ser classificados como Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Segundo os últimos dados estatísticos, publicados em 2014, o setor da Construção nacional, entre 2010 e 2014, gerou anualmente cerca de 20% do total dos resíduos gerados por todas as atividades económicas. Durante esse período, de todos esses resíduos, este setor contribuiu com cerca de 7,7 milhões de toneladas de resíduos não perigosos (Instituto Nacional de Estatística, 2016).

São enormes quantidades de resíduos, que quer inutilizados no decorrer de novas construções, quer resultantes de restaurações ou demolições de construções existentes, constituem um problema que necessita de uma solução de modo a que a indústria da construção em Portugal seja sustentável (Pereira et al., 2004).

Na atualidade, as administrações rodoviárias deparam-se com o objetivo de conservar e reabilitar o património construído, cingindo-se aos orçamentos disponíveis, bem como com a modernização da rede, tendo em conta os novos níveis de tráfego e as crescentes exigências de qualidade. Por outro lado, torna-se fundamental que a conservação e reabilitação de pavimentos tenha em conta as questões ambientais, a fim de favorecer a economia de matérias primas a utilizar na construção rodoviária e o aproveitamento de materiais alternativos (Batista, 2004).

Com vista à concretização destes objetivos, têm vindo a ser feitos estudos para a incorporação de novos materiais na produção de misturas betuminosas. Os materiais reciclados, para além de reduzir custos, revelam-se também como uma forma de promover a reutilização e escoamento dos resíduos de várias indústrias (Martinho, 2014).

Em 2006, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) publicou algumas especificações técnicas, relacionadas com resíduos e materiais reciclados, de entre as quais o “Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos” (E 473–2006) que foi atualizada em 2009 para a E 473–2009 (LNEC, 2009a) e o “Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de RCD em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte” (E 474–2006 atualizada para E 474-2009 (LNEC, 2009a)). A partir de 2007 começou a surgir legislação¹ que faz referência, em alguns dos seus artigos, à gestão dos RCD.

Os RCD surgem, assim, como possíveis materiais a incorporar nas misturas. Um destes materiais é o betão britado reciclado, alvo de estudo nesta dissertação.

Os resíduos de betão são os principais constituintes dos RCD e normalmente são reciclados, por britagem e peneiração, para posterior reutilização como agregado (Wong et al., 2007).

Este tema mostra-se interessante dada a inexistência de especificações para a incorporação deste tipo de material em camadas ligadas de pavimentos rodoviários, contribuindo assim para o aumento do conhecimento sobre este tema.

Em Portugal existem alguns estudos académicos neste âmbito, dos quais são exemplos o estudo “Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e validação Tecnológica” (Martinho, 2014) e o estudo “Aplicação de betão britado reciclado em misturas betuminosas para camadas de base” (Vargas, 2013). No entanto, é sempre importante continuar a investigação, privilegiando dois aspetos cujo melhor conhecimento seria importante: o uso de betumes previamente aditivados em fábrica que permitem maior facilidade no processo de fabrico; o maior aumento possível das taxas de incorporação de RCD como agregado. Ambos os aspetos foram considerados nesta dissertação, fazendo o estudo de misturas betuminosas fabricadas com este tipo de betume e incorporando 60% da massa total do agregado.

1.2. Objetivos e metodologia

O objetivo principal desta dissertação é o estudo do desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) para pavimentação com altas taxas de incorporação de RCD. Em particular, pretende-se estudar o fenómeno de interação do betume de pavimentação com agregados reciclados de betão britado.

No âmbito do referido estudo, efetuar-se-ão comparações dos resultados dos ensaios experimentais obtidos com os valores de trabalhos já efetuados por outros autores.

De modo a concretizar o objetivo da dissertação, desenvolveram-se ensaios experimentais de caracterização e avaliação da viabilidade de aplicação do betão britado reciclado como agregado

¹ Para uma literatura complementar, consultar: Lei n.º 60/2007, de 4 de Setembro, Decreto-Lei n.º 18/2008, de 18 de Janeiro, Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março, Artigo 20º do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro e Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho.

para misturas betuminosas temperadas, que ajudam a perceber aspetos como a interação dos agregados reciclados com o ligante e o comportamento sob condições de carregamento dinâmico.

Para a elaboração de toda a dissertação foram desenvolvidas as seguintes tarefas:

Tarefa 1: Revisão bibliográfica – Realizou-se uma pesquisa e recolha bibliográfica relativa ao tema apresentado de modo a perceber todos os aspetos e conceitos essenciais à execução do trabalho.

Tarefa 2: Seleção de materiais – Selecionou-se quais os materiais a usar no estudo laboratorial, nomeadamente, o agregado natural, o agregado reciclado e o betume.

Tarefa 3: Estudo experimental – Definiu-se o estudo experimental, com a seleção dos procedimentos laboratoriais a desenvolver. Para o efeito, realizou-se um estudo experimental em laboratório, onde se ensaiaram misturas betuminosas temperadas do tipo AC 20 base 35/50. Após a caracterização geométrica e física do agregado natural e reciclado a utilizar, passou-se à formulação da mistura betuminosa através da metodologia Marshall. De modo a verificar a viabilidade da mistura estudada, desenvolveram-se ensaios de desempenho tais como o ensaio de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, obtenção do módulo de rigidez e ensaio de resistência à fadiga.

Tarefa 4: Análise e discussão dos resultados – Após o término do trabalho experimental, tratou-se a informação e resultados obtidos de modo a proceder à análise e discussão dos resultados.

1.3. Estrutura

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Introdução – Descreve o enquadramento e motivação do tema desenvolvido neste trabalho. São igualmente apresentados os objetivos do trabalho, metodologia e a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Misturas betuminosas com agregados reciclados – Apresenta-se uma síntese bibliográfica de elementos necessários à compreensão do tema da dissertação, abordando aspetos dos pavimentos, das misturas betuminosas, dos ligantes, dos agregados e dos métodos de formulação das misturas. É também realizada uma síntese de trabalhos publicados que abordam aspetos idênticos a esta dissertação.

Capítulo 3 – Estudo experimental – É efetuada a descrição da metodologia usada na realização dos diversos ensaios realizados.

Capítulo 4 – Resultados e discussão – São apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios experimentais.

Capítulo 5 – Conclusões – Apresentam-se uma síntese do trabalho realizado, retiram-se as conclusões e propõem-se possíveis desenvolvimentos futuros neste tema.

Para além destes capítulos, são apresentados os anexos que contêm dados resultantes dos ensaios laboratoriais e que são importantes para a compreensão do trabalho desenvolvido.

2. Misturas betuminosas com agregados reciclados

2.1. Enquadramento

Um pavimento rodoviário tem como função assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período, sob as ações do tráfego e nas condições climáticas que ocorram (Branco et al., 2006).

Segundo o LNEC (1962), na especificação E1 ainda em vigor, um pavimento define-se como “a parte da estrada, rua, ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respectivas solicitações à infraestrutura: terreno, obras de arte, etc. Pode ser constituído por uma ou mais camadas tendo, no caso geral, uma camada de desgaste e camadas de fundação. Cada uma destas camadas pode ser composta e constituída por camadas elementares”. Constitui-se assim por uma estrutura multicamadas, colocadas sobre uma plataforma de suporte, como representado na Figura 2.1.

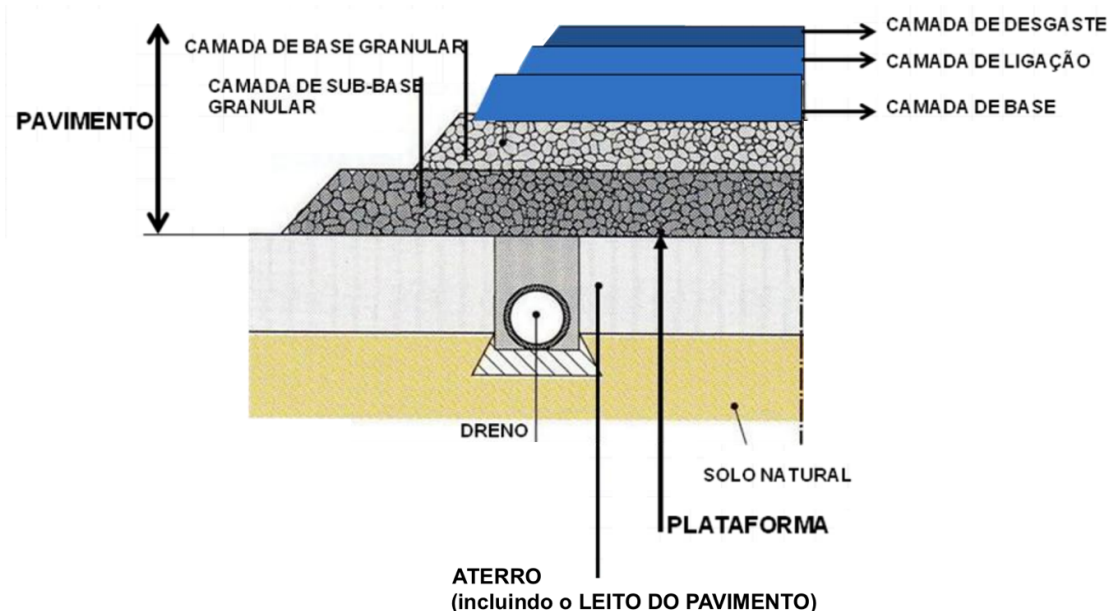


Figura 2.1 - Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (InIR, s.d.)

Como constituinte, as misturas betuminosas podem ser um elemento da camada de desgaste, camada de ligação/regularização e da camada de base.

Ao pavimento deve exigir-se a qualidade funcional, relacionada com a exigência dos utentes (conforto e segurança de circulação), e a qualidade estrutural, relacionada com a capacidade do pavimento para suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações para além de determinados valores limites, as quais colocariam em causa a garantia da qualidade funcional (Branco et al., 2006). Para que isso aconteça, tem de haver degradação das cargas concentradas provenientes das rodas, através da estrutura do pavimento, para a fundação, de tal forma que os materiais não deformem excessivamente nem haja excesso de fendilhamento (Sharp, 2009).

Ao longo do seu período de vida, os pavimentos estão sujeitos a solicitações que originam progressivamente degradação, a qual contribui para a contínua redução da qualidade sua qualidade. Estas solicitações são essencialmente de dois tipos (Silva, 2005):

- A solicitação do tráfego, que consiste numa ação vertical repetida e numa ação tangencial entre o pneu e o pavimento.
- A ação dos agentes climatéricos, através da ação da água, que diminui a capacidade de carga das camadas granulares e do solo de fundação, e pela ação da temperatura, que envelhece o betume (fenómeno explicado no subcapítulo 2.2.1 Ligantes) e provoca deformações permanentes e fendilhamento térmico.

Estes dois tipos de solicitações, diretamente responsáveis pela degradação do pavimento, constituem os fatores ativos que influenciam o comportamento do pavimento. Para além destes, o comportamento é ainda influenciado por fatores passivos, dependentes das propriedades do pavimento, que retardam de um modo mais ou menos eficiente a sua degradação. Estes últimos são constituídos pela estrutura do pavimento, as propriedades de comportamento físico e mecânico dos seus constituintes e a qualidade de produção das misturas e de construção do pavimento (Branco et al., 2006).

2.2. Misturas betuminosas

Nas camadas superiores dos pavimentos flexíveis são aplicadas misturas betuminosas. São misturas constituídas por um conjunto de materiais granulares doseados de uma forma ponderal ou volumétrica que são misturados com uma certa quantidade de ligante que funciona como uma cola que liga os agregados de forma coesa (NAPA & EAPA, 2011). A mistura betuminosa dá lugar a uma camada de pavimento, após ser transportada, espalhada e compactada (Branco et al., 2006).

De modo a que tenham um desempenho adequado em serviço, é fundamental o estudo da composição das misturas betuminosas. Para além das características dos seus componentes, o comportamento das misturas betuminosas no pavimento depende da sua composição volumétrica, que é constituída por três componentes: agregado, ligante e ar, como esquematizado na Figura 2.2.

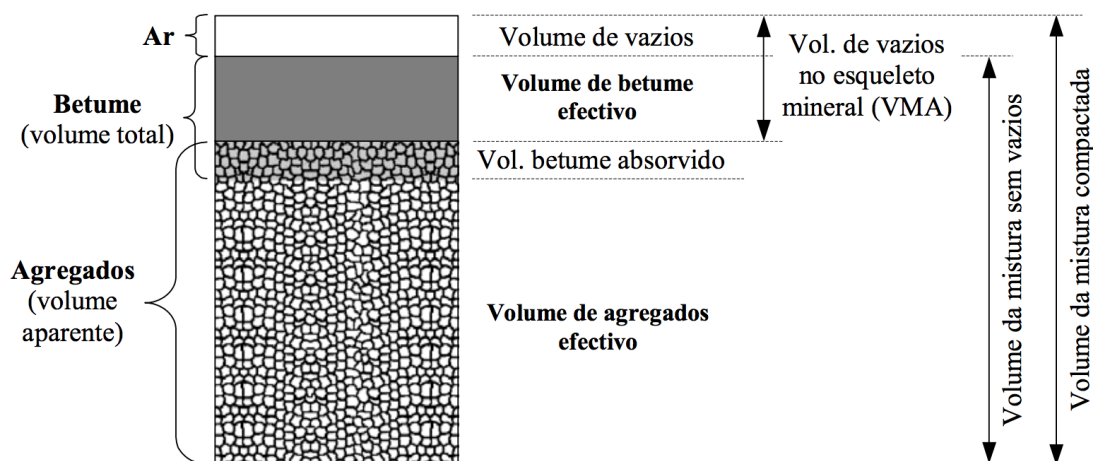


Figura 2.2 – Composição volumétrica das misturas betuminosas (Silva, 2005)

Os vários parâmetros volumétricos podem ser melhor compreendidos na representação esquemática da Figura 2.3.

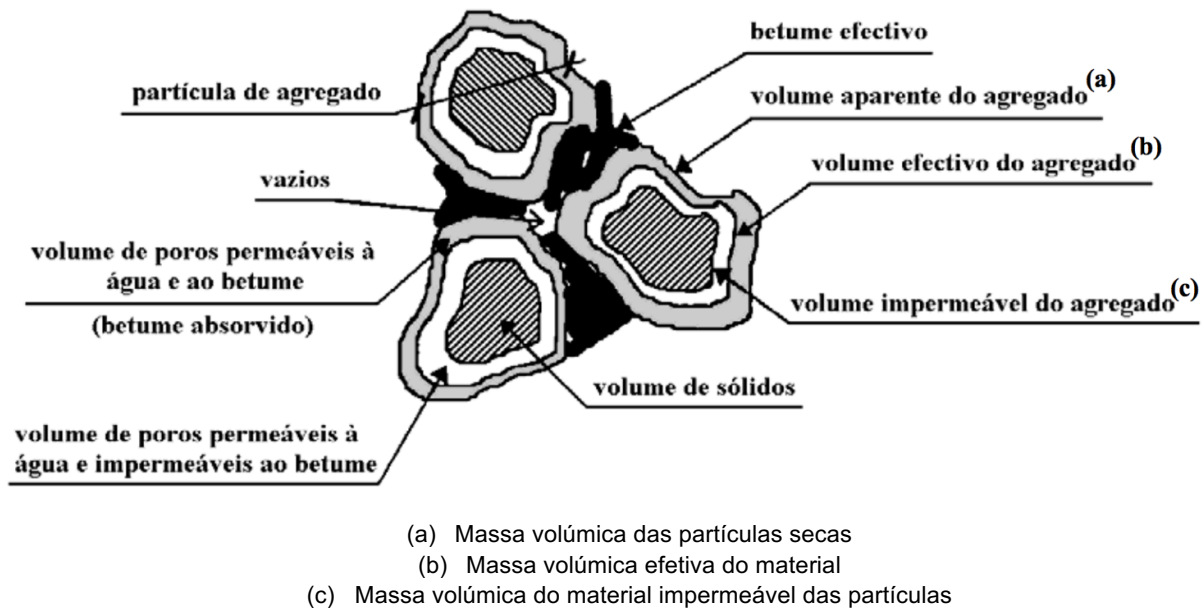


Figura 2.3 - Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Capitão, 1996, citado em Silva, 2005)

Para além dos constituintes representados na Figura 2.3, podem ser acrescentados aditivos por forma a alterar as propriedades da mistura betuminosa, dos quais se fala mais à frente.

Cada um dos constituintes das misturas betuminosas desempenha várias funções, que irão ser enunciadas, nesta dissertação, nos subcapítulos respetivos.

Em relação à temperatura de execução, desde meados dos anos 90, começaram a ser estudadas e desenvolvidas um conjunto de técnicas para reduzir a energia e temperatura de fabrico e compactação das misturas betuminosas fabricadas a quente (MBQ), surgindo assim as MBT (EAPA, 2014).

De acordo com as temperaturas de fabrico podemos classificar as misturas betuminosas como misturas a fabricadas a frio, semi-quentes, temperadas e fabricadas a quente, acordo com a Figura 2.4 (CEPSA, 2016a).

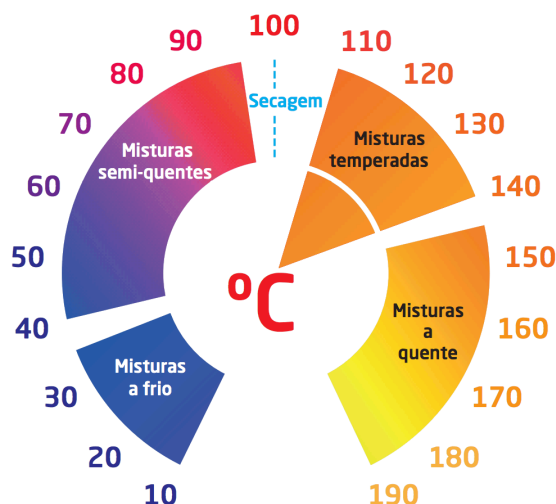


Figura 2.4 - Misturas betuminosas de acordo com a temperatura de fabrico (CEPSA, 2016a)

Segundo Ferreira et al. (2009) e CEPSA (2016a) estas misturas têm como principais benefícios:

- A diminuição de 25% a 35% do consumo de combustível, que se traduz numa poupança a nível económico.
- A redução das emissões no fabrico, com conseqüente diminuição da emissão de gases poluentes. As emissões de CO₂ são reduzidas entre 20 a 30%, contribuindo para a redução dos gases de efeito de estufa, ocorrendo o mesmo para as emissões de CO e NO_x.
- Na colocação em obra, garantem uma melhor trabalhabilidade e compactação a menores temperaturas, com redução da produção de fumos, possibilitando o transporte a maiores distâncias, alargando a época de pavimentação, e permitindo a sua aplicação com temperaturas atmosféricas mais baixas.
- No fabrico e aplicações convencionais, pelo facto de não haver necessidade de adaptar a central, já que o fabrico, aplicação e compactação da mistura betuminosa se realiza de forma similar à de uma MBQ, com a única diferença de os agregados serem aquecidos a temperaturas inferiores.
- Qualidade igual à das MBQ, uma vez que as propriedades obtidas nos pavimentos são equivalentes às de uma MBQ.

Segundo (Capitão et al., 2012) as tecnologias existentes para a produção de MBT podem ser classificadas em três grupos: através de aditivos orgânicos, através de aditivos químicos e através do uso de tecnologias de formação de espuma.

Os aditivos orgânicos reduzem a viscosidade da mistura betuminosa (EAPA, 2014) permitindo uma redução de cerca de 20 a 30 °C na temperatura da mistura, em relação às MBQ (Martinho, 2014).

Este tipo de aditivos adiciona ceras à mistura. Quando a temperatura ultrapassa o ponto de fusão destas ceras, dá-se a redução da viscosidade da mistura betuminosa (Rubio et al., 2012).

Os aditivos químicos atuam na interface microscópica dos agregados e do betume, de modo a regular e reduzir as forças de atrito entre estes (EAPA, 2014), podendo reduzir as temperaturas de mistura e compactação em cerca de 30 °C (Martinho, 2014).

Em relação às espumas, estas são geralmente obtidas pela adição a frio de uma pequena quantidade de água pulverizada no betume pré-aquecido. Esta água ao vaporizar-se, o vapor retido no seio do betume provoca uma expansão temporária do seu volume, com uma conseqüente diminuição da viscosidade. Dependendo do processo de formação da espuma utilizado, em geral, esta técnica pode reduzir entre 20 °C a 30 °C. Alguns fabricantes apresentam valores bastantes mais baixos, com técnicas que envolvem temperaturas de fabrico e compactação a rondar os 100 °C (Martinho, 2014).

Em geral, os aditivos são pré-misturados com o betume aquecido, no entanto podem também ser adicionados à mistura no recipiente de mistura, logo após adição de betume. A mistura pode ser feita em laboratório ou na central de produção de misturas betuminosas, ou pode ser fornecida uma pré-mistura de betume aditivado (Martinho, 2014). O estudo da presente dissertação vem tentar superar esta fase adicional de adicionar os aditivos manualmente. Foram produzidas MBT, a partir de betume já aditivado em fábrica, próprio para a produção deste tipo de misturas.

As características principais das misturas dependem diretamente das proporções dos componentes misturados e das suas propriedades. Torna-se, assim, importante o conhecimento prévio do tipo de misturas que se pretende aplicar, de modo a procurar as características mais convenientes para as mesmas (Branco et al., 2006).

Dependendo do tipo de camada a construir, pode pretender-se o uso de misturas em que a principal exigência sejam as boas características mecânicas ou, por outro lado, o uso de misturas que apresentem aptidão para o desempenho de funções relacionadas com a segurança e o conforto dos utilizadores. Em geral, são exigidas as seguintes características às misturas betuminosas (Branco et al., 2006):

- a) Estabilidade: obtenção de uma mistura capaz de resistir, com pequena deformação, às cargas de serviço. Resulta da combinação do atrito e do imbricamento entre os grãos de agregado constituintes da mistura. Independentemente do agregado usado, a estabilidade aumenta com a compacidade do material, implicando o uso de granulometrias que permitam obter materiais de densidade adequada e proceder a uma correta compactação da mistura. A utilização excessiva de ligante reduz o atrito interno entre as partículas, reduzindo assim a estabilidade.
- b) Durabilidade: caracteriza a resistência da mistura betuminosa à desintegração causada pelo tráfego e por fatores climáticos. Em geral, a durabilidade da mistura aumenta com o aumento da quantidade de betume utilizado. Deve-se, então, encontrar uma quantidade de betume tão alta quanto possível, mas sem prejudicar a estabilidade.
- c) Flexibilidade: capacidade da mistura betuminosa se adaptar gradualmente aos movimentos do seu suporte, de modo a evitar fenómenos de fendilhamento. Em geral, a flexibilidade aumenta com o aumento da percentagem de betume e com a utilização de agregados de granulometria relativamente aberta.

- d) Resistência à fadiga: capacidade de resistir à passagem repetida de veículos que induz nos materiais ligados extensões de tração, com abertura de fendas a longo prazo. Quanto maior a durabilidade de uma mistura betuminosa, maior a sua resistência à fadiga.
- e) Aderência: capacidade do pavimento apresentar boas características de aderência aos pneus do veículo. O excesso de betume provoca exsudação e conseqüente formação de uma superfície demasiadamente lisa com deficiente capacidade aderente. A escolha de agregados com textura superficial rugosa e com boa resistência ao desgaste, de modo a manter essa rugosidade, aumenta a aderência.
- f) Impermeabilidade: capacidade de resistir à passagem da água e do ar através das várias camadas. A quantidade de vazios, a interligação destes e o seu contacto com a superfície do pavimento são os indicadores da impermeabilidade da mistura compactada.
- g) Trabalhabilidade: capacidade do material ser colocado e compactado com facilidade. Uma correta formulação, geralmente, permite uma boa trabalhabilidade. No entanto, por vezes, a utilização de certos agregados com o objetivo de melhorar a estabilidade dificulta a colocação das misturas.

Torna-se assim necessária uma correta formulação da mistura, de modo a obter um equilíbrio que permita à mistura apresentar as características exigidas.

Atualmente, existem um conjunto de normas europeias que definem requisitos para as MBQ, as EN 13108, cujas propriedades são caracterizadas pelos métodos de ensaio constantes das normas EN 12697. Serão estas as normas seguidas para a avaliação das MBT.

De acordo com estas normas, as misturas betuminosas assumem as várias designações constantes do Quadro 2.1, das quais importa referir as respetivas às camadas de base.

Quadro 2.1 - Designação das misturas betuminosas para camadas de base (Estradas de Portugal, 2014a)

Camada	Designação
Base	AC 32 base ligante (MB ^(a))
	AC 20 base ligante (MB)
	AC 20 base ligante (MBAM ^(b))
(a) MB – Macadame Betuminoso	
(b) MBAM – Macadame Betuminoso de Alto Módulo	

Nesta dissertação, o estudo foca-se em misturas para aplicação em camadas com características de base, mais especificamente as misturas AC 20 base ligante (MB).

Uma vez que atualmente não existem especificações no Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) (Estradas de Portugal, 2014a) relacionadas com as MBT, seguiu-se as especificações das MBQ, que quando aplicadas em camadas de base, devem apresentar certas propriedades e cumprir os requisitos constantes do Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Requisitos/propriedades - Camadas de misturas betuminosas a quente: Camadas de base (Estradas de Portugal, 2014a)

Requisitos / Propriedades		Referência normativa	Condições específicas de ensaio	Unid.	Tipo de mistura
					AC 20 base (MB)
Características Marshall	Estabilidade máx.	EN 12697-34	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	kN	Smax15 ^(a)
	Estabilidade mín.			kN	Smin7,5
	Deformação máx.			mm	F4
	Deformação mín.			mm	F2
	Quociente Marshall mín.			kN/mm	Qmin2
Vazios na mistura de agregados (VMA), mín.		EN 12697-8	EN 12697-8 - Calculada com base na baridade máxima teórica ^(b) - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(c) - determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	VMamin14
Porosidade, Vm		EN 12697-8	EN 12697-8 - Calculada com base na baridade máxima teórica ^(b) - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(c) - determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	Vmin3,0 – Vmax6
Relação ponderal de filer/ligante		-	Estudo de formulação (item 15.03.2)	%	Filer ^(d)
Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios de compressão Marshall, mín.		MIL-STD – 620A	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	%	80
Resistência à Deformação Permanente (“Wheel-tracking”)	Taxa de deformação WTSAIR	EN 12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, temperatura do ensaio 60°C	mm/10 ³ ciclos de carga	Categoria a declarar
	Profundidade de rodeira máxima, PRDAIR			%	
% de ligante, mín.		-	-	%	Bmin3,5 ^(e)
Sensibilidade à água, ITR		EN 12697-12	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas, temperatura do ensaio: 15°C	%	Categoria a declarar

(a) Para granitóides e agregados provenientes de rochas com predominância de sílica na sua composição a estabilidade máxima deverá ser 21 kN.

(b) Calculada para a percentagem ótima de ligante da mistura em estudo.

(c) Para a moldagem dos provetes é utilizado o compactador de impacto com 75 pancadas, de acordo com a norma EN 12697-30, à temperatura de compactação para a qual, a viscosidade do ligante a empregar na mistura, se situe entre 280±30 Cst.

(d) Item relativo ao filer, constante do CETO (Estradas de Portugal, 2014a).

(e) Este valor corresponde à menor percentagem de betume a utilizar no fabrico da mistura betuminosa - a considerar para ponto de partida do ensaio Marshall – a partir da qual serão fabricadas mais 4 misturas betuminosas, com cinco percentagens de betume.

No quadro acima descrito, em relação à sensibilidade à água, apesar de serem referidas 75 pancadas para a compactação dos provetes, seguiu-se o especificado na norma, que refere o valor de 50 pancadas.

As características de cada um dos elementos que constituem as misturas betuminosas afetam o comportamento das misturas betuminosas. Por isso torna-se fundamental uma correta caracterização dos agregados e do ligante betuminoso durante o estudo das misturas betuminosas, de modo a que o desempenho destas não seja comprometido pelo comportamento inadequado dos seus constituintes (Silva, 2005).

2.2.1. Ligantes betuminosos

Os ligantes betuminosos definem-se como um material adesivo contendo betume que pode estar sob a forma de não modificado, modificado ou emulsionado. São termoplásticos e apresentam viscosidade elevada à temperatura ambiente (Estradas de Portugal, S. A., 2014 e Branco et al., 2006).

Em geral, os ligantes betuminosos apresentam uma resistência à tração relativamente baixa, cerca de um quinto do cimento, mas apresentam cerca do dobro da capacidade de deformação comparativamente com o mesmo material (Sharp, 2009).

Como exemplo de ligantes betuminosos temos os betumes de pavimentação, alvo de estudo nesta dissertação. Estes betumes, obtidos por processos de refinação do petróleo bruto, são utilizados para envolver o agregado, para o fabrico das misturas betuminosas tradicionais, a usar na construção e conservação de pavimentos (InIR, s.d.). Deverão cumprir os requisitos constantes na norma EN 12591 "*Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*", onde se especifica as propriedades e métodos de ensaio necessários à sua caracterização.

Tanto para as MBQ como para as MBT, quantidade de ligante que normalmente se usa é cerca de 4% a 6% da massa da mistura betuminosa, dependendo das especificações e utilização pretendida para o pavimento (NAPA & EAPA, 2011).

No esqueleto mineral da mistura betuminosa, uma determinada quantidade de ligante ocupa uma parte do volume de vazios e outra quantidade, que depende da porosidade dos agregados, é absorvida por estes. O ligante desempenha as seguintes funções (Silva, 2005):

- Assegurar a ligação entre os agregados, por forma a que a mistura betuminosa resista à tração.
- Conferir flexibilidade à mistura betuminosa, de modo a resistir ao fendilhamento sob a ação das cargas de tráfego.
- Garantir a impermeabilidade e durabilidade da mistura betuminosa, por forma a resistir à ação dos agentes climáticos.
- Permitir a trabalhabilidade da mistura betuminosa, garantindo condições adequadas de produção em central e compactação *in situ*.

Em Portugal, para o fabrico de misturas betuminosas, os betumes de pavimentação 50/70 e 35/50 são os mais utilizados (InIR, s.d.), sendo este último o tipo de betume utilizado no âmbito desta

dissertação. Optou-se por este betume uma vez que atualmente é o betume mais usado no fabrico das misturas betuminosas em Portugal (Martinho, 2014).

De acordo com o CETO da Estradas de Portugal, S.A. (2014a), estes betumes devem cumprir os requisitos especificados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Requisitos/propriedades dos betumes de pavimentação (Estradas de Portugal, 2014a)

Requisitos	Propriedades	Referência normativa	Unidade	Betume 35/50
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25°C	EN 1426	0,1 mm	35 - 50
Consistência a temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	50 - 58
Durabilidade (Resistência ao envelhecimento – RTFOT ^(a) a 163°C. NP 12607-1	Penetração retida	EN 1426	%	≥ 53
	Aumento da temperatura de amolecimento – severidade 2	EN 1427	°C	≤ 11
	Varição em massa ^(b) (valor absoluto)	EN 12607-1	%	≤ 0,5
	Índice de penetração	EN 12591	-	- 1,5 - +0,7
	Temperatura de fragilidade de Fraass	EN 12593	°C	≤ -5
Outros requisitos	Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 240
	Viscosidade Cinemática a 135°	EN 12595	mm ² /s	≥ 370
	Teor em parafinas	EN 12606-2	% (m/m)	≤ 4,5
	Solubilidade	EN 12595	%	≥ 99,0
(a) Rolling Thin Film Oven Tester (b) A variação de massa tanto pode ser positiva como negativa				

Dos vários tipos de betumes de pavimentação, nesta dissertação usou-se um betume 35/50² da CEPSA, indicado para MBT, cumpridor dos requisitos normativos. Este betume difere dos tradicionais, usados para MBQ, uma vez que é aditivado em fabrica de modo a poder ser utilizado em MBT, facilitando assim o processo de fabrico uma vez que não há necessidade de adicionar aditivos. Apesar de haver betumes de outras marcas com o mesmo propósito, a escolha recaiu sobre este de forma a poder comparar os resultados obtidos nos ensaios, com estudos que utilizaram betume tradicional da mesma marca ao qual foi adicionado aditivo aquando do fabrico das misturas.

Associadas às condições de temperatura do pavimento, as características do betume influenciam de forma considerável o comportamento das misturas betuminosas (Martinho, 2014). Por se tratar de um material sensível ao calor, o betume varia consideravelmente a sua consistência com a variação da temperatura. Portanto, o seu comportamento elástico, viscoelástico e viscoso é função

² Ficha técnica disponível no Anexo A (CEPSA, 2016b)

da temperatura e do tempo de aplicação da carga. A baixa temperatura, o betume comporta-se como um sólido elástico e quando a temperatura sobe começa-se a ter um comportamento viscoso.

A altas temperaturas e/ou para longos tempos de aplicação de carga, o betume tem um comportamento de um fluido Newtoniano, com a viscosidade independente da taxa de aplicação da carga (Dias, 2011).

2.2.2. Agregados

De acordo com as normas europeias, agregado define-se como “o material granular utilizado na construção e pode ser natural, artificial ou reciclado. Um agregado natural é um agregado de origem mineral que foi sujeito apenas a processamento mecânico. O agregado artificial é um agregado de origem mineral resultante de um processamento industrial compreendendo modificações térmicas ou outras. Um agregado reciclado é um agregado resultante do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção” (Estradas de Portugal, 2014a).

Os agregados têm como objetivo a formação de um esqueleto pétreo que resista à ação do tráfego, sendo a sua resistência devida ao imbricamento dos grãos entre si. Na formulação das misturas betuminosas para pavimentação rodoviária, o material agregado constitui cerca de 90 a 95% do seu peso e 75% a 85% do seu volume (Branco et al., 2006).

No fabrico de misturas betuminosas, quando se utiliza um determinado material granular, é necessário determinar certas características fundamentais como a sua granulometria, resistência, forma das partículas, a limpeza e a adesividade ao ligante (Branco et al., 2006).

Uma das principais características responsáveis pelo comportamento dos pavimentos rodoviários é a granulometria dos agregados (Branco et al., 2006).

A massa do agregado retida em cada um dos peneiros é expressa em percentagem da massa total da amostra, originando uma curva que relaciona, num sistema de coordenadas retangulares, a percentagem do material passado em cada peneiro com o logaritmo da abertura do peneiro, denominada curva granulométrica. Esta curva deve situar-se dentro de certos limites, o fuso granulométrico, que é limitado por curvas granulométricas que correspondem aos limites inferior e superior pré-estabelecidos (Branco et al., 2006).

Para agregados finos, grossos e de granulometria extensa, a granulometria é descrita tendo como ponto de partida a dimensão do agregado. A dimensão do agregado, d/D , é definida tendo em conta que a maior parte das partículas do agregado têm diâmetros compreendidos entre os peneiros de aberturas “d” e “D”. No caso dos agregados finos e de granulometria extensa a dimensão é $0/D$. Espera-se que passe uma pequena percentagem de partículas no peneiro de abertura “d” e que fique retida uma pequena percentagem no de abertura “D” (Branco & Ferreira, 2009).

Para misturas AC 20 base ligante (MB), o fuso granulométrico, de acordo com o CETO da Estradas de Portugal, S.A. (2014a), tem de cumprir os requisitos especificados no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Requisitos do fuso granulométrico - Camadas de MBQ: Camadas de base (Estradas de Portugal, 2014a)

Tipo de mistura		AC 20 base (MB)	
Peneiros Série Base + Série 2	Unidade	Percentagem acumulada do material passado	
40	mm	-	-
31,5		1,4D	100
20		D	90 - 100
16		-	-
14		-	-
12,5		(a)	34 - 49
10		2	26 - 41
6,3		-	-
4		(b)	34 - 49
2		2	26 - 41
1		-	-
0,5		(c)	12 - 26
0,125		(d)	4 - 14
0,063		0,063	2 - 7
Referência Normativa		EN 13108-1 e NP EN 13043	
D – Abertura do peneiro superior que pode reter material, em milímetros; (a) Peneiro característico intermédio, entre D e 2mm, (b) Peneiro extra opcional entre D e 2mm; (c) Peneiro característico intermédio, entre 2 e 0,063mm; (d) Peneiro extra opcional entre 2 e 0,063mm.			

A granulometria influencia o comportamento das misturas betuminosas, e só a quantidade adequada destes três tipos de elementos, com uma densidade elevada, permite obter bons resultados.

Os agregados grossos desempenham as seguintes funções na mistura (Silva, 2005):

- Assegurar a estabilidade da mistura betuminosa, de modo a resistir à deformação permanente.
- Aumentar a resistência mecânica das misturas betuminosas, através do aumento do módulo de rigidez.
- Conferir rugosidade superficial suficiente para a circulação dos veículos, de modo a garantir aderência pneu-pavimento.

Os agregados finos garantem estabilidade e compacidade à mistura betuminosa. A compacidade é uma propriedade que se relaciona com o arranjo estrutural dos agregados e que é controlada pelo valor do volume de vazios no esqueleto mineral.

O filer confere compacidade e impermeabilidade à mistura betuminosa. As suas características físicas e químicas influenciam o comportamento da mistura. A utilização de diferentes tipos de filer em misturas betuminosas iguais, frequentemente origina um comportamento muito diferente dessas misturas no pavimento.

Os agregados não devem ser muito porosos, de modo a não ser necessária uma quantidade muito elevada de betume, nem totalmente impermeáveis, para que a adesividade do betume aos agregados não seja reduzida (Silva, 2005).

Segundo o CETO da Estradas de Portugal, S.A. (2014a), os agregados devem cumprir os requisitos especificados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Requisitos/propriedades dos agregados (Estradas de Portugal, 2014a)

Requisitos / Propriedades		Referência normativa	Unidade	Tipo de mistura AC 20 base (MB)
Qualidade dos finos	3% - 10% ^(a)	NP EN 933-9	g/kg	MB _F 10
	> 10%			Satisfazer os requisitos aplicáveis aos fileres
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento		NP EN 933-3	-	FI ₃₀
Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos		NP EN 933-5	%	C _{100/0}
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente Los Angeles		NP EN 1097-2 (secção 5)	%	LA ₄₀
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente micro-Deval		NP EN 1097-1	%	M _{DE} 25
Massa volúmica das partículas		NP EN 1097-6	mg/m ³	A declarar
Absorção de água		NP EN 1097-6	%	≤ 2
Baridade		NP EN 1097-3	mg/m ³	A declarar
Resistência ao gelo e ao degelo [valor de absorção de água (wa) como ensaio de triagem e valor do sulfato de magnésio (MS)] ^(c)		NP EN 1097-6 NP EN 1367-2	%	Se WA >2, o valor do sulfato de magnésio deve estar enquadrado em MS ₃₅
Resistência ao choque térmico		NP EN 1367-5 NP EN 1097-2 (secção 5)	%	A declarar
Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos		EN 12697-11	-	A declarar ^(d)
"Sonnenbrand" do basalto ^(e)		NP EN 1367-3 NP EN 1097-2 (secção 5)	%	Perda de massa após a ebulição ≤ 1 e SB _{LA} ≤ 8

(a) Quando a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm no agregado fino, estiver compreendido entre 3% e 10%, em massa, deve ser avaliada a nocividade dos finos da fração 0/0,125 mm e o valor do ensaio de azul de metileno deve estar enquadrado na categoria MB_F10.

(b) Se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for superior a 10 % (em massa), os finos devem cumprir os requisitos aplicáveis aos fileres.

(c) Para agregados suscetíveis de degradação pela ação do gelo-degelo, expostos a ambientes sujeitos ao gelo e ao degelo, a situações de humidade elevada ou à água do mar, o ensaio de absorção de água deve ser utilizado como ensaio de triagem. Se a absorção de água não for superior ao valor especificado na categoria WA₂₄₂ o agregado deve ser considerado como resistente ao gelo-degelo. Se a absorção de água for superior a WA₂₄₂, então o valor do sulfato de magnésio deve estar enquadrado em MS₃₅.

(d) A utilização de seixo britado é condicionada ao emprego de um aditivo no betume, de modo a garantir a adequada adesividade ao ligante betuminoso.

(e) Em caso de dúvida, onde existam indícios de "Sonnenbrand".

Segundo o CETO (Estradas de Portugal, 2014a), os agregados naturais devem apresentar-se homogéneos e não devem conter outro tipo de material, como matéria orgânica e outras substâncias estranhas (madeira, vidro e plástico), que afetem a mistura. Devem ter pouca suscetibilidade à meteorização e apresentarem-se são ou pouco alterados.

De entre as normas europeias que definem os requisitos aplicáveis aos agregados, em relação a misturas betuminosas, destaca-se para este tema a NP EN 13043 "Agregados para

misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas aeroportos e outras áreas de circulação”.

Em relação aos agregados naturais utilizados para a formulação da mistura, estes foram de natureza calcária, provenientes da Serra da Arrábida, zona de Sesimbra, como representado na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Agregado calcário proveniente da Serra da Arrábida

Nas últimas décadas, o crescimento da exploração mineira e o aumento do consumo de materiais extraídos levaram a uma rápida redução dos recursos naturais. Por outro lado, o elevado volume de extração de recursos produziu uma quantidade significativa de resíduos, com consequentes efeitos nocivos para o meio ambiente (Arabani et al., 2013).

Cerca de 12 500 toneladas de agregados naturais são utilizadas por cada quilómetro de pavimento construído. A utilização de agregado reciclado mostra-se assim como uma solução para esta problemática (Arabani et al., 2013).

Os RCD constituem grande parte dos resíduos sólidos. Entre os vários tipos de materiais de construção, o betão é o componente mais significativo, constituindo cerca de 75%, 70%, 40% e 70% do material recolhido de sítios de construção, sítios de demolição, obras de construção civil em geral e obras de reabilitação, respetivamente (Arabani et al., 2013).

A nível dos seus componentes e a nível das quantidades produzidas e disponíveis para aplicação, os RCD apresentam características muito próprias. Em função da sua origem, estes materiais podem dividir-se em três tipos distintos: resíduos de construção, resíduos de remodelação, reabilitação e renovação e resíduos de demolição (Ferreira J. , 2009).

Em 1993, a Comissão Europeia estabeleceu um grupo de trabalho para o tema dos RCD. Devido à sua quantidade e potencial para incluir materiais perigosos, este tipo de resíduos foram considerados como prioritários. Este grupo de trabalho teve o objetivo de conceber um plano Europeu, estratégico e de implementação, de redução da quantidade de RCD a ser desperdiçado (EAPA, 2005).

Com a publicação do Decreto-lei n.º 46/2008, Portugal implementou políticas dirigidas à gestão dos RCD. Por isto, e com o objetivo de contribuir para uma construção sustentável, surgiu a necessidade de definir os requisitos exigidos para a aplicação de agregados reciclados em camadas de base e sub-base não ligadas de pavimentos rodoviários (Estradas de Portugal, 2014a).

Catalogados no capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos, constante da Portaria nº 209/2004, os RCD apresentam composição muito variável devido a fatores tais como a sua origem e as práticas locais de construção. Uma triagem apropriada e uma adequada seleção do processo de

preparação tornam-se fundamentais na sua produção, de modo a que a tal variabilidade não condicione a valorização destes resíduos (LNEC, 2009a).

Segundo Paranavithana & Mohajerani (2006) os agregados de betão reciclado diferem dos agregados naturais, uma vez que possuem um massa de cimento junto à superfície do agregado natural que contribui para o aumento da porosidade e absorção de água e uma diminuição da densidade.

O aumento da porosidade leva a um acréscimo da absorção de betume, o que levou alguns autores a propor a aplicação de revestimentos e selantes, de modo a minimizar esta absorção (Lee et al., 2012). No entanto, o mais habitual é o estudo de misturas que contenham agregado reciclado juntamente com agregado natural, por forma a obter valores de absorção de betume aceitáveis.

Nesta dissertação, avaliou-se a incorporação de betão britado reciclado, correspondendo a 60% da massa total de agregado, com uma granulometria de 0/20 mm.

Os resíduos com possibilidade de incluir contaminantes deverão ser alvo de uma caracterização química, avaliando as concentrações dos elementos que constituem o eluato (solução obtida num ensaio de lixiviação), após lixiviação de acordo com a EN 12457-4 “Characterization of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges” (Martinho, 2014). Os resíduos utilizados nas misturas betuminosas devem cumprir os valores constantes no Quadro 2.6. Estes ensaios de lixiviação devem ser realizados segundo a EN 1744-3.

Quadro 2.6 – Valores limites de lixiviação dos resíduos passíveis de serem reutilizados (Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de Agosto do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2009)

Componentes	mg/kg de matéria seca L/S ⁽¹⁾ = 10 l/kg	Componentes	mg/kg de matéria seca L/S ⁽¹⁾ = 10 l/kg
Arsénio, As	0,5	Antimónio, Sb	0,06
Bário, As	20	Selénio, Se	0,1
Cádmio, Cd	0,04	Zinco, Zn	4
Crómio, Cr	0,5	Cloreto ^(c)	800
Cobre, Cu	2	Fluoreto	10
Mercúrio, Hg	0,01	Sulfato ^(c)	1000 ^(a)
Molibdénio, Mo	0,5	Índice de fenol	1
Níquel, Ni	0,4	COD ^(d)	500 ^(b)
Chumbo, Pb	0,5	SDT ^{(c)(e)}	4000

(1) Relação líquido para sólido para libertação total;
(a) Se o resíduo não satisfizer este valor, poderá continuar a ser considerado conforme aos critérios de admissão desde que a lixiviação não exceda 6000mg/kg a L/S=10l/kg, determinado por um ensaio de lixiviação num lote ou por um ensaio de percolação em condições próximas do equilíbrio local;
(b) Se o resíduo não satisfizer este valor relativamente ao COD ao seu próprio valor de pH, este poderá ser alternativamente verificado com L/S = 10l/kg e a um pH entre 7,5 e 8,0. O resíduo pode ser considerado conforme aos critérios de admissão para COD se o resultado dessa determinação não exceder 500mg/kg;
(c) Os valores para SDT podem ser utilizados em alternativa aos valores para o sulfato e o cloreto;
(d) COD = Carbono Orgânico Dissolvido;
(e) SDT = Sólidos Dissolvidos Totais.

Um estudo no âmbito desta temática, intitulado “Assessment of Environmental Hazardous of Construction and Demolition Recycled Materials (C&DRM) from Laboratory and Field Leaching Tests Application in Road Pavement Layers” (Roque et al., 2016), destacou a viabilidade de utilização de RCD em camadas de pavimentos rodoviários, uma vez que os níveis de substâncias libertadas se revelaram muito abaixo dos valores limite de lixiviação.

2.3. Formulação Marshall

Para a formulação de MBT, na maior parte dos estudos efetuados, foram utilizados processos semelhantes aos das MBQ (Martinho, 2014).

Os métodos empíricos têm sido usados mundialmente, ao longo de várias décadas, principalmente o método de Marshall, introduzido em Portugal na década de 50 (Branco et al., 2006), que foi o método usado no âmbito desta dissertação. Estes métodos fundamentam-se na determinação do teor em betume atendendo aos limites impostos fundamentados na experiência acumulada, incluindo os limites determinados pela análise da porosidade, de modo a otimizar diversas variáveis determinadas em ensaios (a estabilidade e a deformação).

Algumas das variáveis correspondem a parâmetros volumétricos (baridade e porosidade) e outras são obtidas empiricamente através do ensaio mecânico de provetes, com diferentes teores em betume, preparados através dum processo de produção e compactação que não reproduz as condições existentes *in situ*. Pela análise das variáveis estabilidade, deformação, porosidade e baridade, procede-se à escolha do teor ótimo em betume, através do valor que otimiza os valores dessas variáveis.

O uso contínuo do método de formulação Marshall originou um conhecimento acumulado vasto, permitindo interferir das variáveis usadas, cuja obtenção é geralmente simples, uma previsão razoável do comportamento das misturas betuminosas (Branco et al., 2006).

Os conceitos básicos que suportam o método Marshall foram estabelecidos por Bruce Marshall, técnico do Departamento de Estradas do Estado do Mississípi nos Estados Unidos da América, e em 1948 foi sujeito a melhoramentos pelo *U. S. Army Corps of Engineers*, chegando ao ponto a que até hoje é conhecido e descrito na norma portuguesa NP 142 (Branco et al., 2006).

Este método consiste num ensaio de compressão diametral ou tração indireta dum provete submetido a um aumento de deformação constante, no qual é medida a estabilidade, ou seja, a resistência à deformação. Aplica-se a misturas betuminosas, densas ou abertas, desde que a dimensão máxima do agregado seja igual ou inferior a 24,5 mm (Branco et al., 2006).

Em termos práticos, para o fabrico dos provetes segue-se o seguinte procedimento constante da EN 13108-1 (CEN, 2009a) e do CETO (Estradas de Portugal, 2014b):

- Os agregados, secos na estufa até obterem peso constante, são misturados com o betume de modo a que haja um correto envolvimento. A temperatura a usar depende do tipo de betume escolhido.
- Coloca-se o material dentro de um molde metálico e procede-se à sua compactação através da aplicação de 35, 50 ou 75 pancadas, para classes de tráfego ligeiro (nº de

eixos padrão de 80 kN < 10⁴), médio (nº de eixos padrão de 80 kN entre 10⁴ e 10⁶) ou pesado (nº de eixos padrão de 80 kN > 10⁶), respetivamente, com o compactador Marshall que contém um martelo normalizado.

Surgem assim provetes cilíndricos com 101,6 mm de diâmetro e 63,4±1,5 mm de altura (Branco et al., 2006), para um mínimo de cinco teores de betume, com variação de 0,5% em relação à massa total, e para cada curva granulométrica considerada.

A partir de ensaios realizados sobre estes provetes, determinam-se várias grandezas caracterizadoras da mistura: a força de rotura (estabilidade), a deformação, a densidade ou a baridade aparente, a porosidade e o volume de vazios no agregado compactado (VMA) (e/ou o grau de saturação em betume) (Branco et al., 2006).

Todos os provetes fabricados são medidos de forma a verificar se cumpre o critério da altura do provete e pesados no ar e em água de modo a determinar a baridade aparente. Após isso é calculada a baridade máxima teórica, a porosidade e o VMA. A baridade máxima teórica é determinada através de um picnómetro de vácuo (Branco et al., 2006).

Pelo motivo do ensaio de determinação da baridade máxima teórica ser um ensaio destrutivo, os provetes são previamente submetidos ao ensaio de compressão Marshall. Neste ensaio é determinada a força de rotura (estabilidade) e a deformação, à temperatura de 60 °C, através da aplicação de uma força recorrendo a uma prensa, que atua depois de o provete ser colocado num estabilómetro Marshall. Este conjunto é colocado entre dois pratos da prensa, que durante a aplicação da força se aproximam a uma velocidade de 50,8 mm/min (Branco et al., 2006).

A estabilidade representa a força máxima resistente dos provetes e a deformação corresponde ao encurtamento diametral do provete ocorrido desde o início do ensaio até à rotura (Branco et al., 2006).

Como valor para cada uma das grandezas medidas adota-se a média dos valores obtidos em cada um dos provetes ensaiados, para cada percentagem de betume. Estes valores são representados em função da percentagem de betume e, para cada uma das grandezas, traça-se a curva que melhor se ajusta aos pontos representados (Branco et al., 2006).

A percentagem ótima de betume corresponde à média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites da porosidade definidos nas especificações aplicáveis. O valor encontrado deve corresponder a uma deformação e um VMA com valor dentro dos limites descritos também nas especificações (Branco et al., 2006).

Os valores limites especificados já foram descritos no Quadro 2.2 do subcapítulo 2.2 Misturas betuminosas.

2.4. Trabalhos no âmbito da temática da dissertação

A incorporação de agregados reciclados provenientes de RCD, como constituinte de misturas betuminosas, já foi alvo de vários estudos nacionais e internacionais. Ao longo da pesquisa bibliográfica efetuada, foram encontrados diversos estudos relacionados com esta temática.

Segundo um estudo feito por Parnavithana & Mohajerani (2006), intitulado “Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete”, as propriedades volumétricas (exceto a percentagem de vazios), o módulo de elasticidade e os valores de fluência das misturas betuminosas que contêm agregados de RCD são relativamente menores comparativamente com valores relativos a misturas betuminosas similares mas formuladas unicamente com agregados naturais.

Wong et al. (2007), na publicação do artigo “Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt”, concluíram que o uso de betão reciclado como filer/finos pode aumentar o valor do módulo de elasticidade e reduzir a fluência dinâmica.

O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade foi realizado para duas temperaturas (25 °C e 40 °C), e para ambas, a adição de RCD aumentou o módulo de elasticidade, embora esse aumento fosse menor para a temperatura de 40 °C.

No estudo “Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego” Pestana (2008) caracterizou o comportamento mecânico de RCD resultantes de betão estrutural, na aplicação em camadas de base e de sub-base de estradas de baixo tráfego.

Dos vários ensaios laboratoriais, realizados ao agregado reciclado obtido através de britagem de cubos de betão, o autor concluiu a sua viabilidade de aplicação em camadas granulares não ligadas de estradas de baixo tráfego.

No estudo de “Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego”, Ferreira (2009) caracterizou laboratorialmente dois tipos de RCD, resultantes da britagem laboratorial de cubos de betão e da britagem em obra de betão resultante da demolição de um edifício, segundo a especificação LNEC E 473 (LNEC, 2009a).

Este autor concluiu, para os dois materiais, a sua viabilidade de aplicação, que pode ser otimizada com a adição de outras frações de agregados de origem natural que corrigem algumas das propriedades determinadas no estudo.

Mills-Beale e You (2010), no estudo intitulado “The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates”, avaliaram o uso de RCD para 25%, 35%, 50% e 75% relativamente à percentagem de massa total de agregados que compõe as misturas betuminosas.

Estes autores concluíram que os RCD são capazes de ser um substituto útil em pavimentos constituídos por MBQ onde as cargas de serviço sejam baixas e que as deformações permanentes, para percentagens de RCD até 75%, não se mostram um problema.

Concluíram também que a temperatura de ensaio influencia mais os resultados da determinação do módulo de deformabilidade do que a quantidade de RCD usada, e que este módulo de deformabilidade da mistura aumenta com a redução da quantidade de RCD na mistura.

Por último verificaram que a substituição de agregados naturais por agregados provenientes de RCD possibilita uma poupança significativa de energia durante o processo de compactação.

Fernandes (2012), no estudo da “Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Materiais de Construção de Pavimentos Rodoviários”, apesar ter considerado os requisitos utilizados para agregados naturais, julga que os agregados reciclados podem ser aplicados sem cumprir todos

os requisitos estabelecidos, desde que as características finais das camadas sejam adequadas. De uma forma geral, observou o cumprimento das exigências impostas no CETO (Estradas de Portugal, 2014a).

Verificou que o betão britado é geralmente um material bem graduado, apesar de apresentar uma resistência à fragmentação e ao desgaste inferior à dos agregados naturais.

Os agregados reciclados, por serem normalmente mais porosos, e conseqüentemente mais suscetíveis à absorção de água, uma mistura betuminosa com este tipo de agregados necessita de uma maior quantidade de betume, de modo a que a parcela de betume efetivo (a que realmente liga as partículas) seja semelhante à utilizada para os agregados naturais. A utilização de RCD verificou assim um grande potencial de aplicação, em camadas betuminosas superficiais e camadas granulares de base e de sub-base, sendo uma das soluções para contribuir para a sustentabilidade na construção.

Vargas (2013), na dissertação de mestrado com o tema “Aplicação de betão britado reciclado em misturas betuminosas para camadas de base” estudou a viabilidade da aplicação de betão britado, na percentagem de 25%, como agregado na produção de misturas betuminosas para camadas de base de pavimentos rodoviários.

Relativamente ao estudo do agregado concluiu que o material apresentava uma granulometria extensa, que não se inseria por si só no fuso granulométrico do CETO (Estradas de Portugal, 2014a), sendo a sua aplicação viabilizada com a granulometria corrigida com agregado natural.

Do ponto de vista de caracterização do agregado, Vargas (2013) concluiu que o material é poroso, apresentando valores de absorção de água elevados comparativamente com os agregados naturais. O material apresentou também alguma sensibilidade nos ensaios de resistência à fragmentação e ao desgaste.

Relativamente ao estudo de formulação, o autor chegou a uma percentagem ótima de betume de 5,5%, com correspondentes valores de força de rotura e deformação de ,respectivamente, 13 kN e 2,7 mm.

No ensaio de sensibilidade à água, o estudo obteve valores bastante razoáveis, quando comparados com misturas contendo unicamente agregados naturais. O valor de resistência conservada foi de 75%, mostrando que a mistura conservou grande parte da sua resistência após condições extremas em meio aquoso.

Quanto ao ensaio de afinidade ligante-agregado, concluiu que existe alguma tendência para a separação do ligante e do agregado aquando da presença de água.

Concluiu, assim, que na maior parte dos ensaios, a mistura contendo betão britado como agregado, cumpriu os parâmetros de referência definidos para as misturas betuminosas fabricadas a quente. Os fatores menos positivos encontrados, não inviabilizam a aplicação de RCD de betão britado no fabrico das misturas betuminosas, sendo que apenas que estes terão de ser tidos em consideração aquando da sua formulação.

Pasandín e Pérez (2014), no estudo intitulado “Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion” caracterizaram laboratorialmente

MBQ para camadas de base, usando agregado reciclado de RCD nas percentagens de 5%, 10%, 20% e 30% em substituição do agregado natural. Por forma a aumentar a resistência à água das misturas, os agregados de RCD foram revestidos com 5% de emulsão betuminosa, antes do processo de mistura. Foram feitos ensaios para obtenção dos valores de rigidez, deformação permanente e fadiga.

Os resultados indicaram que as misturas estavam em conformidade com a especificações espanholas de resistência à água para camadas de base.

Em relação aos outros parâmetros, os valores obtidos mostraram que estas misturas têm propriedades mecânicas semelhantes aos obtidos para misturas convencionais. Os valores do módulo de deformabilidade revelaram-se muito semelhantes ao das misturas com agregados naturais. O aumento da percentagem de RCD levou a uma ligeira diminuição da rigidez da mistura betuminosa. Em relação à resistência deformação permanente e fadiga, os resultados foram favoráveis e também semelhantes aos das misturas convencionais.

Gul e Ahmed Guler (2014) no estudo “Rutting susceptibility of asphalt concrete with recycled concrete aggregate using revised Marshall procedure” avaliaram a susceptibilidade à deformação permanente das misturas betuminosas com adição de RCD.

Os resultados mostraram que o uso de RCD pode melhorar a resistência à deformação permanente das misturas com agregados grossos e provocar o efeito contrário em misturas com agregados finos.

Pasandín e Pérez (2015), no artigo “Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates”, com a publicação de um estudo sobre MBQ utilizando agregados de betão reciclado, concluíram que os agregados de betão proveniente dos RCD têm um elevado potencial para uso em pavimentos com baixo volume de tráfego. No entanto, os RCD costumam ter na sua superfície uma argamassa porosa que é responsável pela menor qualidade destes agregados em comparação com os agregados de origem natural.

Verificaram que vários autores demonstram que as misturas envolvendo RCD teriam uma menor resistência à água, problema que poderia ser resolvido com a aplicação de diferentes tratamentos, tais como o revestimento dos RCD com diferentes vedantes (emulsão de betume ou resina de silicone líquida), calcinação dos RCD ou aquecimento da mistura antes da compactação. Contudo, para a utilização generalizada de RCD em misturas betuminosas, dois pontos-chave precisam de maior investigação: os custos associados ao processo conducente à sua utilização em MBQ e a falta de especificações.

No estudo publicado no artigo denominado “*Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate*”, Qasrawi e Asi (2016) avaliaram o efeito do uso de agregados de betão reciclado nas propriedades básicas das MBQ formuladas com betumes de penetração nominal 60/70 e 80/100. Nessas misturas, o agregado natural foi substituído em 25%, 50%, 75% ou 100% pelo agregado reciclado.

Os resultados mostraram que o uso de agregados reciclados aumentou a percentagem ótima de betume, com resultados mais significativos para substituições superiores a 25%.

Embora o aumento da percentagem de agregado reciclado tenha diminuído o módulo de rigidez das misturas betuminosas, fez aumentar a sua aderência. Ambos os valores se verificaram maiores para as misturas com betume 60/70 em relação ao betume 80/100.

As amostras contendo o agregado reciclado revelaram uma menor sensibilidade à água.

Embora até ao limite de substituição de 50% ser cumprido o critério do limite de resistência à tração, as propriedades volumétricas não se demonstraram aceitáveis.

Assim, concluíram que na formulação de MBQ, para ambos os tipos de betume, não deverão ser usadas substituições do agregado com percentagem superior a 25%.

Gómez-Meijide, Pérez, Airey e Thom (2015) no estudo intitulado “Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste” avaliaram a rigidez de misturas betuminosas fabricadas a frio com 100% do agregado com origem em resíduos de construção e demolição.

Verificaram que estas misturas frequentemente apresentavam maiores valores de rigidez, comparando com misturas fabricadas unicamente com agregado natural. No entanto, a substituição do agregado levou a maiores valores para as quantidades de betume e água necessárias.

Martinho (2014) na sua tese de doutoramento com o tema “Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica” avaliou a adição de agregados reciclados provenientes de misturas betuminosas recuperadas, de RCD e de escórias de aciaria, em substituição de parte dos agregados naturais e do ligante novo.

O autor estudou misturas betuminosas com diversas composições, de entre as quais se destaca, no âmbito desta dissertação, as MBT produzidas com betume tradicional aditivado na fase de fabrico e agregado de betão britado reciclado, na quantidade de 60% da massa total de agregado, em adição ao agregado natural. Produziu também MBQ apenas com agregado natural para obter valores de comparação.

Os valores relativos aos ensaios efetuados a amostras de misturas contendo RCD, bem como a caracterização dessas mesmas misturas, serão valores de referência para a presente dissertação, sendo assim apresentados nos capítulos seguintes.

3. Estudo experimental

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se o estudo experimental de avaliação da viabilidade de utilização do betão britado reciclado como agregado para misturas betuminosas.

Este estudo foi organizado em quatro fases:

1. Caracterização geométrica do agregado.
2. Caracterização física do agregado.
3. Formulação das misturas betuminosas com incorporação de agregado natural e de agregado reciclado e determinação das suas propriedades volumétricas.
4. Ensaios de avaliação do desempenho das misturas betuminosas.

Para cada uma destas fases efetuaram-se os ensaios segundo os procedimentos normativos aplicáveis, como apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Organização do estudo experimental

Caracterização	Propriedades	Referência normativa
Geométrica	Análise granulométrica	EN 933-1
Física	Afinidade ligante-agregado	EN 12697-11
Formulação da mistura	Fabrico da mistura betuminosa	EN 12697-35
	Moldagem de provetes cilíndricos	EN 12697-30
	Baridade	EN 12697-6
	Baridade máxima teórica	EN 12697-5
	Porosidade e VMA	EN 12697-8
	Estabilidade e deformação (Ensaio Marshall)	EN 12697-34
	Moldagem e corte de lajes	EN 12697-33
Avaliação do desempenho das misturas	Resistência à deformação permanente – <i>Wheel Tracking</i>	EN 12697-22
	Sensibilidade à água	EN 12697-12 EN 12697-23
	Módulo de rigidez	EN 12697-26
	Resistência à fadiga	EN 12697-24

Jesus (2015) procedeu à caracterização da viscosidade dinâmica do betume utilizado na presente dissertação, para além de outros betumes temperados incluindo o betume puro. Desse estudo foi possível concluir que o betume temperado evidenciou um desempenho semelhante ao dos betumes temperados com Rediset e Sasobit, para as temperaturas recomendadas de fabrico e compactação das misturas betuminosas temperadas.

3.2. Composição das misturas betuminosas estudadas

3.2.1. Considerações iniciais

Os resultados do estudo experimental efetuado para a caracterização das MBT com incorporação de betão britado reciclado, destinadas à aplicação em camadas de base betuminosa, apresentam as características constantes do Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Características das MBT formuladas

Materiais		Designações	Fornecedores	Origens	Ref ^a	Mistura Temperada (%)
Betume (em % da mistura)		Asfáltico	Cepsa	Espanha	BT 35/50	3,5 / 4,0 / 4,5 / 5,0 / 5,5
Agregados naturais (em % do agregado)	Brita 2	Calcário	Sobrisul	Sesimbra	10/20	33
	Brita 1	Calcário	Sobrisul	Sesimbra	4/10	5
	Pó	Calcário	Sobrisul	Sesimbra	0/4	2
Subprodutos	RCD	Residuo de construção e demolição	Odebrecht	A33	0/20	60

3.2.2. Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados na formulação das misturas betuminosas, também usados na tese de doutoramento de Martinho (2014), apresentam as propriedades constantes do Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Características dos agregados utilizados nas misturas betuminosas (Martinho, 2014)

Ensaio	Símbolo	Unidades	Referência normativa	Requisitos (CETO)	Agregado Calcário			RCD
					0/4	4/10	10/20	0/20
Índice de achatamento	FI	%	EN 933-3	≤ 30	0	13,6	12,8	6
Equivalente de areia	SE	%	EN 933-8	-	62	-	-	30
Resistência ao desgaste	LA	-	EN 1097-2	≤ 40	-	-	27	43
Massa volúmica	ρ_a	Mg/m ³	EN 1097-6	-	2,5	2,6	2,6	2,3
Absorção de água	WA	%	EN 1097-6	≤ 2	0,99	1,09	1,74	6,1
Azul-de-metileno	MB _F	g/kg	EN 933-9	≤ 10	2,3	-	-	3,7

Como se pode constatar, o agregado reciclado apresenta valores de resistência ao desgaste e absorção de água fora dos limites definidos no CETO. Este valor de absorção de água pode ser explicado, como já referido anteriormente, pela elevada porosidade associada a este tipo de material, decorrente da presença de argamassa de cimento agarrada às partículas de agregado.

A composição do RCD, de acordo com a norma EN 933-11 (CEN, 2009c), está apresentada no Quadro 3.4. Segundo esta norma, o RCD é passível de ser utilizado como agregado nas misturas betuminosas.

Quadro 3.4 - Composição do RCD utilizado nas misturas betuminosas (Martinho, 2014)

	Constituintes						
	FL (cm ³ /kg)	R _c (%)	R _u (%)	R _a (%)	R _b (%)	R _g (%)	X (%)
RCD	0	84	9	0,7	5	0	0,6

FL - material flutuante; R_c - betão, produtos de betão e argamassas; R_u - agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos; R_a - materiais betuminosos; R_b - elementos de alvenaria de materiais argilosos, de silicatos de cálcio e betão celular; R_g - vidro; X - outros: plásticos, borrachas, metais, madeira não flutuante e estuque

Os resultados do ensaio de lixiviação são apresentados no Quadro 3.5, segundo (Martinho, 2014), e mostram que praticamente todos os valores estão abaixo dos limites máximos legais, e que alguns parâmetros mostram valores não muito superiores aos apresentados pelos agregados naturais.

Quadro 3.5 - Análise do eluato e do resíduo, após ensaio de lixiviação, dos agregados utilizados (Martinho, 2014)

Parâmetros	Unidades	Limites legais	Agregado Calcário	RCD	Parâmetros	Unidades	Agregado Calcário	RCD
Cádmio, Cd	mg/kg	10	<0,005	<0,005	Sulfato, SO ₄ ²⁻	mg/kg	159	492
Crômio, Cr	mg/kg	20	<0,010	0,092	COT	mg/kg	<14100	7800
Chumbo, Pb	mg/kg	10	<0,024	<0,024	COD	mg/kg	5	17,5
Zinco, Zn	mg/kg	50	0,021	0,021	BTEX ⁽¹⁾	mg/kg	<0,17	<0,17
Cobre, Cu	mg/kg	50	<0,014	0,016	PCB ⁽²⁾	mg/kg	<0,021	<0,021
Níquel, Ni	mg/kg	10	<0,026	<0,026	PAH ⁽³⁾	mg/kg	<0,016	<0,016
Cloreto, Cl ⁻	mg/kg	-	35	53	pH	-	9,6	9,6

(1)BTEX = Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e Xilenos (meta-, para- & orto-);
(2)PCB = Polychlorinated Biphenyl (BPC = Bifenilos PoliClorados);
(3)PAH = Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (HAP = Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos).

3.2.3. Análise granulométrica dos agregados

Para a realização da análise granulométrica dos agregados utilizados na produção das diversas misturas betuminosas foi seguida a EN 933-1 (CEN, 2012g). O ensaio consistiu na peneiração a seco, por meio de um conjunto de peneiros conforme especificado na EN 933-2 (CEN, 1996), do material em diversas classes granulométricas de granulometria decrescente, ou seja, separação de frações nas quais o material tem dimensões compreendidas entre o peneiro de menor e maior dimensão das aberturas. As classes granulométricas são definidas pela dimensão da abertura dos peneiros utilizados.

De acordo com a natureza da amostra, selecionaram-se seis peneiros com aberturas de dimensão #16 mm, #8 mm, #4 mm, #2 mm, #0,5 mm e #0,063 mm.

As amostras foram reduzidas de acordo com EN 932-2 (CEN, 1996), por forma a obter o número requerido de porções de ensaio e conseqüentemente um provete de ensaio com massa superior ao mínimo normativo.

Para a peneiração, despejou-se o material seco na coluna de peneiros, dispostos de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com o fundo e a tampa. Agitou-se mecanicamente a coluna, como representado na Figura 3.1, retirando depois os peneiros individualmente, por ordem decrescente da dimensão das aberturas. Agitaram-se manualmente cada um dos peneiros garantindo que não existia perda de material. Transferiu-se a totalidade do material que passa em cada peneiro para o peneiro seguinte da coluna antes de prosseguir a sua peneiração.

O tempo mínimo de peneiração mecânica adotado foi de 20 min. Este processo foi dado por concluído sempre que a massa do material retido não se alterou mais de 1,0% durante 1 min de peneiração.

Através deste processo obtiveram-se as diversas frações granulométricas de agregado natural e reciclado, como representado, respetivamente, na Figura 3.2 e Figura 3.3.

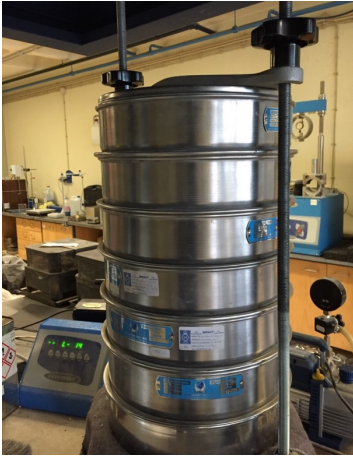


Figura 3.1 - Peneiração dos agregados



Figura 3.2 - Agregados naturais (calcários)



Figura 3.3 - Agregados de RCD (betão britado reciclado)

Através da pesagem obtiveram-se as massas das diferentes frações dos materiais retidos em cada um dos peneiros e no fundo. A quantidade retida foi calculada como percentagem da massa original seca.

As curvas granulométricas dos agregados naturais de natureza calcária e do RCD são apresentadas, respetivamente, na Figura 3.4 e Figura 3.5.

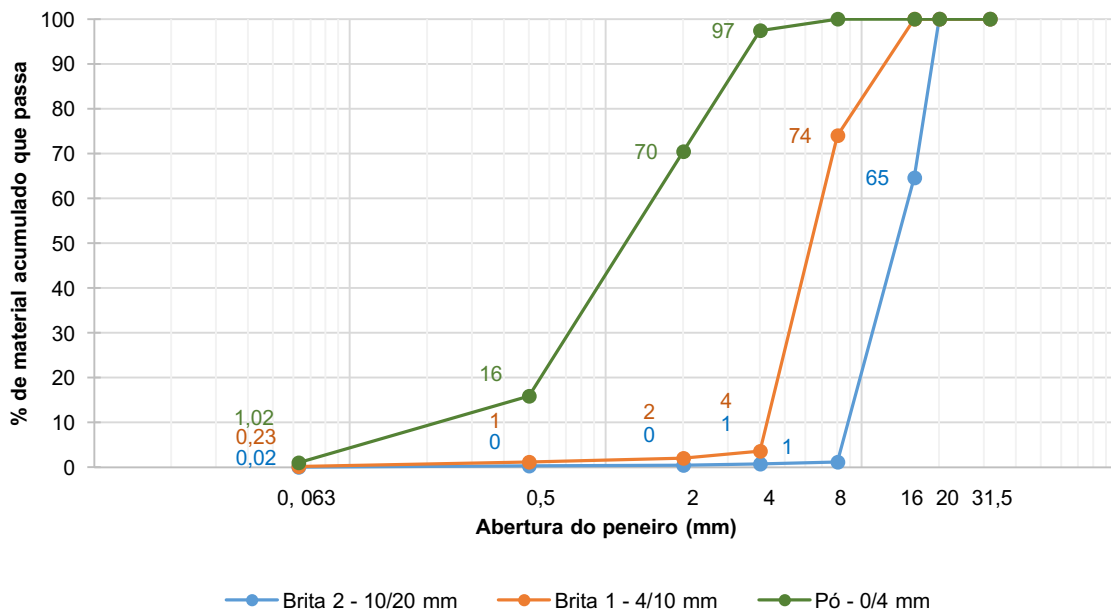


Figura 3.4 - Curvas granulométricas dos agregados naturais de calcário

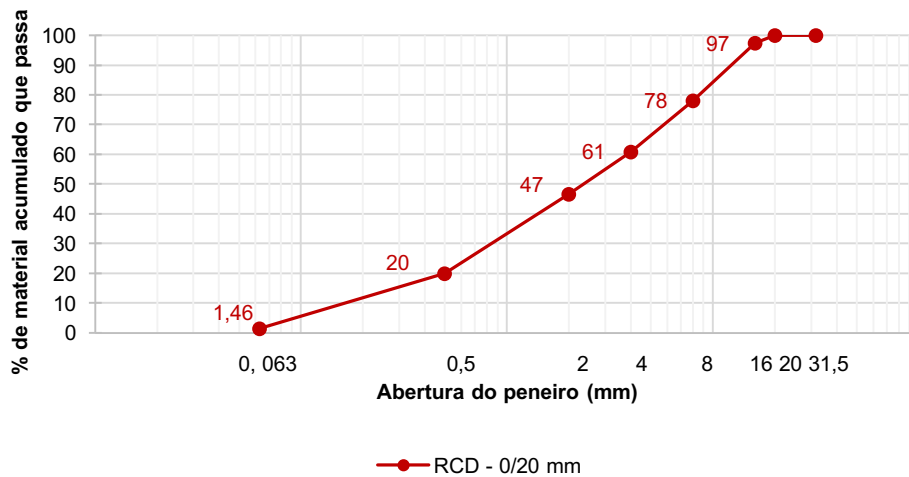


Figura 3.5 - Curva granulométrica do RCD

A curva granulométrica da MBT formulada, bem como as curvas correspondentes aos limites do fuso granulométrico especificado para misturas destinadas a camadas de base (Quadro 2.4 do subcapítulo 2.2.2 Agregados) estão representadas na Figura 3.6, da qual se conclui que, como desejado, o fuso granulométrico é respeitado.

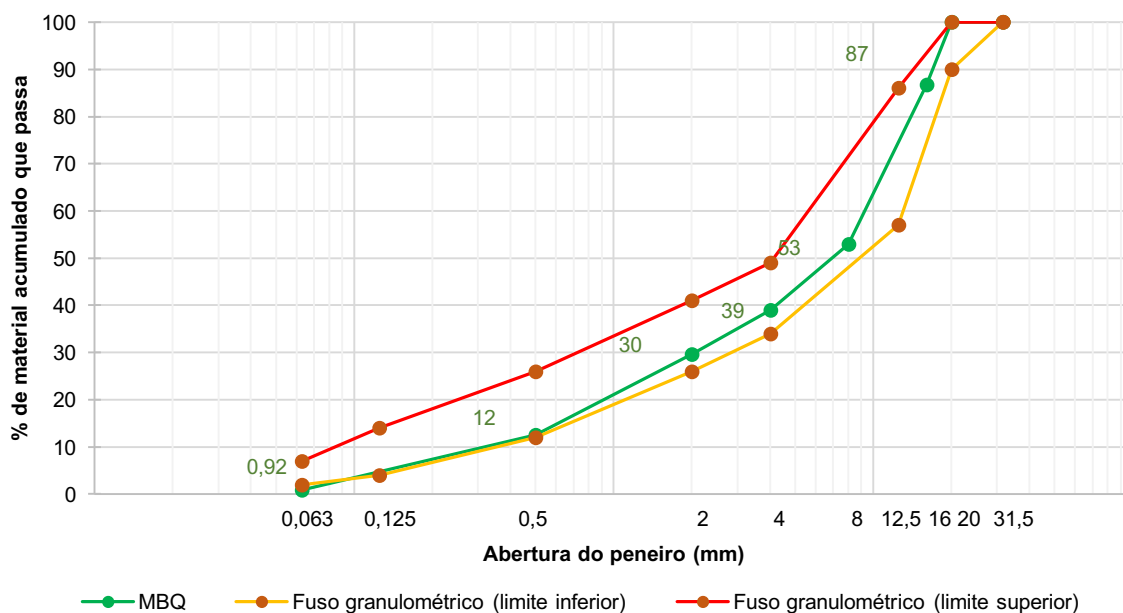


Figura 3.6 - Curva granulométrica da MBT

3.3. Afinidade ligante-agregado

O procedimento para determinação da afinidade entre o agregado e o betume, bem como a sua influência na desagregação da mistura betuminosa, seguiu a EN 12697-11 (CEN, 2012b).

Segundo esta norma, a afinidade entre o agregado e o betume define-se como o grau de cobertura de betume determinado visualmente em partículas não compactadas de agregado revestido após agitação mecânica, na presença de água. O grau de cobertura de betume é apresentado como a percentagem média da área das superfícies de agregado que são cobertas com betume (CEN, 2012b).

A descolagem do betume a partir dos agregados é consequência da intrusão da água no sistema composto pelo betume e pelos agregados. Os tipos de rotura dependem do carácter do sistema anterior, e podem ser um dos seguintes (Silva et al., 2002):

- Separação da ligação na interface entre o betume e os agregados.
- Rotura no betume quando os seus componentes solúveis são removidos.
- Falha coesiva nos agregados.
- Separação de fase dos componentes, quando a presença de água aumenta a solubilidade dos componentes polares através de ligações de hidrogénio.

A suscetibilidade de desagregação, determinada por este processo, mostra-se como uma medida indireta da adesividade do ligante aos agregados, e pode ser usado para avaliar o efeito da humidade sobre a combinação ligante-agregado com ou sem agentes de adesão (CEN, 2012b).

Para o trabalho experimental, foi utilizado o método da garrafa giratória, segundo o seguinte procedimento:

- O agregado começou por ser peneirado e separado aquele que passou no peneiro 11,2 mm e retido no peneiro de 8 mm. Resultou desta separação uma fração 8/11 mm com uma massa de 510 g, que foi lavada no peneiro de 8 mm e colocada na estufa, à temperatura de 110 °C até atingir uma massa constante.
- Para esta fração foram utilizadas 16 g de betume, que à semelhança do agregado foram aquecidos à temperatura da mistura de 125 °C.
- Procedeu-se à mistura de forma a que a superfície do agregado ficasse completamente revestida de betume, como apresentado na Figura 3.7 e na Figura 3.8.



Figura 3.7 - Agregado calcário após a mistura



Figura 3.8 - Agregado reciclado após a mistura

- O agregado revestido por betume foi distribuído sobre uma placa metálica e armazenado à temperatura ambiente durante a noite.

- Após dividido em três amostras de 150 g, cada uma foi transferida para uma garrafa, com aproximadamente 50% do seu volume cheio de água destilada a uma temperatura de 5 °C, que é selada e colocada numa máquina de rotação, como representado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Máquina de rotação para ensaio de afinidade ligante-agregado

- As garrafas foram sujeitas a rotação, à temperatura ambiente, segundo uma velocidade de rotação de 60 rotações/min, uma vez que se trata de um betume com penetração a 25 °C menor ou igual a 100 1/10 mm.
- Após o término do processo na máquina de rotação, as partículas de agregado foram inseridas num recipiente, que foi cheio com água destilada de modo a permitir uma visualização adequada do grau de cobertura das partículas.
- Foi avaliado visualmente, por dois operadores, o grau de cobertura de betume sobre as partículas de agregado (Anexo B), tendo como referência a representação da Figura 3.10, para 6 h, 24 h, 48 h e 72 h de rolamento.

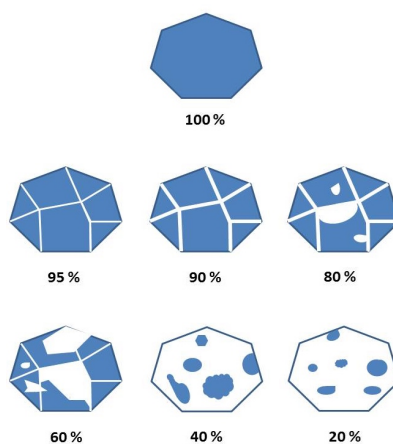


Figura 3.10 - Referência para a estimativa do grau de cobertura betume sobre o agregado (GEN, 2012b)

O grau de cobertura de betume sobre as partículas de agregado, para cada tempo de enrolamento, resulta da média dos resultados de cada observador, cujos valores resultam da média dos valores obtidos para cada uma das três garrafas ensaiadas.

3.4. Fabrico de misturas e moldagem de provetes cilíndricos

3.4.1. Fabrico da mistura betuminosa em laboratório

Para o fabrico da mistura betuminosa seguiu-se a EN 12697-35 (CEN, 2016) e usou-se como equipamento principal:

- Misturadora automática, equipada com aquecimento com controlo de velocidade.
- Recipiente metálico para efetuar a mistura.
- Placa elétrica controlada por termostato.
- Estufa, para aquecimento dos agregados e do betume.
- Balança.

Em relação ao procedimento começou-se por pesar as diversas frações dos agregados a utilizar em cada provete, representadas na Figura 3.11. As quantidades de cada fração foram calculadas tendo em conta que a massa de cada provete cilíndrico corresponderia a cerca de 1,2 kg e cada laje 14 kg para uma espessura de 50 mm.



Figura 3.11 – Agregados de RCD divididos por granulometria, para um provete cilíndrico

Seguidamente, os agregados e o betume foram colocados na estufa até atingirem a temperatura alvo de 125 °C, durante 4 h e 8 h respetivamente, que depois foram inseridos num recipiente metálico previamente aquecido. Adicionou-se o ligante, na proporção de massa correta relativamente a cada provete, que foi controlada através da pesagem do conjunto. Finalmente efetuou-se a mistura, sem exceder os 3 min, até ao ponto em que o ligante revestiu completamente o agregado, como representado na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Fabrico da mistura betuminosa

3.4.2. Moldagem de provetes cilíndricos

Para a moldagem dos provetes cilíndricos foi seguida a norma EN 12697-30 (CEN, 2012e). Como equipamento principal foi utilizado:

- Compactador de impacto com bigorna de aço e pedestal de madeira.
- Moldes de compactação com um diâmetro interno de 101,6 mm, constituído por uma alonga, um cilindro de molde e uma base de molde.
- Placa para aquecimento do pilão de compactação.
- Dispositivo de extrusão.
- Termómetro de infravermelhos.

Antes de proceder à compactação, começou-se por garantir que a mistura atingia a temperatura de compactação. Como se trata de uma mistura produzida com betume de pavimentação que cumpre a norma EN 12591 (CEN, 2009a), a temperatura de compactação foi a temperatura indicada na ficha técnica do betume, constante do Anexo A, correspondente a 120 °C.

Aqueceu-se a base do pilão de compactação e o molde todo antes da preparação de cada provete. Colocou-se o disco em papel de filtro na base do molde já montado e de seguida a mistura aquecida, com o cuidado de evitar a sua segregação. Por fim, cobriu-se a mistura com outro disco de papel de filtro.

De modo a proceder à compactação da mistura foram aplicadas 75 pancadas em cada uma das faces do provete, através do compactador de impacto representado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Compactador de impacto com bigorna de aço e pedestal de madeira

Em seguida, os provetes foram arrefecidos à temperatura ambiente, até atingirem uma temperatura de cerca de 40 °C, e desmoldados com o auxílio de um equipamento de extrusão equipado com um macaco hidráulico. Os provetes estão representados na Figura 3.14.

Por último, cada provete foi sujeito a quatro medições em altura (mm), h_1 , h_2 , h_3 e h_4 , e a respetiva média, $h_{\text{média}}$, de modo a, caso necessário, excluir os provetes cuja altura não cumprisse o intervalo $(63,5 \pm 2,5)$ mm, como representado na Figura 3.15.

A medição de cada um dos provetes cumpriu o critério de altura $(63,5 \pm 2,5)$ mm.

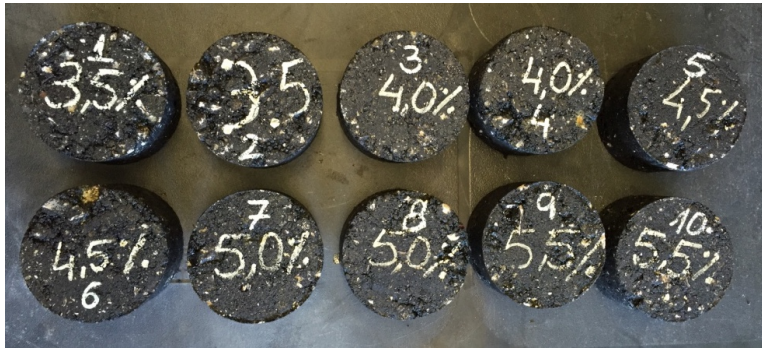


Figura 3.14 - Provetes de MBT desmoldados

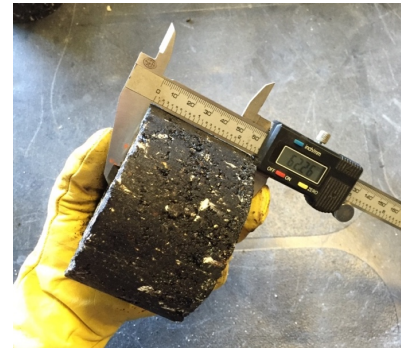


Figura 3.15 - Medição da altura dos provetes

3.5. Baridades

Para a determinação da baridade dos provetes foi seguida a EN 12697-6 (CEN, 2012a).

A partir da massa do provete e do seu volume determina-se a baridade de um provete betuminoso intacto.

Como método de ensaio, dos quatro descritos na norma, seguiu-se o do provete saturado com a superfície seca, *Saturated Surface Dry* (SSD), (para provetes com uma superfície fechada)", escolha que foi feita em função do volume de vazios estimado e da sua acessibilidade no provete.

Em termos de aparelhos e utensílios utilizou-se:

- Balança, adequada à pesagem do provete ao ar e imerso em água, com o auxílio de um cesto metálico, cuja massa e deslocação da água são consideradas através de taragem.
- Banho de água, com circulação de água em torno dos provetes e capacidade de mais de três vezes o volume de cada provete.
- Termómetro de infravermelhos.
- Camurça para secagem e limpeza das faces dos provetes, suficientemente humedecida de modo a assegurar que a humidade da superfície do provete é retirada sem eliminar a humidade existente nos vazios internos.

De acordo com o método utilizado seguiu-se o seguinte procedimento:

- a) Determinou-se a massa do provete seco, m_{seco} .
- b) Determinou-se a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, ρ_w .
- c) Colocou-se o provete no banho de água de modo a saturá-lo, a uma temperatura de 60 °C, durante 30 min, tempo suficiente para a massa do provete não sofrer alteração.
- d) Determinou-se a massa do provete quando imerso, m_{imerso} .
- e) Removeu-se o provete da água e secou-se as gotas da superfície com a camurça húmida.
- f) Determinou-se a massa do provete saturado com a superfície seca imediatamente após a secagem, m_{ssd} , através de pesagem ao ar.

A baridade SSD do provete, ρ_{bssd} , é calculada através da Equação (3.1):

$$\rho_{bssd} = \frac{m_{seco}}{m_{ssd} - m_{imerso}} \rho_w \quad (3.1)$$

em que:

- ρ_{bssd} é a baridade do provete, no método SSD (kg/m^3), com aproximação a 1 kg/m^3 ;
- m_{seco} é a massa do provete seco (g);
- m_{imerso} é a massa do provete imerso na água (g);
- m_{ssd} é a massa do provete saturado com superfície seca (g);
- ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m^3), com aproximação a $0,1 \text{ kg/m}^3$.

Para a determinação da baridade máxima teórica dos provetes foi seguida a norma EN 12697-5 (CEN, 2009b). Segundo esta norma, a baridade máxima teórica, ρ_{mv} , define-se como a massa por unidade de volume de uma mistura betuminosa, sem vazios, a uma determinada temperatura conhecida.

Dos três métodos normativos descritos, usou-se o método volumétrico, no qual o volume da amostra é medido com o auxílio de um picnómetro.

A baridade máxima teórica, em conjunto com a baridade aparente (massa por unidade de volume de uma determinada amostra, com vazios, a uma temperatura conhecida), é usada para calcular o índice de vazios de uma amostra, bem como outras propriedades volumétricas das misturas betuminosas compactadas.

No método volumétrico a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa é determinada através do volume da amostra sem vazios e através da massa da amostra seca.

Em termos de aparelhos e utensílios foram utilizados:

- Balança.
- Termómetro digital.
- Picnómetro.
- Sistema de vácuo.
- Agitador.

Em relação ao procedimento seguiram-se os passos descritos na norma:

- a) O picnómetro já se encontrava calibrado de modo a determinar o seu volume, V_p , em função da temperatura a que se encontrava a água. Esta calibração garantiu que os ensaios se pudessem efetuar a diferentes temperaturas da água.

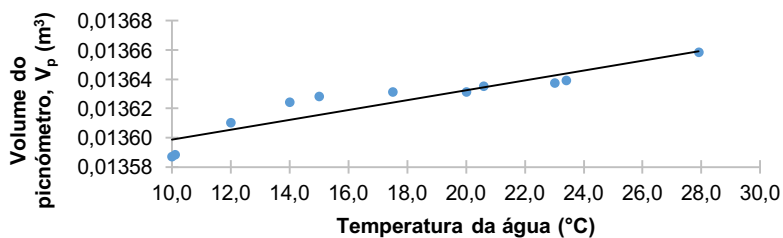


Figura 3.16 - Resultado da calibração do picnómetro

- b) Através da pesagem determinou-se a massa do picnómetro vazio incluindo a tampa, m_{p+t} .
- c) Colocou-se a amostra seca dentro do picnómetro, deixando atingir a temperatura ambiente, e de seguida fez-se nova pesagem para determinar a massa do picnómetro contendo a amostra e com tampa, m_{p+t+a} .
- d) Encheu-se o picnómetro com água, até um máximo de 30 mm abaixo do topo do picnómetro.
- e) Removeu-se o ar, aplicando vácuo parcial com uma pressão residual de 4 kPa durante 15 min, como representado na Figura 3.17. Como a remoção do ar existente nos poros acessíveis é importante, esta foi auxiliada pelo agitador.



Figura 3.17 - Aplicação de vácuo ao picnómetro no ensaio da baridade máxima teórica (método volumétrico)

- f) Adicionou-se mais água ao picnómetro, com o cuidado de não introduzir ar, enchendo até à marca de referência situada na tampa.
- g) Pesou-se o conjunto de modo a determinar a sua massa, m_{total} .
- h) Por último, mediu-se a temperatura da água contida no picnómetro.

A baridade máxima teórica, ρ_{mv} , da mistura betuminosa é calculada através da Equação (3.2):

$$\rho_{mv} = \frac{m_{p+t+a} - m_{p+t}}{1000 V_p - (m_{total} - m_{p+t+a})/\rho_w} \quad (3.2)$$

em que:

ρ_{mv} é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada pelo método volumétrico (kg/m^3), com aproximação a 1 kg/m^3 ;

m_{p+t} é a massa do picnómetro juntamente com a tampa (g);

m_{p+t+a} é a massa do picnómetro juntamente com a tampa e a amostra (g);

m_{total} é a massa do picnómetro juntamente com a tampa, a amostra e a água (g);

V_p é o volume do picnómetro, com água até à marca de referência (m^3), em função da temperatura da água;

ρ_w é a densidade da água à temperatura de ensaio (kg/m^3), com aproximação a $0,1 \text{ kg/m}^3$, em função da sua temperatura.

3.6. Características volumétricas

Para a determinação da porosidade e do VMA da mistura betuminosa, seguiu-se a EN 12697-8 (CEN, 2003a), que indica que estes valores das características volumétricas devem ser calculados com base na baridade máxima teórica, determinada segundo o método volumétrico da EN 12697-5, e na baridade, determinada segundo o método do provete SSD da EN 12697-6.

A norma define que a porosidade, V_m , representa o volume de ar retido entre as partículas de agregado e betume de uma mistura betuminosa compactada, expresso como uma percentagem do volume total da mistura (CEN, 2003a), e calcula-se através da Equação (3.3):

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_{bssd}}{\rho_{mv}} (\times 100\%) \quad (3.3)$$

em que:

V_m é a porosidade da mistura betuminosa (%), com aproximação a 0,1%;

ρ_{mv} é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada pelo método volumétrico (kg/m^3), com aproximação a 1 kg/m^3 ;

ρ_{bssd} é a baridade do provete, no método SSD (kg/m^3), com aproximação a 1 kg/m^3 .

O VMA representa o volume de vazios intergranulares entre as partículas de agregado de uma mistura betuminosa compactada, que inclui a porosidade e o volume de betume efetivo da mistura, expresso como uma percentagem do volume total da mistura (CEN, 2003a), e calcula-se através da Equação (3.4):

$$\text{VMA} = V_m + B \times \frac{\rho_{bssd}}{\rho_B} \quad (3.4)$$

em que:

VMA é a percentagem dos vazios na mistura betuminosa (%), com aproximação a 0,1%;

V_m é a porosidade da mistura betuminosa (%), com aproximação a 0,1%;

B é a percentagem de betume do provete (%), com aproximação a 0,1%;

ρ_{bssd} é a baridade do provete, no método SSD (kg/m^3), com aproximação a 1 kg/m^3 ;

ρ_B é a densidade do betume (kg/m^3), igual a 1030 kg/m^3 .

3.7. Ensaio Marshall

O procedimento experimental relativo ao Ensaio de Marshall seguiu a norma EN 12697-34 (CEN, 2012f).

Este ensaio tem como objetivo determinar a estabilidade, a deformação e o quociente Marshall dos provetes em estudo.

A estabilidade Marshall, S, define-se como a “resistência máxima à deformação, em kilonewton (kN), de um provete moldado de mistura betuminosa”, com aproximação a 0,1 kN (CEN, 2012f).

A deformação Marshall, F, representa a “deformação do provete moldado, em milímetro (mm), igual à diferença entre a deformação correspondente à carga máxima e a deformação nominal

correspondente ao ponto de interseção do prolongamento da tangente com o eixo das abcissas”, com aproximação a 0,1 mm, (distância entre A e M’ na Figura 3.18) (CEN, 2012f).

A deformação tangencial Marshall, F_t , representa a “deformação do provete moldado, em milímetro (mm), igual à diferença entre a deformação nominal correspondente ao ponto de interseção do prolongamento da tangente com a reta horizontal que corresponde à estabilidade máxima (S) e a deformação nominal correspondente ao ponto de interseção do prolongamento da tangente com o eixo das abcissas”, com aproximação a 0,1 mm (distancia entre A e B’ da figura X) (CEN, 2012f).

O quociente Marshall é o “quociente entre a estabilidade, S, e a deformação, F, S/F” (CEN, 2012f).

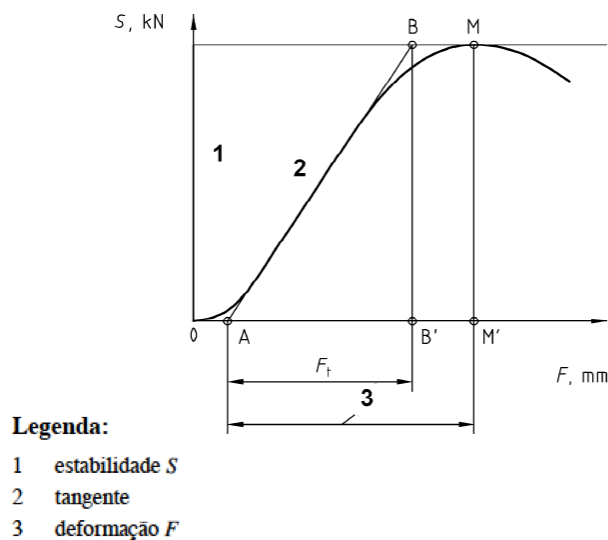


Figura 3.18 - Representação da estabilidade, S , da deformação, F , e da deformação tangencial, F_t (CEN, 2012f)

Para a realização do ensaio utilizaram-se os seguintes meios:

- Prensa com capacidade de 50 kN e capaz de aplicar a carga aos provetes a uma velocidade de deformação de 50 mm/min após um período de transição inferior a 20% do tempo de ensaio.
- Dispositivo de medição da deformação.
- Plotter gráfica para avaliação da curva carga/deformação.
- Estabilómetro.
- Banho de água com capacidade de manter a temperatura constante de 60 °C e com circulação contínua de água.
- Estufa.

O ensaio de cada provete cilíndrico seguiu o seguinte procedimento:

- a) Mergulhou-se no banho de água, entre 40 a 60 min, a uma temperatura de 60 °C.
- b) Aqueceu-se o estabilómetro no banho de água, durante 30 min, à temperatura de 60 °C.
- c) Colocou-se o provete no estabilómetro, centrado transversalmente, de forma a assegurar um bom contacto entre as superfícies do provete e do estabilómetro.

- d) Aplicou-se a carga ao provete de modo a atingir uma velocidade de deformação constante de 50 mm/min, durante o período de transição, até se obter a leitura máxima.

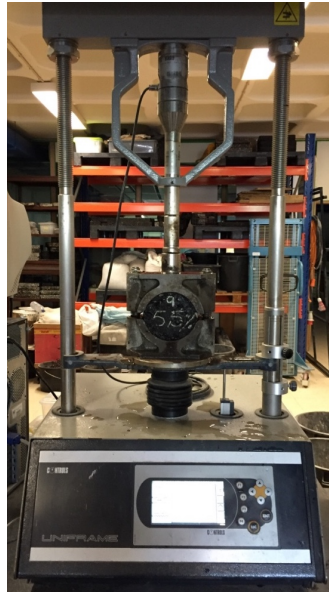


Figura 3.19 - Provete na prensa para ensaio Marshall

Nos casos em que a altura do provete é igual a 63,5 mm a carga máxima corresponde à estabilidade da mistura. Para outros valores da altura do provete, mas dentro da tolerância de $\pm 2,5$ mm, a estabilidade é corrigida multiplicando a carga máxima pelo fator de correção. Este fator é calculado através da Equação (3.5):

$$c = 5,24e^{-0,0258h} \quad (3.5)$$

em que:

- c é o fator de correção;
- h é a altura do provete (mm).

3.8. Moldagem de lajes

A moldagem de lajes e vigas seguiu o especificado na norma EN 12697-33 (CEN, 2003d) que define os métodos de compactação de placas com misturas betuminosas, para serem usadas em ensaios, ou a partir das quais se obtêm as vigas.

A preparação da mistura betuminosa seguiu a norma EN 12697-35. A sua produção começou pela compactação num molde retangular e por meio de um rolo de aço de rasto liso, sob ação de uma carga vertical. A passagem do rolo sobre a mistura betuminosa foi feita a uma velocidade constante.

Os meios utilizados para a moldagem e corte das lajes foram os seguintes:

- Molde metálico.
- Serra de corte com disco diamantado.

- Dispositivo para compactar a mistura, que simula a operação de um compactador de rolos estático, e que permitiu a aplicação de uma carga estática, F , dada pela Equação (3.6):

$$\frac{F_r}{l \cdot 2D} \geq 10^{-5} \quad (3.6)$$

em que:

- F é a carga aplicada sobre o rolo (kN);
- l é a largura interior do molde (mm);
- D é o diâmetro do rolo (mm).

O valor da carga, F , aplicada deve ser tal que o volume previamente definido é alcançado entre as 10 e 50 passagens do rolo.

A massa, M , da mistura betuminosa a introduzir no molde é dada pela Equação (3.7):

$$M = 10^{-6} \cdot L \cdot l \cdot e \cdot \rho_{mv} \cdot \left(\frac{100 - v}{100} \right) \quad (3.7)$$

em que:

- M é a massa de laje (kg);
- L é o comprimento interior do molde (mm);
- l é a largura interior do molde (mm);
- e é a espessura final da laje (mm);
- ρ_{mv} é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m^3);
- v é a porosidade na laje (%).

Introduziu-se no molde a mistura betuminosa e precedeu-se à sua compactação, representada na Figura 3.20, com o rolo de aço de rasto liso, a uma temperatura de 120 °C, originando assim uma laje como representado na Figura 3.21.



Figura 3.20 - Compactador de lajes



Figura 3.21 - Laje após compactação

3.9. Sensibilidade à água

A água é uma das principais causas da deterioração prematura dos pavimentos, uma vez que provoca ou acelera os tipos de degradação já mencionados. Esta degradação causada pela água está relacionada com dois mecanismos: a falha de adesão e a falha de coesão (Gubler et al., 2005).

A adesão é uma propriedade física que se define como a força molecular de atração através da qual um corpo se liga a outro de natureza diferente. A falha de adesão ocorre quando a água penetra na interface do ligante betuminoso com o agregado, quebrando assim a sua ligação.

A coesão é uma propriedade física definida como uma força de atração intermolecular através da qual uma única substância, como por exemplo o ligante betuminoso, se mantém unida. A falha de coesão está associada a uma redução da rigidez e resistência da mistura betuminosa (Gubler et al., 2005).

Para a realização do ensaio de sensibilidade à água seguiu-se o procedimento normativo constante da EN 12697-12 (CEN, 2008) e da EN 12697-23 (CEN, 2003c).

A sensibilidade à água, expressa como o valor da razão de resistência à tração indireta (*Indirect Tensile Strength Ratio*), ITS_R, obtido para as amostras das misturas betuminosas, é definida como a relação de resistência à tração indireta e calculada como a razão entre a resistência à tração de uma amostra molhada e uma amostra seca, expressa em percentagem.

O ensaio começou pela preparação de provetes cilíndricos para cada percentagem de betume estudada, 3,7% e 4,5%. O fabrico dos provetes seguiu o método anteriormente enunciado no subcapítulo 3.4 *Fabrico de misturas e moldagem de provetes cilíndricos*, com a única exceção de terem sido aplicadas 50 pancadas, ao invés das 75 pancadas, para a compactação da mistura. Apesar de o CETO indicar o valor de 75 pancadas, uma vez que os valores resultantes do ensaio de sensibilidade à água não terem de cumprir limites especificados, tendo apenas terem de ser declarados aquando da caracterização da mistura betuminosa, foi decidido seguir a norma internacional EN 12697-23 que indica o valor de 50 pancadas para a compactação dos provetes destinados a este ensaio.

Cada um dos quatro conjuntos de provetes foi dividido em dois subconjuntos, com a mesma duração média, densidade média, diferença de comprimentos médios sem exceder os 5 mm e diferença de densidades médias sem exceder os 30 kg/m³.

Os provetes pertencentes a um dos subconjuntos, designado por subconjunto seco, foram armazenados a uma temperatura de (20±5) °C.

Os provetes pertencentes ao outro subconjunto, designado por subconjunto molhado, foram colocados dentro de um picnómetro, sobre uma superfície perfurada. Após isto, encheu-se o picnómetro com água, à temperatura de (20±5) °C, até um nível situado a mais de 20 mm da superfície superior dos provetes, e aplicou-se vácuo até obter uma pressão (residual) absoluta de (6,7±0,3) kPa durante (10±1) min que se manteve durante (30±5) min. Findo isto, reduziu-se a pressão lentamente de forma a evitar danos por expansão dos provetes e mantiveram-se imersos por mais (30±5) min. De seguida, mediram-se as dimensões dos provetes com o objetivo de rejeitar os provetes que verificassem uma variação de 2% em volume. Finalmente, estes provetes foram colocados num banho de água a (40±1) °C durante 72 h.

Como última fase de preparação dos provetes para o ensaio, colocaram-se ambos os subconjuntos de provetes a uma temperatura de (15±2) °C durante 2 h.

Passada a fase de preparação e condicionamento dos provetes, estes foram submetidos ao ensaio de resistência à tração indireta, de acordo com o procedimento normativo constante da EN 12697-23 (CEN, 2003c).

O ensaio foi efetuado na prensa Marshall, através do estabilómetro representado na Figura 3.22, através do carregamento diametral dos provetes com uma velocidade de deslocamento constante e igual a (50 ± 2) mm/min, após um período de transição inferior a 20% do tempo de carregamento, ao longo da direção do eixo do cilindro, até à sua rotura.

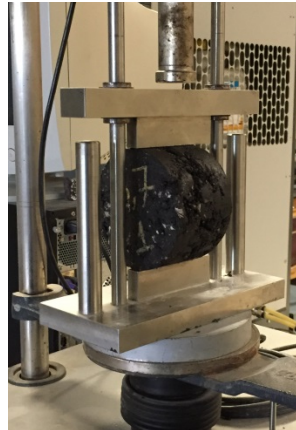


Figura 3.22 - Ensaio da resistência à tração indireta

Registou-se a carga máxima aplicada na rotura e o tipo de rotura que se caracteriza segundo os tipos a seguir enunciados e representados na Figura 3.23 (CEN, 2003c):

- a) Rotura clara – provete claramente quebrado ao longo de uma linha diametral, exceto em pequenas secções triangulares próximas das zonas de aplicação da carga.
- b) Deformação – provete sem uma linha de rotura clara e visível.
- c) Combinação – provete com uma linha limitada de rotura e com grandes áreas deformadas perto das zonas de aplicação da carga.

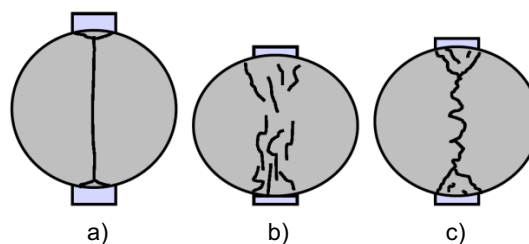


Figura 3.23 - Tipos de rotura dos provetes no ensaio de resistência à tração indireta

Por último, abriram-se os provetes pela linha de rotura, de modo a inspecionar visualmente a aparência das superfícies desta linha. Verificou-se se os agregados estavam maioritariamente partidos ou intactos.

Para cada um dos provetes foi calculada a resistência à tração indireta (*Indirect Tensile Strength*), ITS, através da Equação (3.8):

$$ITS = \frac{2 P}{\pi d_p h} \cdot 10^6 \quad (3.8)$$

em que:

- ITS é a resistência à tração indireta (kPa);
 P é a carga máxima (kN);
 d_p é o diâmetro do provete (mm);
 h é a altura do provete (mm).

Finalmente, através dos valores de ITS relativos aos provetes molhados e secos, calculou-se o ITSR, através da Equação (3.9):

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (3.9)$$

em que:

- ITSR é a razão da resistência à tração indireta (%);
 ITS_w é a resistência à tração indireta média do subconjunto molhado (kPa);
 ITS_d é a resistência à tração indireta média do subconjunto seco (kPa).

3.10. Resistência à deformação permanente

As deformações permanentes dos pavimentos resultam da aplicação repetida de cargas que provocam depressões longitudinais ao longo das rodeiras dos veículos, acompanhadas normalmente por elevações laterais (Pais et al., 2000).

Estas deformações são resultado da densificação (diminuição do volume à custa da redução do volume de vazios e rearranjo do esqueleto sólido) e das deformações por corte que ocorrem nas camadas do pavimento (Pais et al., 2000).

A determinação da resistência à deformação permanente seguiu o procedimento normativo que consta na EN 12697-22 (CEN, 2003b) que descreve o método experimental, do equipamento pequeno com procedimento A ao ar, para determinar a suscetibilidade para um material betuminoso deformar aquando carregado. Este método denomina-se por ensaio de pista (*Wheel-Tracking Test*), WTT, e mede a deformação através da profundidade da rodeira que se forma após passagens repetidas de uma roda carregada, a uma determinada temperatura constante.

Para este ensaio utilizou-se um equipamento que incluía:

- Roda com diâmetro externo de 200 mm, de pneu de borracha sólida, lisa e com perfil transversal retangular com espessura de 20 mm e largura de w mm onde $w=50$ mm.
- Mesa para fixação da amostra.
- Máquina *Wheel-Tracking* que permite a movimentação da amostra para a frente e para trás sob a roda carregada, ficando a roda fixa no plano horizontal. O centro da área de contacto do pneu descreve um movimento harmónico simples em relação ao centro da superfície superior da amostra, com uma distância total de 230 mm e uma frequência de 26,5 ciclos de carga por cada 60 s.
- Aro de aço com dimensões interiores de 300x400 mm².

- Dispositivo de medição da posição vertical da roda carregada.
- Termómetro para medição da temperatura de modo a garantir que a amostra se mantém à temperatura especificada.

A temperatura de ensaio foi, segundo a norma, de 60 °C.

A carga aplicada na roda foi de 700 N. Sob condições padrão de ensaio, a carga deve ser medida ao nível da parte superior da amostra e normal ao plano da mesa, e é dada pela Equação (3.10):

$$L_r = \left[\left(700 \frac{w}{50} \right) \pm 10 \right] N \quad (3.10)$$

em que:

- L_r é a carga aplicada na roda (kN);
- w é a largura do pneu (mm);
- N é o número de ciclos.

Após a medição da espessura das lajes e do cálculo das suas baridades, procedeu-se à aplicação da carga, através de passagens sucessivas da roda carregada, a uma temperatura de ensaio de 60 °C, como representado na Figura 3.24.

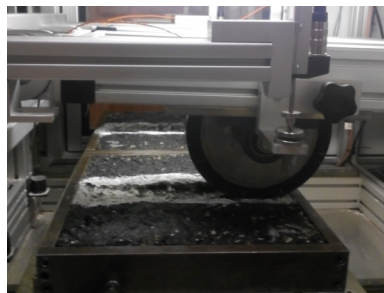


Figura 3.24 - Ensaio de deformação permanente, *Wheel Tracking*

O término do ensaio acontece no ciclo de carga 10 000 ou quando a profundidade da rodeira atinge os 20 mm.

A taxa de deformação média no ar (*wheel-tracking slope in air*), WTS_{AIR} , da amostra, em mm por 10^3 ciclos de carga, é calculada pela Equação (3.11):

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10\,000} - d_{5\,000})}{5} \quad (3.11)$$

em que:

- $d_{5\,000}$ é a profundidade da rodeira após 5 000 ciclos (mm);
- $d_{10\,000}$ é a profundidade da rodeira após 10 000 ciclos (mm);

Caso o ensaio termine antes dos 10 000 ciclos de carga, a taxa de deformação média deve ser calculada com base na parte linear da curva de profundidade da rodeira, desde que sejam atingidos pelo menos os 2 000 ciclos.

A média da percentagem da profundidade da rodeira, PRD_{AIR} , é a percentagem da profundidade da rodeira em N ciclos.

A média da profundidade da rodeira, RD_{AIR} , é a profundidade da rodeira atingida ao fim de N ciclos.

3.11. Módulo de rigidez

A rigidez de uma mistura betuminosa depende da temperatura e do tempo de carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos. Daqui pode definir-se uma rigidez elástica quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento e uma rigidez viscosa para altas temperaturas e longos tempos de carregamento (Pais et al., 2000).

A rigidez elástica, a que correspondem os valores mais elevados da rigidez, é utilizada para a caracterização da mistura betuminosa para dimensionamento enquanto que a rigidez viscosa é utilizada para a previsão das deformações permanentes. A rigidez elástica de uma mistura betuminosa é função da rigidez elástica do betume bem como da composição volumétrica da mistura betuminosa (Pais et al., 2000).

O módulo de rigidez foi determinado com base no procedimento descrito na norma EN 12697-26 (CEN, 2012d), que descreve o ensaio de flexão em quatro pontos, designado por 4PB (*Four Point Bending*). Este procedimento é usado para avaliar misturas betuminosas com base na rigidez, como guia para o desempenho no pavimento, obtendo dados para estimar o comportamento estrutural do pavimento e para avaliar os dados de ensaio de acordo com as especificações para as misturas betuminosas (CEN, 2012d).

O ensaio 4PB consiste na medição da resposta a cargas aplicadas segundo um espectro de frequências nominais. Cada provete prismático é submetido a uma flexão periódica de quatro pontos com rotação e translação (horizontal) livre em todos os pontos de carga e reação. A flexão é realizada pelo movimento dos pontos de carga centrais na direção perpendicular ao eixo longitudinal da amostra. O deslocamento periódico aplicado é sinusoidal e simétrico em relação ao zero, e a amplitude do deslocamento é constante em função do tempo. Os principais conceitos deste ensaio estão representados na Figura 3.25.

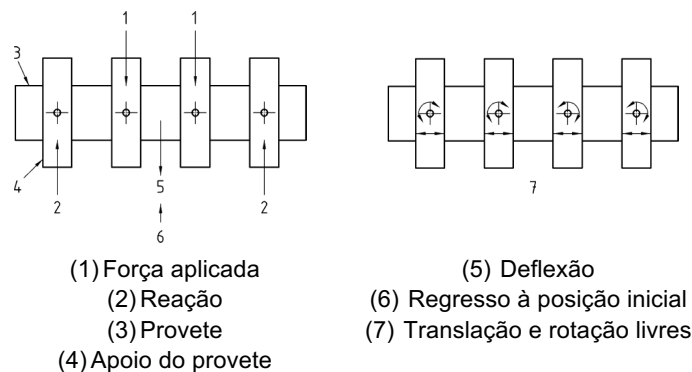


Figura 3.25 - Ensaio de flexão em quatro pontos (CEN, 2012d)

Não foram utilizadas gamas de frequências que ultrapassassem os 30 Hz de modo a não provocar a danificação dos provetes. Neste caso foram utilizadas as frequências de 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz e novamente 1 Hz. Esta repetição da frequência de 1 Hz teve como objetivo verificar se os provetes se encontravam danificados após a aplicação das cargas de frequência anteriores.

Os provetes utilizados para o ensaio tinham a forma de vigas prismáticas, resultantes do corte das lajes moldadas da forma referida anteriormente.

O número total de aplicações de carga não excedeu os 3000 ciclos de modo a prevenir danos prematuros por fadiga.

O carregamento foi realizado no modo de extensão constante, não excedendo a extensão imposta de 50 µm/m e realizados a uma temperatura de ensaio de 20 °C. Segundo a norma, estes valores impedem que os provetes se danifiquem.

Através deste ensaio foram obtidos os resultados correspondentes à força, tensão e ângulo de fase, medidos em cada ciclo de carregamento, que permitiram o cálculo do módulo de rigidez.

O módulo de rigidez, $|E^*|$, é definido como o valor absoluto do módulo complexo, E^* , ou o valor do módulo secante, $E(t)$.

O módulo complexo corresponde à relação entre a tensão e a extensão de um material visco elástico linear, submetido à aplicação de uma carga segundo uma onda sinusoidal, durante um intervalo de tempo, t , e com uma frequência 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 (3.12) e (3.13):

$$\sigma = \sigma_0 \times \text{sen}(\omega \times t) \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \text{sen}(\omega \times t - \phi) \quad (3.13)$$

Na Figura 3.26 pode observar-se que a extensão apresenta um desfasamento em relação à tensão que corresponde ao ângulo de fase, ϕ , e que a amplitude da extensão e ângulo de fase são função da frequência e da temperatura, θ .

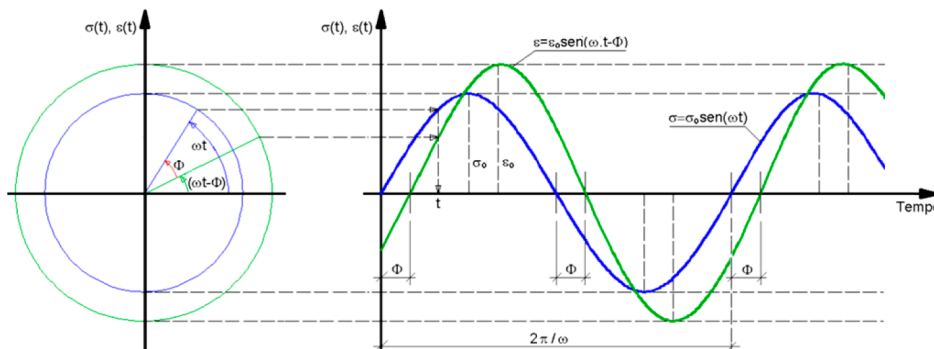


Figura 3.26 - Desfasamento entre a tensão e a extensão (Quintero, 2011 citado em Martinho, 2014)

O módulo complexo é assim calculado pela Equação Figura 3.14:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{\phi i} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \times [\cos(\phi) + \text{sen}(\phi)i] = |E^*| \times [\cos(\phi) + \text{sen}(\phi)i] \quad (3.14)$$

Este módulo complexo é caracterizado por um par de componentes, a componente real, E_1 e a componente imaginária, E_2 , representadas respetivamente pelas Equações (3.15) e (3.16):

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\phi) \quad (3.15)$$

$$E_2 = |E^*| \times \sin(\phi) \quad (3.16)$$

O valor absoluto do módulo complexo, $|E^*|$, e o ângulo de fase são calculados respetivamente pelas Equações (3.17) e (3.18):

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (3.17)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (3.18)$$

Em estruturas multicamada, com comportamento elástico linear, o ângulo de fase é baixo. Por essa razão é usual assumir que o módulo complexo é aproximado ao módulo de Young, E. Assim é assumido nesta dissertação.

O módulo secante, $E(t)$, representa a relação entre a tensão e a extensão no tempo de carga, t, para um material sujeito a cargas com extensão controlada. É calculado pela Equação (3.19):

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (3.19)$$

com a extensão calculada pela Equação (3.20):

$$\varepsilon(t) = \alpha_i \times t^n \quad (3.20)$$

em que:

α_i é uma constante;

n é uma constante;

t é o tempo de carregamento (s).

O tempo de carregamento relaciona-se com a frequência de aplicação de carga através da expressão apresentada na Equação (3.21):

$$t = \frac{1}{2\pi\omega} \quad (3.21)$$

A relação entre o tempo de carregamento e a velocidade média de circulação na corrente de tráfego, v, pode ser estimada pela Equação (3.22):

$$v = \frac{1}{t} \quad (3.22)$$

em que:

v é a velocidade média da circulação na corrente de tráfego (km/h).

Através destas últimas expressões foi verificado que a gama de frequências utilizada neste ensaio, de 1 Hz a 30 Hz, simulou a gama de velocidades de tráfego representada no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Tempo de carregamento e velocidade média da circulação na corrente de tráfego em função da frequência de aplicação da carga

Frequência, ω (Hz)	Tempo de carregamento, t (s)	Velocidade, v (km/h)
1	0,1592	6,3
30	0,0053	188,5

3.12. Resistência à fadiga

De modo a obter uma estrutura de pavimento resistente às ações previstas aplicadas, durante a vida de projeto, o dimensionamento de pavimentos utiliza as propriedades mecânicas dos materiais e o seu comportamento em serviço. A teoria da elasticidade aplicada a estruturas com várias camadas permite obter a resposta do pavimento às ações do tráfego e temperatura. Avaliada através das extensões previstas nos diversos materiais constituintes do pavimento, esta resposta é utilizada para prever a ruína do pavimento baseada em leis de fadiga obtidas em ensaios laboratoriais (Pais & Palha, 2010).

A resistência à fadiga das misturas betuminosas define-se como a capacidade que estas apresentam para resistir a esforços de flexão repetidos sem atingir a rotura. O fendilhamento por fadiga manifesta-se pelo aparecimento de fendas provocadas pelas cargas do tráfego e constitui um dos principais mecanismos de degradação dos pavimentos. Esta resistência é geralmente expressa como uma relação entre a tensão, ou extensão inicial, e o número de repetições de carga que produzem a ruína. Este número é determinado usando ensaios laboratoriais de flexão repetida, realizados a determinados níveis de tensão ou extensão (Pais & Palha, 2010).

A determinação da resistência à fadiga seguiu o procedimento constante na norma EN 12697-24 (CEN, 2012c), pelo ensaio de flexão em quatro pontos de vigas prismáticas, com a extensão controlada, e aplicação de um carregamento sinusoidal com diferentes frequências. Considera-se que a rotura do material acontece no instante em que a sua rigidez atingiu metade da rigidez inicial do material.

No ensaio, as vigas são sujeitas a uma flexão periódica nos quatro pontos com rotação e translação livres em todos os apoios (de carga e de reação). A flexão é conseguida pelo carregamento nos dois pontos de carga interiores, na direção vertical, perpendicular ao eixo longitudinal da viga.

Segundo a norma, a vida à fadiga, $N_{i,j,k}$, representa o número de ciclos no provete i , correspondente ao critério de rotura escolhido, j , no conjunto das condições de ensaio, k . O critério de rotura escolhido foi o de atingir 50% do módulo de rigidez inicial ou caso se verifique a rotura da viga. As condições de ensaio corresponderam a uma frequência de 10 Hz, uma temperatura de 20 °C e um modo de carga sinusoidal.

A carga aplicada, a extensão medida e o correspondente atraso de fase foram registados periodicamente ao longo do ensaio.

A média da vida à fadiga de uma série de provetes, $\bar{N}_{j,k}$, é o valor definido de acordo com o critério de rotura, j , numa série de, m , provetes nas condições de ensaio, k . É calculada pela expressão representada na Equação (3.23):

$$\bar{N}_{j,k} = \frac{e^{\sum_{i=1}^m \ln(N_{i,j,k})}}{m} \quad (3.23)$$

O desvio padrão da vida à fadiga de uma série de provetes, $S_{j,k}$, é o logaritmo natural da média da vida à fadiga para o critério de rotura, j , nas condições de ensaio, k . É calculado através da Equação (3.24):

$$S_{j,k} = \frac{1}{(m-1)} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m [\ln(N_{i,j,k}) - \ln(\bar{N}_{j,k})]^2} \quad (3.24)$$

Foram efetuadas 3 repetições em cada nível de extensão, correspondendo assim a nove provetes. O ensaio foi efetuado para os níveis de tensão correspondentes às extensões impostas de 200, 250 e 350 $\mu\text{m}/\text{m}$, com um nível de extensão constante.

Com base nos resultados obtidos, a reta de fadiga resulta da regressão linear entre os algarismos naturais de $N_{i,j,k}$ e os algarismos naturais da amplitude da extensão imposta, segundo a Equação (3.25) ou (3.26):

$$\varepsilon_i = aN_{i,j,k}^{-b} \quad (3.25)$$

$$\ln(N_{i,j,k}) = \frac{\ln(a)}{b} - \frac{1}{b} \ln(\varepsilon_i) \quad (3.26)$$

em que:

- i representa o número do provete;
- j representa o critério de rotura escolhido;
- k representa o conjunto das condições de ensaio;
- a é a ordenada na origem (para $N=1$, na escala logarítmica);
- b é o expoente do N da lei de fadiga (inverso do declive da reta de regressão);
- ε é a amplitude inicial da extensão, medida no 100º ciclo de carga (m);
- N é o número de ciclos.

Desta lei de fadiga resulta o parâmetro vida à fadiga, ε_6 , correspondente ao nível de extensão para 1 milhão de ciclos de carga, que serve para classificar o desempenho das misturas betuminosas quanto à resistência à fadiga.

A lei de fadiga obtida experimentalmente foi depois comparada com a estimativa proposta pela metodologia da empresa Shell, para as mesmas condições de ensaio de 20 °C de temperatura e 10 Hz de frequência. Esta estimativa foi calculada segundo a Equação (3.27) (Martinho, 2014):

$$\varepsilon = (0,856 \cdot V_b + 1,08) \times S_{\text{mix}}^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (3.27)$$

em que:

- ε é a amplitude da extensão ($\mu\text{m}/\text{m}$);
- V_b é a percentagem volumétrica de betume (%);
- S_{mix} é a rigidez da mistura (Pa);
- N é o número de ciclos.

Esta lei de fadiga da Shell foi desenvolvida para misturas fabricadas a quente, contudo a utilização como comparação deve-se ao facto de ser a lei de fadiga mais utilizada em Portugal (Martinho, 2014).

4. Resultados e discussão

4.1. Considerações iniciais

Ao longo da apresentação dos resultados, são feitas algumas comparações com outros estudos já efetuados por outros autores, e em especial pela comparação com algumas das amostras de MBT fabricadas por Martinho (2014), cujas composições são apresentadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Identificação das MBT M08, M09, M23 e M25 (Martinho, 2014)

Materiais	Designações	Fornecedores	Origens	Ref ^a	M08 (%)	M09 (%)	M23 (%)	M25 (%)	
Betume (em % da mistura)	Asfáltico	Cepsa	Espanha	35/50	4,5	4,5	4,5	4,5	
Agregados naturais (em % do agregado)	Brita 2	Calcário	Sobrisul	Sesimbra	10/20	33	33	2	2
	Brita 1	Calcário	Sobrisul	Sesimbra	4/10	5	5	5	5
	Pó	Calcário	Sobrisul	Sesimbra	0/4	2	2	33	33
Subprodutos	RCD	Resíduo de construção	Odebrecht	A33	0/20	60	60	-	-
			Ambisider	Seixal	0/20	-	-	60	60
Aditivos (% do ligante)	Orgânico	Sasobit	Sasol	África do Sul	-	4	-	-	3
	Químico	Rediset	Akso	Suécia	-	-	2	2	-

Para misturas M08 e M09 fabricadas na primeira fase do trabalho, procedeu-se a um estudo de formulação para as percentagens de 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5% de betume de modo a analisar essas mesmas percentagens e assim definir a composição da mistura a estudar nos ensaios de desempenho. Utilizaram RCD igual ao que se utilizou nesta dissertação, sendo por isso diretamente comparáveis. No entanto, de modo a poder fazer um estudo comparativo em relação aos ensaios de desempenho das misturas, optou-se por fazer também uma análise das misturas M23 e M25, fabricadas após a determinação da percentagem ótima de betume, correspondente a 4,5%, e formuladas com agregado de RCD de uma origem diferente.

4.2. Afinidade ligante-agregado

Apesar da afinidade ligante-agregado de ser uma propriedade referida no CETO (Estradas de Portugal, 2014a), este não faz nenhuma limitação nem apresenta nenhum valor de referência. Apenas refere que deve ser uma propriedade a declarar aquando da caracterização da mistura betuminosa.

As quantidades de material utilizadas no ensaio, agregado e betume, indicadas na norma seguida, EN 12697-11 (CEN, 2012b), correspondem a uma quantidade de 3% de betume.

Os resultados dos ensaios para determinação da afinidade entre o ligante e agregado, representados no Anexo B, são apresentados na Figura 4.1.

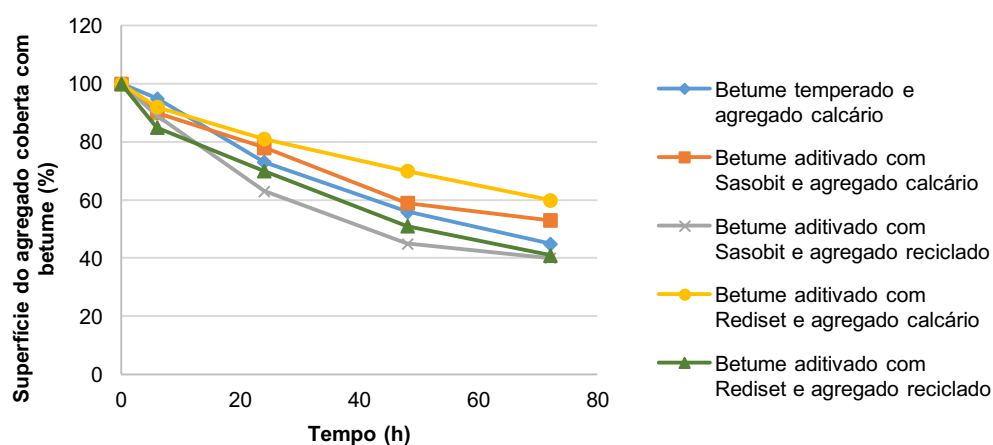


Figura 4.1 - Resultados do ensaio de afinidade ligante-agregado

Pela comparação dos ensaios efetuados ao mesmo tipo de agregado, o agregado natural, os resultados obtidos mostram que a introdução de modificantes na mistura, neste caso o Sasobit e o Rediset, conduziram a melhores resultados comparativamente com o betume temperado aditivado em fábrica.

Pela análise da totalidade dos ensaios, para os diferentes tipos de agregado e betume, os resultados apresentam pequenas diferenças de valores, e no final do ensaio todos apresentaram valores da percentagem da superfície do agregado coberta com betume de cerca de 50%. Apesar de os resultados dos ensaios que continham agregado reciclado apresentarem os menores valores dos da totalidade dos ensaios, esta diferença não é significativa, até porque os resultados resultam numa inspeção visual, que é bastante subjetiva.

A perda da ligação entre o betume e o agregado mostrou ser gradual e aproximadamente constante ao longo de todo o ensaio, aspeto que se mostra positivo visto não se verificar uma elevada perda da ligação logo nas primeiras horas do ensaio.

Conclui-se assim que ambos os tipos de agregado apresentam o mesmo comportamento em termos de afinidade com o ligante betuminoso.

4.3. Estudo Marshall

4.3.1. Características volumétricas

As baridades dos provetes produzidos com a MBT estão apresentadas na Figura 4.2. Como se pode verificar, as MBT conduzem a menores valores da baridade em comparação com as MBT de referência.

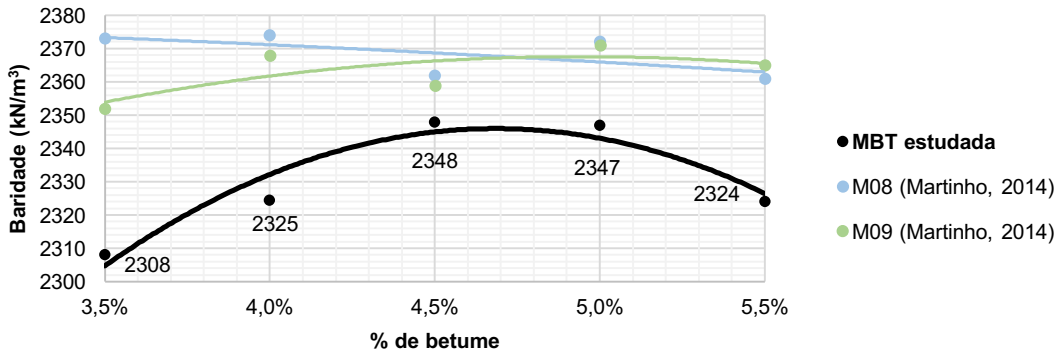


Figura 4.2 – Resultados da baridade

Os resultados referentes ao ensaio de determinação da baridade máxima teórica estão apresentados na Figura 4.3.

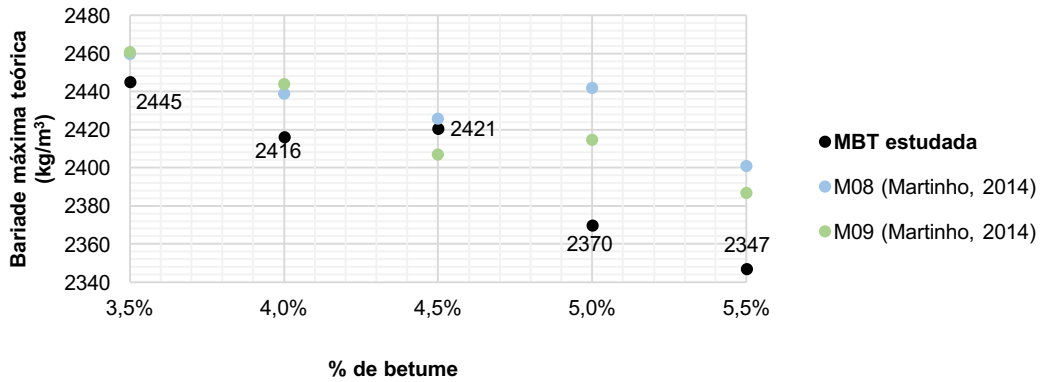


Figura 4.3 - Baridades máximas teóricas da MBT

Os valores da baridade máxima teórica das MBT mostram-se menores comparativamente aos das MBT de referência.

Os resultados da porosidade e VMA apresentam-se nas Figura 4.4 e Figura 4.5, respetivamente.

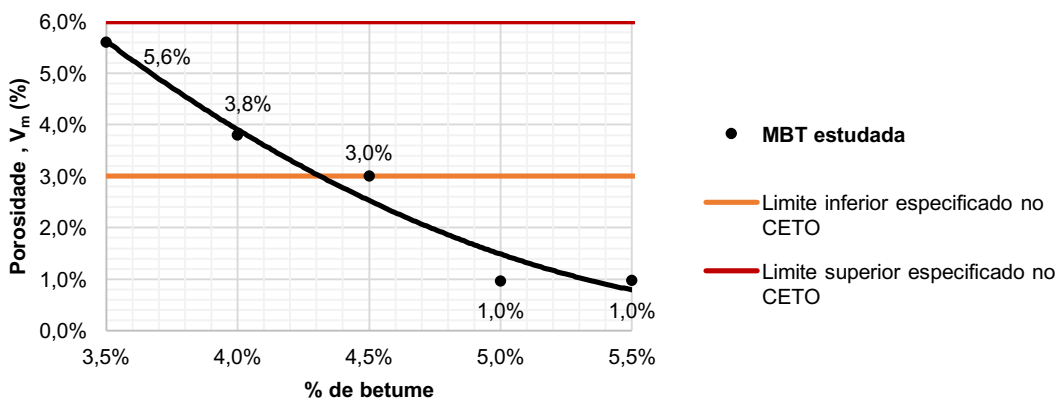


Figura 4.4 - Resultados da porosidade, V_m , da MBT

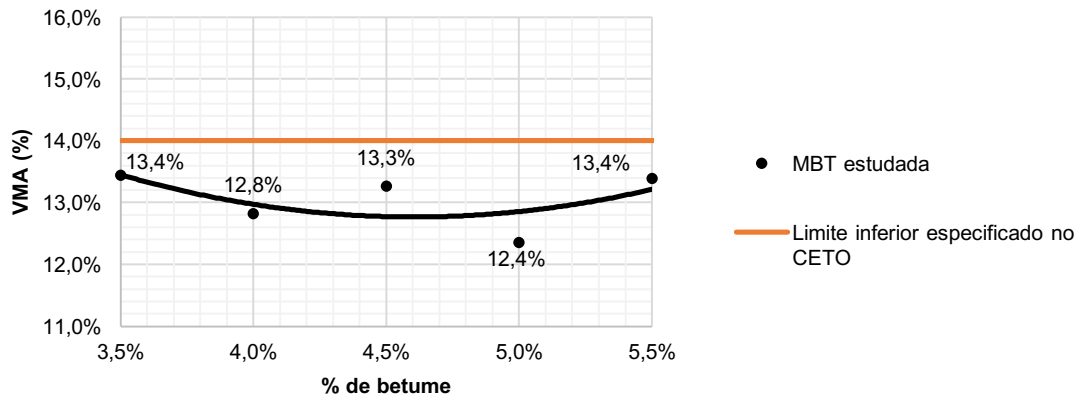


Figura 4.5 - Resultados do VMA da MBT

Em relação à porosidade, os resultados indicam que o aumento da quantidade de betume leva a uma diminuição da porosidade da mistura. Verifica-se que até valores de percentagem de betume de 4,5%, estas apresentam valores de porosidade dentro dos limites definidos pelo CETO, enquanto que maiores percentagens de betume originam valores de porosidade muito baixos e longe do limite mínimo de 3,0%.

Quanto ao VMA, os resultados obtidos não revelam nenhuma tendência. Para todos os valores de percentagem de betume, as misturas apresentam valores muito próximos e abaixo do limite mínimo definido pelo CETO.

4.3.2. Resistência e deformação

Os resultados do ensaio Marshall estão abaixo representados, com os respetivos valores da estabilidade Marshall na Figura 4.6, da deformação Marshall na Figura 4.7 e do quociente Marshall na Figura 4.8.

Estes valores foram obtidos com base nos dados referentes ao ensaio de cada um dos provetes, incluídos no Anexo C.

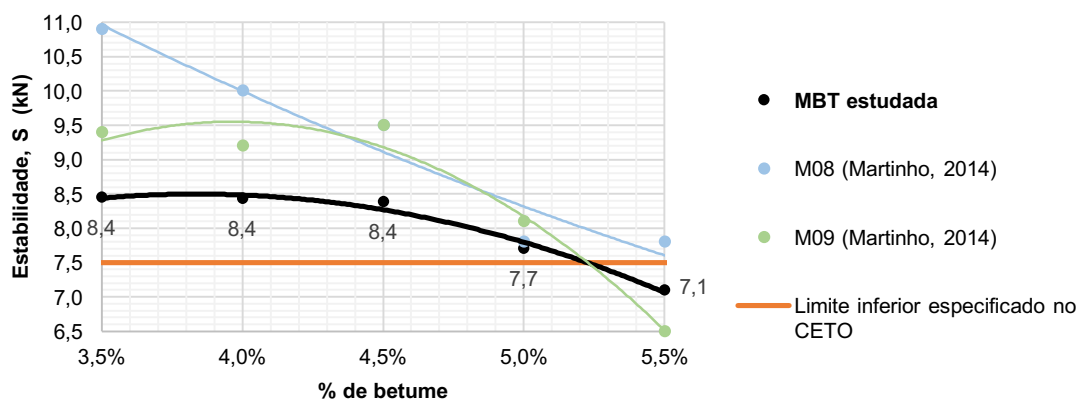


Figura 4.6 - Estabilidade Marshall, S

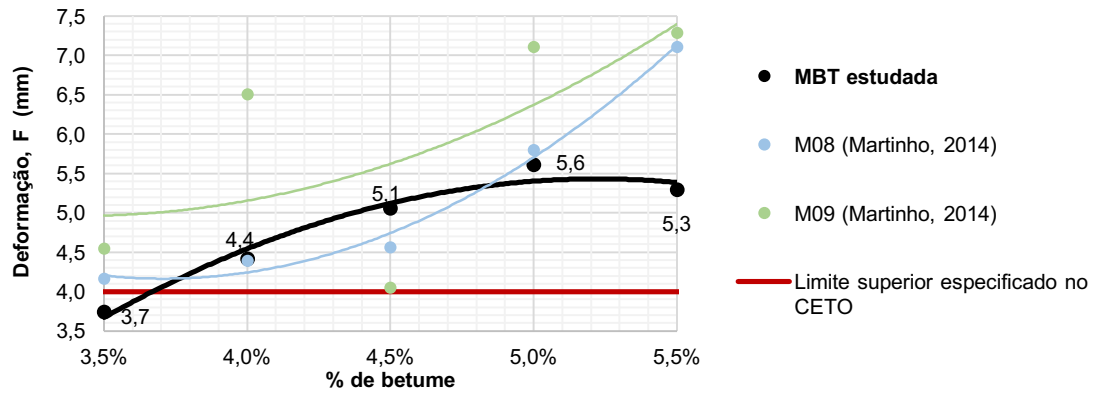


Figura 4.7 - Deformação Marshall, F

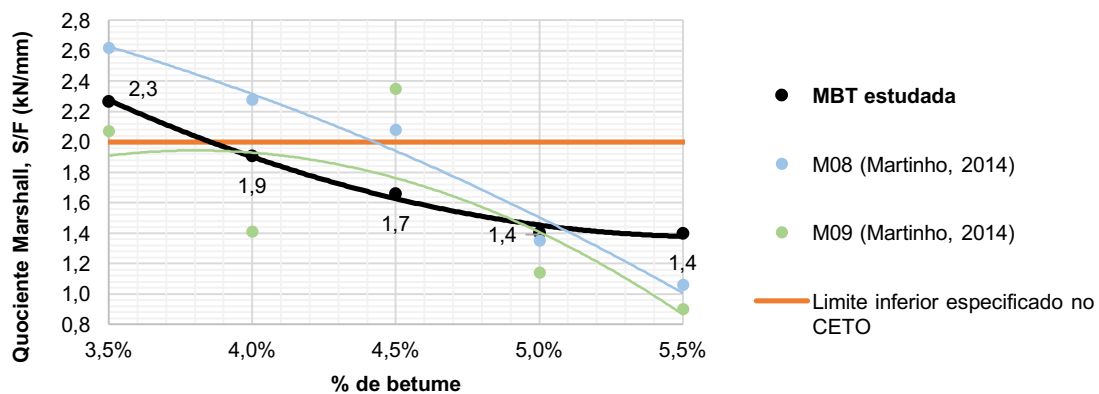


Figura 4.8 - Quociente Marshall, S/F

A partir dos dados obtidos após a formulação da mistura betuminosa, pela metodologia Marshall, é possível retirar algumas conclusões acerca do seu comportamento.

Verifica-se que menores valores da percentagem de betume dão origem a uma mistura com maior estabilidade, com conseqüente valor de deformação menor.

Relativamente à estabilidade, praticamente todas as misturas cumprem os limites especificados no CETO (Estradas de Portugal, 2014a), à exceção da mistura contendo 5,5% de betume que não cumpre o limite mínimo de estabilidade, $S_{\min} = 7,5$ kN.

Quanto à deformação, apenas a mistura com 3,5% de betume cumpre o limite máximo especificado, $F_{\max} = 4,0$ mm. Todas as misturas cumprem os limites máximo de estabilidade e mínimo de deformação especificados para estes parâmetros, $S_{\max} = 15,0$ kN e $F_{\min} = 2$ mm, respetivamente.

Em relação ao quociente Marshall, verifica-se que o aumento da percentagem de betume levou à diminuição dos valores deste quociente. Praticamente todas as misturas incumprem o limite mínimo especificado, $S/F_{\min} = 2$ kN/mm, à exceção da mistura com 3,5% de betume.

Conclui-se que, utilizando como critério o cumprimento dos valores especificados no CETO, teríamos de formular uma mistura com percentagem de betume entre os 3,5% e os 4,0%.

Relativamente à comparação do desempenho entre as MBT formuladas e as MBT de referência, os resultados não se mostram muito conclusivos uma vez que, apesar de as MBT formuladas apresentarem menores valores de estabilidade, estas apresentam também menores valores de deformação, à exceção do valor correspondente a 4,5% de betume que mostra ter uma deformação superior.

4.3.3. Percentagem ótima de betume

Para a avaliação da percentagem ótima de betume, importa reter os valores da percentagem de betume correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites da porosidade. O valor da percentagem ótima de betume corresponde à média destes valores.

Quadro 4.2 - Avaliação da percentagem ótima de betume

% betume	Estabilidade máxima	3,85
	Baridade máxima	4,70
	Valor médio dos limites da porosidade	3,90
% ótima de betume		4,15

O valor da percentagem ótima de betume encontrado, de 4,15%, corresponde a uma deformação de aproximadamente 4,75 mm e um VMA de 12,9%. Ambos os valores não se enquadram dentro dos limites especificados no CETO, de 4 mm de deformação máxima e 14,0% de VMA mínimo. Contudo, o não cumprimento destes valores, não implica que a mistura apresente um mau desempenho em serviço, já que esta especificação não foi elaborada para agregado do tipo reciclado.

Do estudo Marshall concluiu-se que não há um comportamento claro que satisfaça todos os requisitos. Foi para a percentagem de betume de 3,7% que se conseguiu estabelecer um equilíbrio no cumprimento de todas as propriedades, nomeadamente nas propriedades volumétricas. No entanto este valor de percentagem de betume é um valor muito baixo, prevendo-se ser um fator de comprometimento do desempenho da mistura betuminosa. Posto isto, também foi selecionada a quantidade de 4,5% de betume por corresponder aos maiores valores baridade e resistência. Optou-se, então, numa primeira fase por avançar para os ensaios paralelos de misturas formuladas com 3,7% e 4,5% de betume.

4.4. Ensaios de desempenho

4.4.1. Sensibilidade à água

Os ensaios foram iniciados com a verificação da sensibilidade à água dos provetes com 3,7% e 4,5% de betume.

De modo a obter um termo de comparação, fabricaram-se provetes constituídos por 4,5% de betume temperado e agregado unicamente de origem natural. As características da totalidade dos provetes apresentam-se no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Características dos provetes de MBT para o ensaio de sensibilidade à água

Agregado	% de betume	Provete	Dimensões			Massas			Temp. da água (°C)	Absorção de água (%)	Baridade ρ_{bssd} (kg/m ³)
			Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (mm ³)	Seca (g)	Imersa (g)	SSD (g)			
Natural e Reciclado	3,7%	1	101,5	64,6	523026,0	1186,0	683,0	11911,8	21,5	0,48	2326
		2	101,6	65,3	529489,0	1196,0	689,0	1205,3	21,5	0,77	2312
		3	101,5	64,9	524806,1	1188,0	685,8	1195,4	21,5	0,61	2327
		4	101,5	65,6	530672,4	1192,0	685,5	1200,4	21,5	0,70	2310
	4,5%	5	101,8	65,5	532715,2	1217,8	696,7	1225,4	21,5	0,62	2299
		6	101,6	65,7	532732,0	1201,0	688,0	1206,6	21,5	0,46	2311
		7	101,8	63,4	515842,6	1156,6	667,0	1161,6	21,5	0,43	2334
		8	101,7	66,8	542432,5	1222,0	699,2	1229,9	21,5	0,64	2298
		9	101,7	65,1	529069,7	1207,0	693,0	1210,4	21,5	0,28	2328
		10	101,7	64,1	520595,9	1196,5	692,5	1197,3	21,5	0,07	2365
Natural	4,5%	11	102,0	65,2	533034,5	1185,3	666,8	1186,1	21,5	0,07	2278
		12	102,1	65,8	538797,3	1200,3	679,0	1206,0	21,5	0,48	2273
		13	101,6	65,7	532674,7	1199,0	683,0	1205,2	21,5	0,51	2291
		14	102,0	65,8	537056,5	1188,5	674,0	1195,8	21,5	0,61	2273

A divisão dos provetes nos subconjuntos molhado e seco efetuou-se de modo a que a diferença nas alturas médias não excedesse 5 mm e a diferença das densidades médias fosse inferior a 30 kg/m³.

Os resultados do ensaio de determinação da sensibilidade à água da MBT apresentam-se no Quadro 4.4, com os respetivos valores de comparação no Quadro 4.5.

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios de sensibilidade à água das MBT

Agregado	% de bet.	Grupo	Prov.	Volume (mm ³)	Variaç. do volume (%)	Carga (kN)	Rotura dos provetes		Resistência (kPa)		ITS _{média} (kPa)	ITSR (%)
							Tipo	Superfície dos agreg.	ITS _w	ITS _d		
Natural e Reciclado	3,7%	Molhado	1	530588,8	1,4	6,9	Comb.	Partidas	667,1	-	625,4	28,1
			2	538851,0	1,7	6,1	Comb.	Partidas	583,7	-		
		Seco	3	523787,7	-	23,4	Comb.	Partidas	-	2267,6	2227,3	
			4	528888,3	-	22,8	Comb.	Partidas	-	2187,1		
	4,5%	Molhado	5	538070,5	1,0	8,0	Comb.	Partidas	759,5	-	985,3	47,0
			6	540029,4	1,4	8,9	Comb.	Partidas	838,8	-		
			7	518586,3	0,5	13,8	Comb.	Partidas	-	-		
		Seco	8	542869,3	-	19,6	Comb.	Partidas	-	1831,9	2096,3	
			9	529608,9	-	22,4	Comb.	Partidas	-	2150,4		
			10	521389,6	-	23,6	Comb.	Partidas	-	2306,7		
Natural	4,5%	Molhado	1N	533971,4	0,2	8,6	Comb.	Partidas	824,1	-	864,2	47,6
			2N	544493,2	1,6	9,6	Comb.	Partidas	904,3	-		
		Seco	3N	533115,8	-	20,4	Comb.	Partidas	-	1944,0	1814,5	
			4N	540784,9	-	17,8	Comb.	Partidas	-	1685,0		

Quadro 4.5 - Sensibilidade à água das MBT de referência (Martinho, 2014)

Mistura	% de betume	Grupo	Carga média (kN)	Rotura dos provetes		ITS _{média} (kPa)	ITSR (%)
				Tipo	Superfície dos agregados		
M23	4,5%	Molhado	12,1	Comb.	Partidas	1093,4	84,8
		Seco	14,4	Comb.	Partidas	1289,6	
M25	4,5%	Molhado	15,9	Comb.	Partidas	1548,8	82,8
		Seco	19,0	Comb.	Partidas	1870,3	

Em relação a este ensaio, o CETO não especifica nenhuma limitação, indicando apenas que o valor de ITSR deve ser declarado aquando da caracterização da mistura betuminosa. No entanto, a norma americana ASTM D 4867/D 4867-M04 (ASTM International, 2004), estabelece que uma mistura betuminosa deverá apresentar um valor desta propriedade de pelo menos 80%.

Como se pode verificar, pelos resultados obtidos nos ensaios dos provetes com agregado reciclado bem como dos provetes contendo unicamente agregado natural, conduziram a valores de ITSR bastante baixos e inferiores aos valores de referência para as MBT, o que demonstra que as misturas betuminosas em estudo apresentam fraco desempenho aquando da presença de água.

A rotura dos provetes demonstrou ser, em todos os casos, do tipo “combinação” uma vez que os provetes apresentaram uma linha de rotura e áreas deformadas nas zonas de aplicação da carga, como exemplo representado na Figura 4.9 e Figura 4.10. As superfícies dos agregados apresentaram-se partidas após o ensaio, como representado na Figura 4.11.



Figura 4.9 - Provede na prensa após ensaio de tração indireta



Figura 4.10 - Provede após ensaio de tração indireta

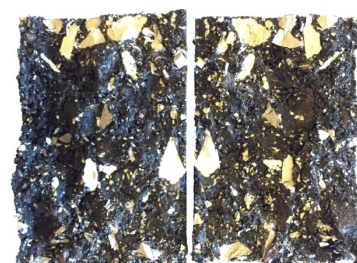


Figura 4.11 - Provede aberto após ensaio de tração indireta

Em relação à comparação entre as duas percentagens de betume ensaiadas, conclui-se que 3,7% de betume conduz a valores de ITSR muito baixos com um conseqüente desempenho inferior comparativamente com os provetes com 4,5% de betume. Posto isto, adotou-se 4,5 como a percentagem de betume a utilizar para a formulação das misturas a fabricar para a realização dos restantes ensaios de desempenho. Esta percentagem corresponde a uma situação razoável e expectável para este tipo de misturas, sendo corroborada pelas conclusões de (Martinho, 2014).

De modo esclarecer os resultados obtidos, e assim verificar se o betume utilizado seria a causa desses resultados, efetuaram-se ensaios a provetes fabricados unicamente com

agregados de origem natural e, desta vez, com betume tradicional 35/50³ indicado para MBQ. As características destes provetes apresentam-se no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Características dos provetes de MBQ para o ensaio de sensibilidade à água

Agregado	% de bet.	Provete	Dimensões			Massas			Temp. da água (°C)	Absorção de água (%)	Baridade ρ_{bssd} (kg/m ³)
			Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (mm ³)	Seca (g)	Imersa (g)	SSD (g)			
Natural	4,5%	15	101,8	66,0	537062,6	1197,9	683,6	1204,2	24	0,49	2295
		16	101,6	64,3	521041,5	1164,7	665,0	1172,3	24	0,74	2290
		17	102,2	65,6	538620,7	1195,6	682,8	1203,9	24	0,37	2288
		18	101,7	66,4	539144,7	1200,6	684,8	1206,6	24	0,52	2295
		19	101,8	64,5	524967,6	1153,1	654,8	1161,7	24	0,65	2269
		20	101,6	66,7	540814,0	1217,5	693,9	1222,0	24	0,69	2299

Os resultados do ensaio de determinação da sensibilidade à água da MBQ apresentam-se no Quadro 4.7

Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de sensibilidade à água das MBQ

% de bet.	Grupo	Prov.	Volume (mm ³)	Variação do volume (%)	Carga (kN)	Rotura dos provetes		Resistência (kPa)		ITS _{média} (kPa)	ITSR (%)
						Tipo	Superfície dos agregados	ITS _w	ITS _d		
4,5%	Molhado	15	538873,0	0,3	6,7	Comb.	Partidos	633,6	-	623,3	47,3
		16	523713,1	0,5	6,6	Comb.	Partidos	640,5	-		
		17	539114,6	0,1	6,3	Comb.	Partidos	595,7	-		
	Seco	18	539144,7	-	15,1	Comb.	Partidos	-	1423,6	1316,4	
		19	524967,6	-	12,0	Comb.	Partidos	-	1163,1		
		20	540814,0	-	14,5	Comb.	Partidos	-	1362,4		

Os resultados do ensaio aos provetes fabricados com o betume tradicional e agregado exclusivamente de origem calcária revelaram-se idênticos aos resultados dos provetes de MBT com o mesmo agregado. Conclui-se assim que em termos de sensibilidade à água, o agregado reciclado apresenta um desempenho semelhante ao agregado natural. No entanto, este desempenho revela-se insatisfatório, para ambas as misturas formuladas, visto que na presença de água perdem cerca de metade da sua capacidade resistente à tração indireta e com o ITSR com uma ordem de grandeza de cerca de metade da especificada na norma americana anteriormente referida.

Embora os resultados revelem valores muito baixos do ITSR, o facto de o estudo incidir em misturas betuminosas para aplicação em camadas de base diminui faz diminuir a importância do resultado.

4.4.2. Deformação permanente

Relativamente ao ensaio de deformação permanente, o CETO não limita os valores do WTS_{AIR} e do PRD_{AIR}, indicando apenas que estes têm de ser declarados.

³ Ficha técnica disponível no Anexo A (CEPSA, 2016c)

As lajes, representadas após o ensaio na Figura 4.12, tinham a caracterização apresentada no Quadro 4.8.



Figura 4.12 - Laje 1 (esquerda) e laje 2 (direita) após o ensaio *wheel tracking*

Quadro 4.8 - Características das lajes ensaiadas no WTT

Nº da laje	Dimensões (mm)	Baridade SSD (kg/m ³)
1	400,0 x 300,0 x 49,6	2344,63
2	400,0 x 300,0 x 49,4	2344,43

Os resultados do ensaio estão apresentados no Quadro 4.9 e Figura 4.13.

Quadro 4.9 - Resultados dos ensaio de deformação permanente realizados a 60 °C para a MBT

Nº da laje	RD _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)		WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	
		Parciais	Médias	Parciais	Médias
1	9,28	18,71	20,50	0,366	0,569
2	11,01	22,28		0,772	

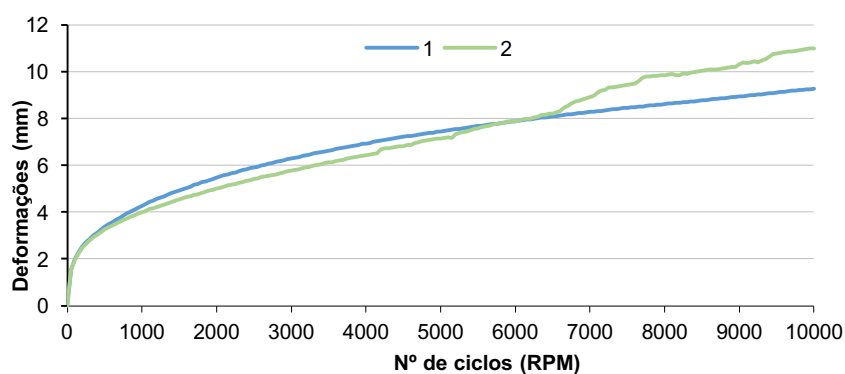


Figura 4.13 – Valores de RD_{AIR} do ensaio de deformação permanente da MBT realizado a 60 °C

Pela análise da Figura 4.13 conclui-se que numa primeira fase existe um acréscimo elevado da deformação devido à densificação da camada betuminosa pela aplicação repetida de cargas. Numa segunda fase verifica-se um acréscimo menor da deformação, apresentando um comportamento próximo do linear, devido ao aumento da resistência à deformação

provocado pelo aumento do contacto entre os agregados. Ambas as lajes terminaram o ensaio aos 10000 ciclos de carga sem atingirem a profundidade de rodeira de 20 mm.

Apresentam-se no Quadro 4.10 os resultados dos provetes da MBT de referência, aos quais se adicionou os resultados do provete 26 constituído por uma MBQ com agregado unicamente de origem calcária e 4,5% de betume, com a respetiva comparação representada na Figura 4.14.

Quadro 4.10 - Ensaio de deformação permanente a 60 °C das MBT de referência (Martinho, 2014)

Mistura	Baridade SSD (kg/m ³)	RD _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)		WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	
			Parciais	Médias	Parciais	Médias
M23	2044,96	20,01	32,72	32,13	(a)	(a)
	2030,71	20,04	31,55		(a)	
M25	2151,06	4,08	6,35	8,10	0,172	0,207
	2062,61	6,17	9,84		0,242	
M26	2326,00	7,17	11,49	11,05	0,240	0,252
	2327,00	6,63	10,61		0,264	

(a) Ensaios que não terminaram, por ter sido atingida a profundidade máxima de rodeira (20mm) por volta dos 3000 ciclos na primeira laje e 6500 na segunda laje

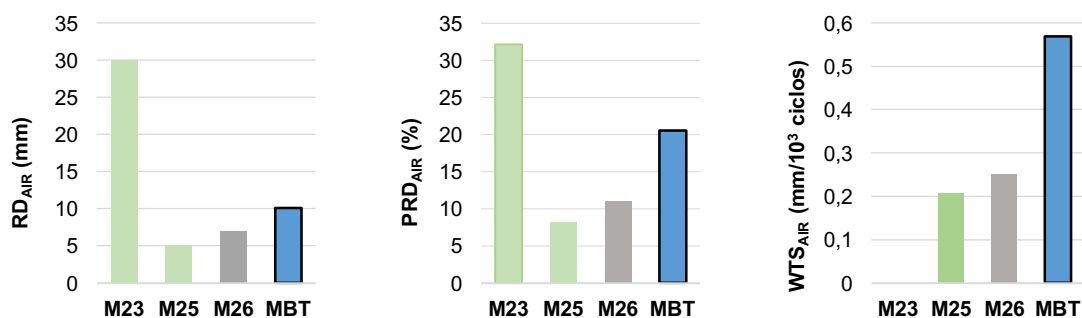


Figura 4.14 - Comparação dos valores de RD_{AIR} (à esquerda), PRD_{AIR} (ao centro) e WTS_{AIR} (à direita) obtidos nos ensaios de deformação permanente

Os resultados obtidos mostram que a MBT ensaiada apresenta valores intermédios relativamente aos dois tipos de MBT de referência, revelando um melhor desempenho relativamente à mistura M23 aditivada com Rediset, e pior desempenho relativamente à mistura M25 aditivada com Sasobit. No entanto, o autor considera que a mistura M23 apresenta um comportamento pouco aceitável em relação a este ensaio.

Comparativamente com a mistura contendo unicamente agregado calcário, a MBT estudada apresentou valores superiores para os três parâmetros, o que indica que a incorporação de betão britado reciclado como agregado provoca uma diminuição do desempenho em termos de deformação permanente.

4.4.3. Módulo de rigidez

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão em 4 pontos, para as vigas fabricadas com a MBT em estudo, bem como os resultados das misturas betuminosas de comparação, estão apresentados na Figura 4.15 e Figura 4.16, respectivamente para o módulo de rigidez e ângulo de fase.

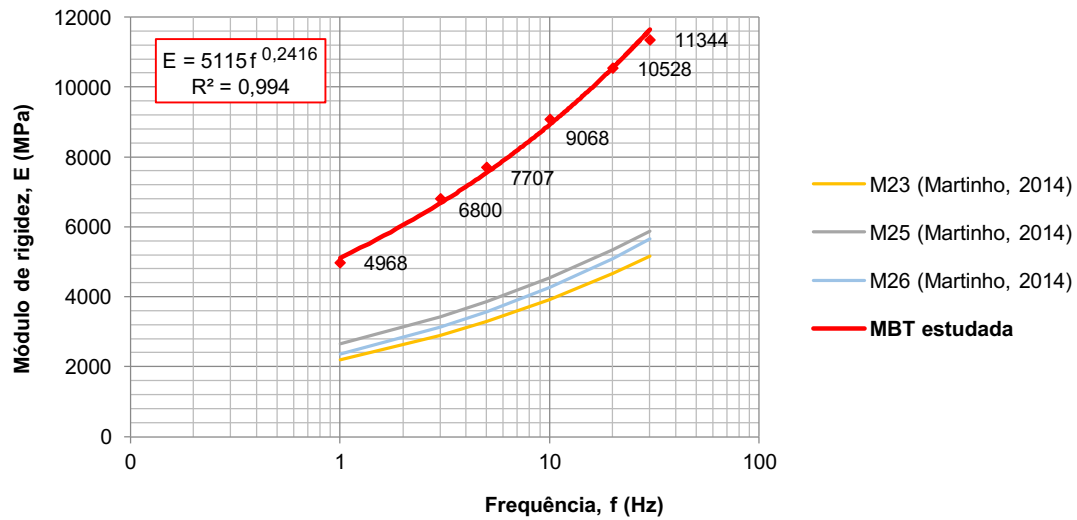


Figura 4.15 - Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos: Módulo de rigidez (ensaio realizado a 20 °C e com uma extensão de 50 µm/m)

Relativamente à evolução do módulo de rigidez com a frequência de aplicação da carga, os resultados mostram que a MBT estudada apresenta valores para o módulo de rigidez muito superiores relativamente às misturas de referência. Apresenta valores com cerca do dobro da ordem de grandeza.

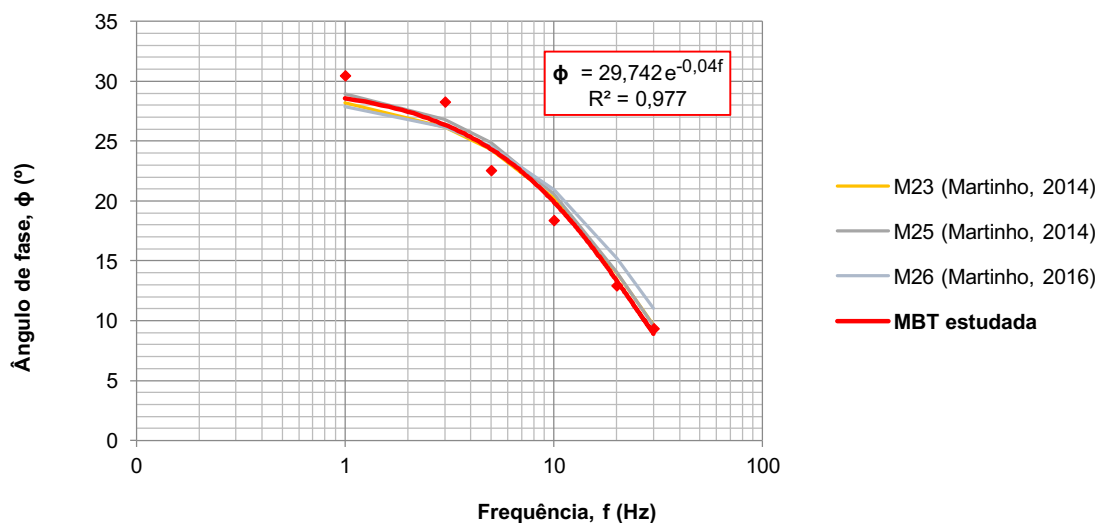


Figura 4.16 - Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos: Ângulo de fase (ensaio realizado a 20 °C e com uma extensão de 50 µm/m)

A análise destes últimos resultados permite concluir que para a MBT estudada, a evolução do módulo de fase com a frequência de aplicação de carga tem tendência para apresentar valores do ângulo de fase da mesma ordem de grandeza relativamente às misturas de referência.

Assim, relativamente ao ensaio para obtenção do módulo de rigidez, conclui-se que a MBT estudada apresenta potencial de utilização em camadas de pavimentos, uma vez que não apresentou valores que indiquem a possibilidade de comprometimento do seu desempenho.

4.4.4. Resistência à fadiga

Os resultados dos ensaios de resistência à fadiga estão apresentados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 - Resultados dos ensaios de resistência à fadiga (ensaio a 20 °C e a 10 Hz)

Extensão, ϵ ($\mu\text{m/m}$)	Vigas	Baridade (kg/m^3)	Nº de ciclos, N		
			N	Média	Desv. Padrão
200	1	2 404,6	2 397 932	1 557 656	762 123
	2	2 409,7	911 055		
	3	2 402,6	1 363 983		
250	4	2 997,4	145 324	121 494	67 663
	5	2 384,4	45 140		
	6	2 405,7	174 018		
350	7	2 403,6	33 011	19 935	11 696
	8	2 410,3	16 324		
	9	2 414,5	10 470		

Para a comparação dos resultados experimentais obtidos com a estimativa proposta pela metodologia da Shell, foi adotado um valor de S_{mix} baseado nos valores calculados por Martinho (2014) de 8438 MPa e 6413 MPa, respetivamente, para as misturas M23 e M25. Neste caso, para a MBT estudada foi então utilizado um valor intermédio de 7000 MPa.

Os resultados do ensaio, bem como os resultados de comparação estão representados na Figura 4.17.

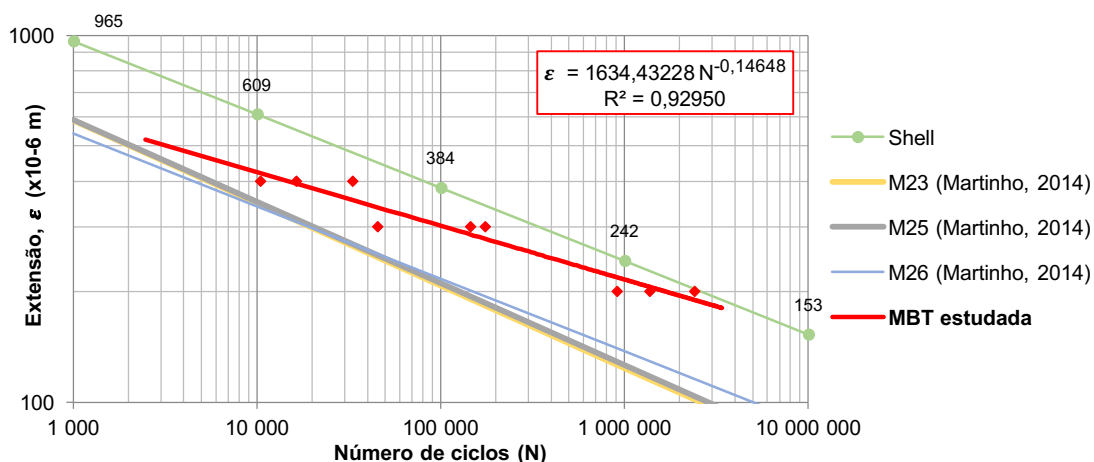


Figura 4.17 – Resultados dos ensaios de resistência à fadiga (ensaio realizado a 20 °C e com uma frequência de 10 Hz)

Do ensaio resultou uma Lei de Fadiga que se expressa pela Equação (4.1):

$$\ln(N) = 43,24399 - 5,51785 \cdot \ln(\varepsilon) \quad (4.1)$$

O parâmetro da vida à fadiga, ε_6 , corresponde ao valor de 207 $\mu\text{m/m}$.

A análise dos resultados obtidos permite concluir que, no que respeita à resistência à fadiga, não é possível estabelecer um padrão claro no comportamento das MBT. No entanto os valores mostram que a MBT estudada apresenta resultados aceitáveis.

Os resultados encontram-se entre os da estimativa proposta pela metodologia Shell e os das misturas de referência utilizadas, chegando mesmo a apresentar um maior valor do parâmetro da vida à fadiga, ε_6 , comparativamente com estas últimas, verificando assim um melhor comportamento em relação às misturas aditivadas apenas aquando do fabrico da MBT (M23 e M25) e em relação à MBQ de referência constituída por agregado exclusivamente de origem calcária.

Assim, em relação ao desempenho quanto à resistência à fadiga, o agregado reciclado mostrou ser um material com potencial para utilização em MBT.

5. Conclusões

5.1. Síntese do trabalho

O desenvolvimento deste trabalho iniciou-se por uma pesquisa e revisão bibliográfica que permitiu perceber todos os aspetos e conceitos essenciais à execução do mesmo, bem como ficar a conhecer outros trabalhos realizados por diversos autores que abordam a mesma temática.

De modo a perceber a metodologia utilizada no trabalho experimental, no terceiro capítulo da dissertação efetuou-se a descrição da metodologia usada na realização dos diversos ensaios realizados, segundo as normas europeias publicadas. Foram estudadas experimentalmente misturas betuminosas temperadas do tipo AC 20 base 35/50, através da caracterização geométrica e física do agregado natural e reciclado a utilizado. A formulação das misturas betuminosas seguiu um método empírico amplamente usado em Portugal, denominado por metodologia Marshall, utilizada como ponto de partida para a definição da quantidade de betume a utilizar no fabrico das misturas a ensaiar no restante trabalho experimental.

Começou-se por abordar as questões que se relacionam com a composição das misturas betuminosas, às quais se aplicou a metodologia Marshall na primeira fase do trabalho experimental. Através desta metodologia, pela obtenção dos valores de deformação, estabilidade e das diferentes propriedades volumétricas obteve-se a percentagem ótima de betume a utilizar na formulação das misturas betuminosas em estudo.

De modo a verificar a viabilidade da mistura estudada, desenvolveram-se ensaios de determinação de propriedades que indiquem o comportamento das misturas em serviço e ensaios de desempenho tais como o ensaio de sensibilidade à água e a resistência à deformação permanente.

Após o término do trabalho experimental, tratou-se a informação e resultados obtidos de modo a proceder à análise e discussão dos resultados, descrita no quarto capítulo, cujas conclusões se apresentam de seguida.

5.2. Principais conclusões

Associada à produção das misturas betuminosas está o consumo de energia e a consequente libertação de gases poluentes. De modo a promover um desenvolvimento sustentável e a redução do consumo energético começaram a ser desenvolvidas técnicas para a redução das temperaturas de fabrico e de aplicação das misturas betuminosas, surgindo assim a MBT estudadas nesta dissertação.

Grande parte dos resíduos gerados tem como origem a construção e demolição. Estes materiais, designados por RCD, constituem um problema que necessita de uma solução de

modo a que a indústria da construção seja sustentável. Desta forma, os RCD mostram-se como um material de interesse, para incorporação como agregado no fabrico de misturas betuminosas.

De modo a contribuir para o estudo desta temática, estudaram-se experimentalmente misturas betuminosas temperadas do tipo AC 20 base 35/50.

O agregado reciclado estudado apresentou valores de resistência ao desgaste e absorção de água fora dos limites definidos no CETO. Estes valores podem ser explicados pela existência de argamassa de cimento aglutinadas às partículas de agregado. A caracterização química deste agregado revelou que praticamente todos valores dos resultados do ensaio de lixiviação estão abaixo dos limites máximos legais, e alguns parâmetros com valores não muito superiores aos apresentados pelos agregados naturais.

Em termos de afinidade entre o ligante e o agregado, os ensaios mostraram melhores resultados para os betumes aos quais foram adicionados os aditivos manualmente, comparativamente ao betume temperado aditivado em refinaria. Os resultados dos ensaios para os diferentes tipos de agregado, natural e reciclado, e betume apresentaram pequenas diferenças de valores que se mostram pouco relevantes. Conclui-se assim que a substituição de agregado de betão britado reciclado, na quantidade de 60% da massa total da mistura, em substituição do agregado natural de origem calcária, apresentou comportamento idêntico em termos de afinidade com o ligante betuminoso. O agregado reciclado revelou assim um desempenho, em termos de afinidade ao ligante, que o recomenda em misturas betuminosas. No entanto, como os resultados mostraram valores baixos para ambos os tipos de agregado, é ainda recomendado que adesividade com este betume seja melhorada com recurso a técnicas indicadas para o efeito, como por exemplo o recurso a aditivos que melhoram a adesividade.

Em termos de propriedades volumétricas, a MBT estudada apresentou valores de baridade superiores e de baridade máxima teórica inferiores, em comparação com as MBT de referência que continham apenas agregado natural.

O aumento da quantidade de betume levou à diminuição da porosidade da mistura, valores estes que se encontram dentro dos limites definidos no CETO, até à quantidade de 4,5% de betume. Relativamente ao VMA, as misturas para as diferentes percentagens de betume, não revelaram nenhuma tendência, apresentando todos os valores abaixo dos limites especificados.

Pelo ensaio Marshall, foram obtidos valores de estabilidade que praticamente para todas as quantidades de betume cumprem os limites. Quanto à deformação, apenas a mistura com 3,5% de betume cumpriu o limite máximo especificado.

Assim, conclui-se que, utilizando como critério o cumprimento dos valores especificados no CETO, teria de se formular uma mistura com percentagem de betume entre os 3,5% e os 4,0%.

O valor da percentagem ótima de betume encontrado correspondeu a uma deformação de aproximadamente 4,75 mm e um VMA de 12,9%, valores estes que não se enquadram

dentro dos limites especificados no CETO. Tornou-se assim fundamental a avaliação da mistura betuminosa através de ensaios de desempenho.

De forma a avaliar o desempenho da MBT, foram feitos ensaios de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, obtenção do módulo de rigidez e ensaio de resistência à fadiga.

Em termos de sensibilidade à água, foram obtidos resultados para misturas formuladas com 3,7% e 4,5% de betume, fabricadas com ambos os tipos de agregado e também, em termos comparativos, fabricadas apenas com agregado natural.

Os resultados obtidos nos ensaios dos provetes com agregado reciclado bem como dos provetes contendo unicamente agregado natural, conduziram a valores de ITSR bastante baixos e inferiores aos valores de referência para as MBT, o que demonstra que as misturas betuminosas em estudo apresentaram fraco desempenho aquando da presença de água.

Em relação à comparação entre as duas percentagens de betume ensaiadas, concluiu-se que 3,7% de betume conduz a valores de ITSR muito baixos com um consequente desempenho inferior comparativamente com os provetes com 4,5% de betume. Por esta razão, adotou-se 4,5% de betume a utilizar para a formulação das misturas a fabricar para a realização dos restantes ensaios de desempenho.

De modo esclarecer os resultados obtidos, que se encontram muito abaixo do valor de 80% encontrado como referência internacional, e assim verificar se o betume utilizado seria a causa desses resultados, efetuaram-se ensaios a provetes fabricados unicamente com agregados de origem natural e betume 35/50 indicado para MBQ. Os resultados revelaram-se idênticos aos resultados anteriores, concluindo-se assim que em termos de sensibilidade à água, o agregado reciclado apresentou um desempenho semelhante ao agregado natural. No entanto, este desempenho revelou-se insatisfatório, para ambas as misturas formuladas, visto que na presença de água perdem cerca de metade da sua capacidade resistente à tração indireta.

Em relação à deformação permanente, apesar dos resultados obtidos mostrarem que a MBT ensaiada apresentou valores próximos das MBT de referência, foi possível verificar que a incorporação de betão britado reciclado como agregado provocou uma diminuição do desempenho em termos de deformação permanente.

Relativamente ao ensaio para obtenção do módulo de rigidez, conclui-se que a MBT estudada apresenta potencial de utilização em camadas de pavimentos, uma vez que não apresentou valores que indiquem a possibilidade de comprometimento do seu desempenho.

A análise dos resultados obtidos para os ensaios de resistência à fadiga permitiram concluir que não é possível estabelecer um padrão claro no comportamento das MBT. No entanto os valores mostram que a MBT estudada apresenta resultados aceitáveis em relação à resistência à fadiga.

Assim, em relação ao desempenho quanto à resistência à fadiga, o agregado reciclado mostrou ser um material com potencial para utilização em MBT.

De um modo geral, foi possível concluir que apesar de o betão britado reciclado não cumprir todos as especificações relativas aos agregados para utilização em misturas betuminosas para camadas de base de pavimentação, estes revelaram um desempenho idêntico ao agregado natural em termos de afinidade com o ligante e sensibilidade à água.

A metodologia Marshall não se mostrou muito eficaz na formulação destas misturas, uma vez que conduziu a valores pouco esclarecedores.

O betão britado reciclado revelou-se um material com potencial de utilização em misturas betuminosas, mas que no caso de se utilizar betumes temperados aditivados em refinaria requiere mais estudos para confirmar melhor essa aptidão.

Em geral, conclui-se que o betão britado reciclado é um material que pode ser incorporado como agregado em misturas betuminosas temperadas com utilização do betume temperado utilizado no estudo desta dissertação.

5.3. Desenvolvimentos futuros

Com base no trabalho desenvolvido nesta dissertação, e de forma a desenvolver o estudo do desempenho de misturas betuminosas para pavimentação com incorporação de betão britado reciclado, é necessário desenvolver trabalhos futuros que permitirão enriquecer o conhecimento científico nesta área. Para isso poderão ser desenvolvidos os seguintes aspetos:

- Formular misturas betuminosas com diferentes percentagens de agregado reciclado, por forma a perceber melhor a influência deste no comportamento da mistura betuminosa.
- Estudar a incorporação deste agregado reciclado nouro tipo de camadas do pavimento.
- Desenvolver uma análise do custo de ciclo de vida dos pavimentos com incorporação de agregado reciclado, de modo a compreender melhor os aspetos económicos relativos a esta solução, para além dos aspetos técnicos que foram estudados neste trabalho.

Com a realização destes trabalhos espera-se contribuir para o desenvolvimento de referências normativas e especificações de materiais reciclados para pavimentação. Deste modo pretende-se que este tipo de materiais seja mais amplamente utilizado e contribuir para se caminhar cada vez mais para um desenvolvimento sustentável.

Referências bibliográficas

- Arabani, M., Nejad, F., & Azarhoosh, A. (2013). "Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures". *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 14, Issue 5, pp. 531-539.
- ASTM International. (2004). "Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures". *ASTM D4867 / D4867M-04*. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America.
- Barros, E. (2012). "*Comportamento dos betumes em função da temperatura*". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Batista, F. (2004). "*Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos*". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Branco, F., & Ferreira, M. (2009). "*Levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal*". Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Instituto de Infra-Estruturas de Portugal.
- Branco, F., Pereira, P., & Picado Santos, L. (2006). "*Pavimentos Rodoviários*". Coimbra: Edições Almedina.
- Branco, F., Pereira, P., & Picado Santos, L. (2006). *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Edições Almedina.
- Capitão, S. (1996). "*Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade. Contribuição para a Caracterização do seu Comportamento*". Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Capitão, S. (2003). "*Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade*". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Capitão, S., Picado-Santos, L., & Martinho, F. (2012). "Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt". *Elsevier - Construction and Building Materials*, 36, 1016-1024.
- CEPSA. (2016a). "*Betumes de baixa temperatura*". Obtido em 12 de Setembro de 2016, de CEPSA:
http://www.cepsa.com/stfls/CepsaPt/O%20Que%20Oferecemos/Produtos%20Asf%C3%A1lticos/Ficheros_Produtos%20Asf%C3%A1lticos/BETUMES_BAIXA_TEMPERATURA.pdf
- CEPSA. (2016b). "*CEPSASFALT 35/50 BT*".
- CEPSA. (2016c). "*CEPSASFALT 35/50*". Obtido em 10 de Setembro de 2016, de CEPSA:
[http://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/PROAS/Productos_proas/Carretera/Ficheros/Cepsasfalt%2035_50%20\(rev%201\).pdf](http://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/PROAS/Productos_proas/Carretera/Ficheros/Cepsasfalt%2035_50%20(rev%201).pdf)

- Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de Agosto do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. (2009). Diário da República: 1.ª série, N.º 153, 10 de Agosto de 2009. Obtido em 05 de Setembro de 2016, de <https://dre.pt/application/file/493323>.
- Dias, J. (2011). *"Misturas Betuminosas Incorporando por Via Seca Borracha de Pneus Usados. Caracterização e validação tecnológica"*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- EAPA. (2005). *"Industry Statement on the recycling of asphalt mixes and use of waste of asphalt pavements"*. Brussels, Belgium.
- EAPA. (2014). EAPA - Position Paper. *"The use of Warm Mix Asphalt"*. Brussels, Belgium.
- Estradas de Portugal. (2014a). "14.03 - Pavimentação. Características dos Materiais". Em S. A. Estradas de Portugal, *"Caderno de Encargos Tipo Obra"*.
- Estradas de Portugal. (2014b). "15.03 - Pavimentação. Métodos construtivos". Em S. A. Estradas de Portugal, *"Caderno de Encargos Tipo Obra"*.
- Fernandes, G. (2012). *"Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Materiais de Construção de Pavimentos Rodoviários - Estado da Arte"*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- Ferreira, C., Silva, H., & Oliveira, J. (2009). Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas. *XV Congresso Ibero-Latinoamericano de Alsfalto*, (pp. 355-364). Lisboa.
- Ferreira, J. (2009). *"Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego"*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.
- Gagliano, B., Blab, R., & Kappl, K. (2004). *"Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure. Models for Permanent Deformation for Bituminous Bound Materials in Flexible Pavements"*, Version 2. SAMARIS.
- Gubler, R., Partl, M., Grilli, & Grilli, A. (2005). "Influence of water and temperature on mechanical properties of selected asphalt pavements". *Materials and Structures*, 38, pp. 523-532.
- Gul, W., & Ahmed Guler, M. (2014). "Rutting susceptibility of asphalt concrete with recycled concrete aggregate using revised Marshall procedure". *Elsevier - Construction and Building Materials*, 55, pp. 341-149.
- Gómez-Meijide, B., Pérez, I., Airey, G., & Thom, N. (2015). "Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste". *Elsevier - Construction and Building Materials*, 77, pp. 168-178.
- Infraestruturas de Portugal. (2016). *Infraestruturas de Portugal*. Obtido em 2016 de Junho de 12, de Infraestruturas de Portugal: <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/rede/rodoviaria/prn>

- InIR. (s.d.). Disposições Normativas. *"Construção e reabilitação de pavimentos. Ligantes betuminosos"*.
- InIR. (s.d.). Disposições Normativas. *"Directivas para a concepção de pavimentos. Critérios de dimensionamento"*.
- Instituto Nacional de Estatística. (2016). "Estatísticas dos Resíduos 2014". Edição 2016. Lisboa.
- Jesus, A. (2015). *"Efeito das condições de fabrico e compactação no comportamento mecânico de misturas betuminosas temperadas"*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologias.
- Lee, C.-H., Du, J.-C., & Shen, D.-H. (2012). "Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt". *Elsevier - Construction and Building Materials*, 28, pp. 66-71.
- LNEC. (1962). "Vocabulário de estradas e aeródromos". *Especificação LNEC E1-1962, 4ª*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- LNEC. (2009a). "Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos". *Especificação LNEC E 473 - 2009*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- LNEC. (2009b). "Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte". *Especificação LNEC E 474 - 2009*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Martinho, F. (2014). *"Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de subprodutos Industriais - Caracterização e Validação Tecnológica"*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Mills-Beale, J., & You, Z. (2010). "The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates". *Elsevier - Construction and Building Materials*, 24, pp. 230-235.
- NAPA & EAPA. (2011). *"The Asphalt Paving Industry. A Global Perspective. Production, Use, Properties and Occupational Exposure Reduction Technologies and Trends"*, 2nd ed.
- Neves, J. (2005). "Aula T7 - Pavimentos". *Construção e Manutenção de Infraestruturas de Transportes*, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.
- Pais, J., & Palha, C. (2010). "Resistência à fadiga em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários". *8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, (pp. 101-112). Guimarães.
- Pais, J., Pereira, P., & Azevedo, M. (2000). "Ensaio mecânicos para caracterização de misturas betuminosas". *1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000*, (pp. 639-649). Lisboa.
- Papacostas, A., Sharp, K., & Malone, S. (2013). Austroads Technical Report AP-T231-13. *"Evaluation Protocol for Warm Mix Asphalt"*. Sydney, Australia: Austroads.
- Paranavithana, S., & Mohajerani, A. (2006). "Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete". *Resources, Conservation and Recycling*, 48, pp. 1-12.

- Pasandín, A., & Pérez, I. (2014). "Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion". *Elsevier - Construction and Building Materials*, 55, pp. 350-358.
- Pasandín, A., & Pérez, I. (2015). "Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates". *Elsevier - Construction and Building Materials*, 74, pp. 151-161.
- Pereira, L., Jalali, S., & Aguiar, J. (2004). "Gestão de resíduos de construção e demolição". *Workshop Sistemas Integrados de Gestão de Fluxos Específicos de Resíduos*. Lisboa.
- Pestana, R. (2008). "*Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego*". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Qasrawi, H., & Asi, I. (Setembro de 2016). "Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate". *Elsevier - Construction and Building Materials*, 121, pp. 19-24.
- Quintero, C. (2011). *Estudo de Misturas Asfálticas com Ligantes de Consistência Elevada - Formulação e Comportamento Mecânico*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Roque, A., Martins, I., Freire, A., Neves, J., & Antunes, M. (2016). "Assessment of Environmental Hazardous of Construction and Demolition Recycled Materials (C&DRM) from Laboratory and Field Leaching Tests Application in Road Pavement Layers". *Elsevier - Procedia Engineering*, 143, pp. 204-211.
- Rubio, M., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). "Warm mix asphalt: an overview". *Journal of Cleaner Production*, 24, pp. 76-84.
- Sharp, K. (2009). "*Guide to Pavement Technology. Part 1: Introduction to Pavement Technology*", 2nd ed. Sydney, Australia: Austroads.
- Silva, H. (2005). "*Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique. Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Silva, H., Pais, J., & Pereira, P. (2002). "Desenvolvimento de ensaios para estudo da adesividade nas misturas betuminosas". *2º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000*, (pp. 269-279). Lisboa.
- Vargas, P. (2013). "*Aplicação de betão reciclado em misturas betuminosas para camadas de base*". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- WBCSD. (2009). "*The Cement Sustainability Initiative - Recycling Concrete*". Geneva, Switzerland.
- Wong, Y., Sun, D., & Lai, D. (2007). "Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt". *Waste Management*, pp. 294-301.

Referências normativas

- CEN. (1996). "Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of particle size distribution - Test sieves, nominal size of apertures". *EN 933-2:1996*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2003a). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of the air voids content of bituminous mixtures". *EN 12697-8:2003*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2003b). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking". *EN 12697-22:2003*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2003c). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens". *EN 12697-23:2003*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2003d). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 33: Specimen preparation slab compactor". *EN 12607-33:2003*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2008). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens". *EN 12697-12:2008*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2009a). "Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens". *EN 12591:2009*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2009b). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density". *EN 12697-5:2009*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2009c). "Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate". *EN 933-11:2009+AC:2009*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2012a). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens". *EN 12697-6:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2012b). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen". *EN 12697-11:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2012c). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: . *EN 12697-24:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2012d). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness". *EN 12697-26:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.

- CEN. (2012e). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor". *EN 12697-30:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2012f). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test". *EN 12697-34:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2012g). "Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of particle size distribution - Sleving method". *EN 933-1:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2016). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing". *EN 12697-35:2016*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2012e). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test". *EN 12697-34:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2012f). "Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of particle size distribution - Sleving method". *EN 933-1:2012*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- CEN. (2016). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing". *EN 12697-35:2016*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.

Anexos

Anexo A – Fichas técnicas dos betumes

A.1 – Betume Temperado 35/50



CEPSASFALT 35/50 BT

DEFINIÇÃO

Betume asfáltico para pavimentação, de acordo com as especificações da EN 12591 para o betume 35/50 BT.

ESPECIFICAÇÕES:

Características	Unidade	Norma	Mín.	Máx.
Betume original				
Penetração (25 °C; 100g; 5s)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Índice de penetração	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	50	58
Temperatura de fragilidade Fraass	°C	EN 12593	-	-5
Solubilidade	%	EN 12592	99,0	-
Temperatura de inflamação	°C	EN 2592	240	-
Resistência ao envelhecimento a 163 °C (EN 12607-1)				
Varição de massa	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetração retida (25 °C; 100g; 5s)	% p.o.	EN 1426	53	-
Δ Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	11

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABALHO:

- Temperatura da mistura (°C): 130 - 140
- Temperatura de armazenamento e de utilização do ligante (°C): 150 - 155
- Temperatura de compactação (°C): 120 - 130

APLICAÇÕES:

- Misturas betuminosas temperadas
- Misturas que necessitam de um tempo elevado de transporte ou colocação em obra
- Misturas convencionais

Revisão nº 1

Aprovado: 01/01/2016

Próxima revisão: 01/01/2020



Se deseja mais informação, visite: www.cepsa.pt

Nota: as recomendações constantes desta ficha devem ser consideradas a título de orientação e para situações genéricas, recusando a Cepsa qualquer responsabilidade pela sua utilização abusiva. Para situações específicas, por favor contacte o Departamento Técnico da Cepsa.

ASFALTOS

A.2 – Betume 35/50



CEPSASFALT 35/50

DEFINIÇÃO

Betume asfáltico para pavimentação, de acordo com as especificações da EN 12591 para o betume 35/50.

ESPECIFICAÇÕES:

Características	Unidade	Norma	Mín.	Máx.
Betume original				
Penetração (25 °C; 100g; 5s)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Índice de penetração	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	50	58
Temperatura de fragilidade Fraass	°C	EN 12593	-	-5
Solubilidade	%	EN 12592	99,0	-
Temperatura de inflamação	°C	EN 2592	240	-
Resistência ao envelhecimento a 163 °C (EN 12607-1)				
Varição de massa	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetração retida (25 °C; 100g; 5s)	% p.o.	EN 1426	53	-
Δ Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	11

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABALHO:

- Temperatura da mistura (°C): 160 - 165
- Temperatura de armazenamento e de utilização do ligante (°C): 160 - 165
- Temperatura de compactação (°C): 150 - 160

APLICAÇÕES:

- Misturas betuminosas a quente

ASFALTOS

Revisão nº 1

Aprovado: 01/01/2016

Próxima revisão: 01/01/2020



Se deseja mais informação, visite: www.cepsa.pt

Nota: as recomendações constantes desta ficha devem ser consideradas a título de orientação e para situações genéricas, recusando a Cepsa qualquer responsabilidade pela sua utilização abusiva. Para situações específicas, por favor contacte o Departamento Técnico da Cepsa.

Anexo B – Ensaio de afinidade

Anexo B.1 – Betume temperado e agregado calcário



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.1 - Agregado calcário e betume temperado: garrafa 1



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.2 - Agregado calcário e betume temperado: garrafa 2



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.3 - Agregado calcário e betume temperado: garrafa 3

Anexo B.2 – Betume aditivado com Sasobit e agregado calcário



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.4 - Agregado calcário e betume aditivado com Sasobit: garrafa 1



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.5 - Agregado calcário e betume aditivado com Sasobit: garrafa 2



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.6 - Agregado calcário e betume aditivado com Sasobit: garrafa 3

Anexo B.3 – Betume aditivado com Sasobit e agregado reciclado



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.7 - Agregado reciclado e betume aditivado com Sasobit: garrafa 1



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.8 - Agregado reciclado e betume aditivado com Sasobit: garrafa 2



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.9 - Agregado reciclado e betume aditivado com Sasobit: garrafa 3

Anexo B.4 – Betume aditivado com Rediset e agregado calcário



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.10 - Agregado calcário e betume aditivado com Rediset: garrafa 1



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.11 - Agregado calcário e betume aditivado com Rediset: garrafa 2



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.12 - Agregado calcário e betume aditivado com Rediset: garrafa 3

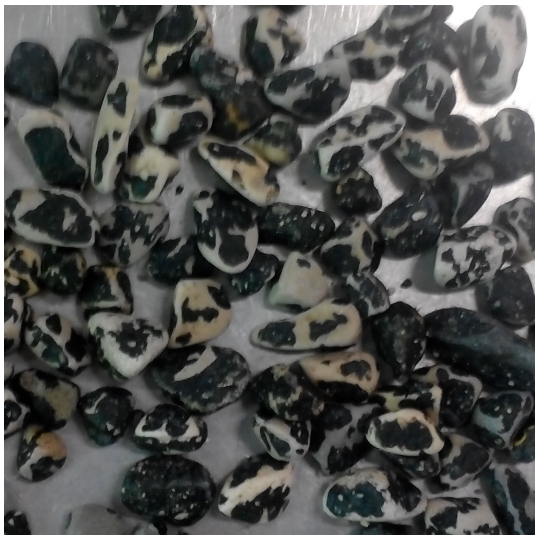
Anexo B.5 – Betume aditivado com Rediset e agregado reciclado



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.13 - Agregado reciclado e betume aditivado com Rediset: garrafa 1



a) 6 horas



b) 24 horas



c) 48 horas



d) 72 horas

Figura B.14 - Agregado reciclado e betume aditivado com Rediset: garrafa 2



a) 6 horas



b) 24 horas



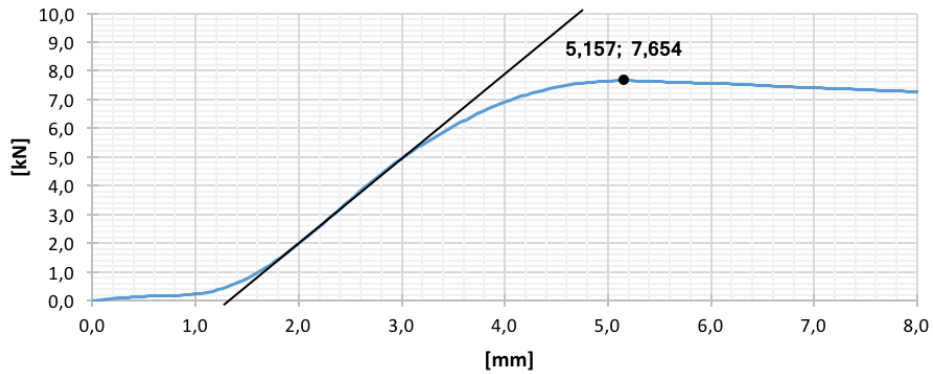
c) 48 horas



d) 72 horas

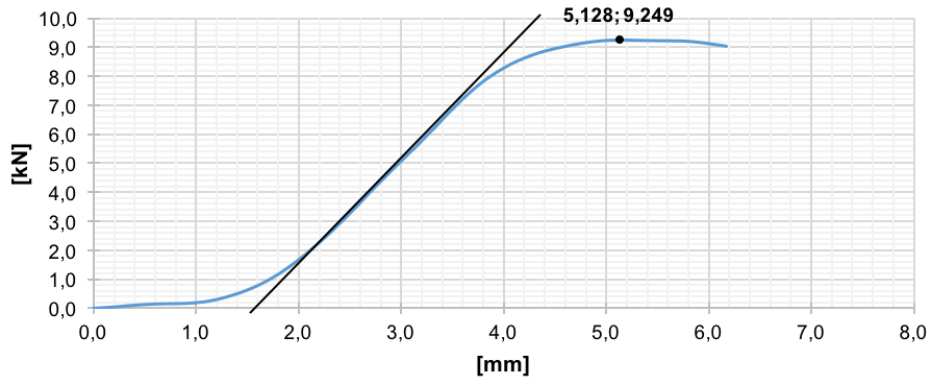
Figura B. 15 - Agregado reciclado e betume aditivado com Rediset: garrafa 3

Anexo C – Dados do ensaio Marshall



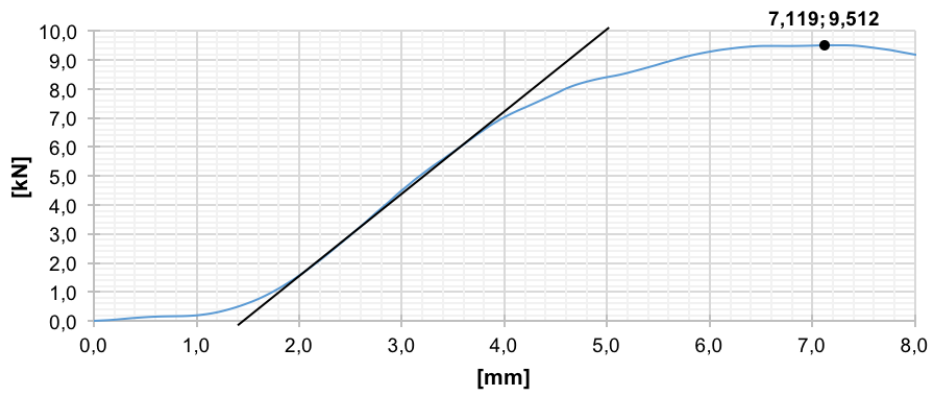
Estabilidade Marshall: 7,7 kN
Fator de correção, c: 1,02378
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 7,8 kN
Deformação nominal: 1,30 mm
Deformação Marshall, F: 3,9 mm

Figura C.1 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 1 (3,5% de betume)



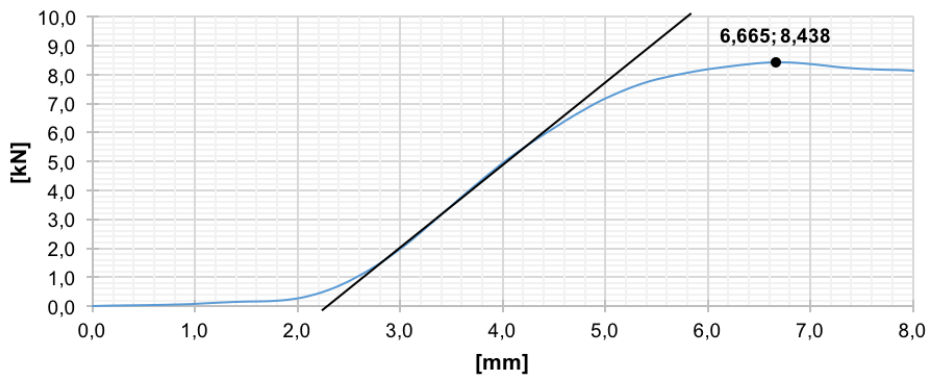
Estabilidade Marshall: 9,2 kN
Fator de correção, c: 0,97972
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 9,1 kN
Deformação nominal: 1,50 mm
Deformação Marshall, F: 3,6 mm

Figura C.2 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 2 (3,5% de betume)



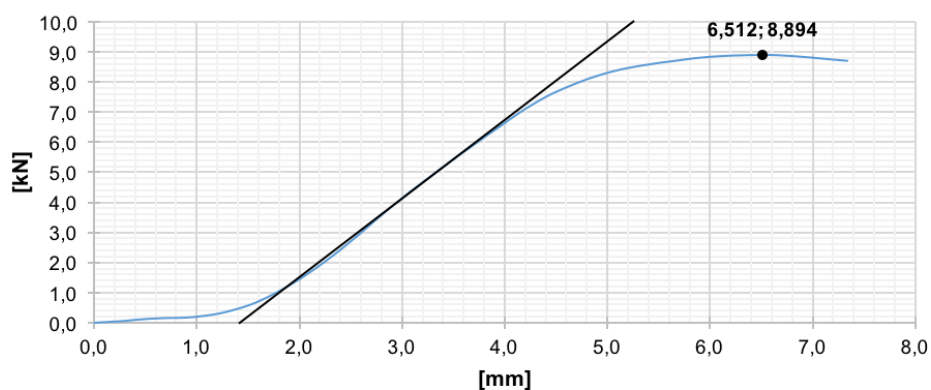
Estabilidade Marshall: 9,5 kN
Fator de correção, c: 0,98492
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 9,4 kN
Deformação nominal: 1,50 mm
Deformação Marshall, F: 5,6 mm

Figura C.3 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 3 (4,0% de betume)



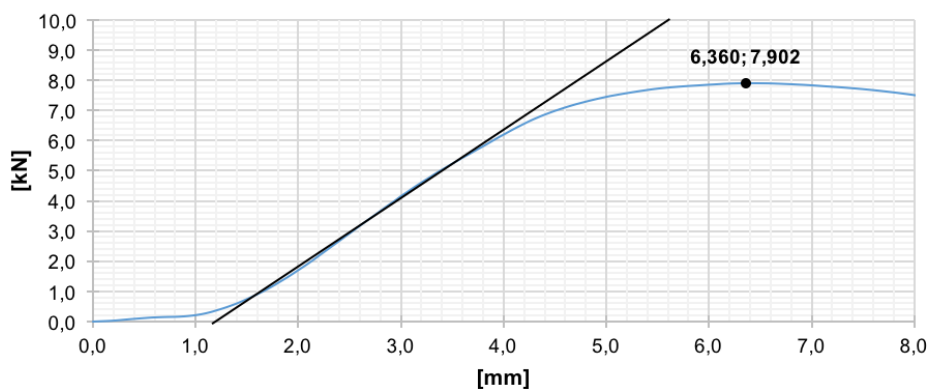
Estabilidade Marshall: 8,4 kN
Fator de correção, c: 0,99932
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 8,4 kN
Deformação nominal: 2,25 mm
Deformação Marshall, F: 4,4 mm

Figura C.4 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 4 (4,0% de betume)



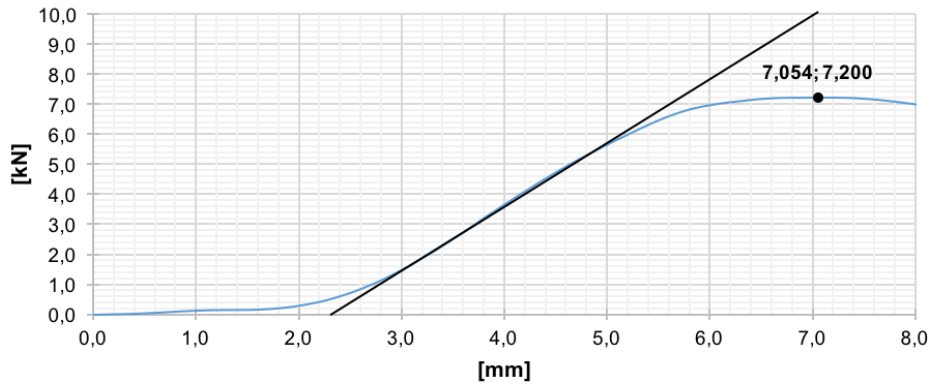
Estabilidade Marshall: 8,9 kN
Fator de correção, c: 1,01661
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 9,0 kN
Deformação nominal: 1,50 mm
Deformação Marshall, F: 5,0 mm

Figura C.5 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 5 (4,5% de betume)



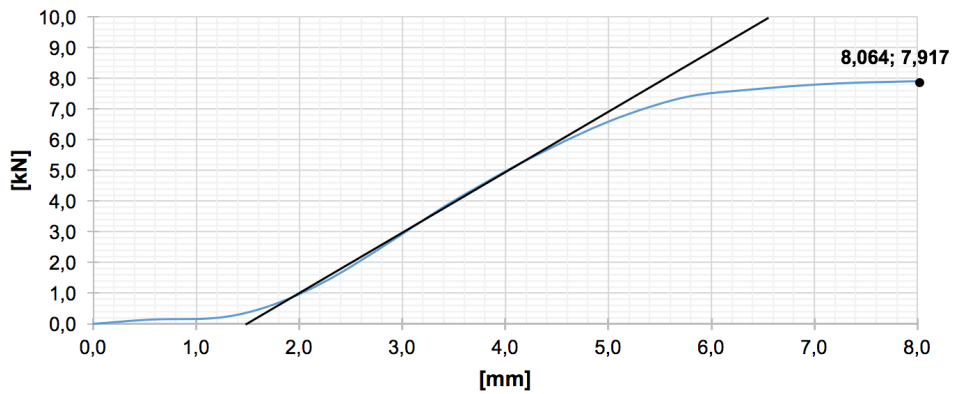
Estabilidade Marshall: 7,9 kN
Fator de correção, c: 0,97720
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 7,7 kN
Deformação nominal: 1,25 mm
Deformação Marshall, F: 5,1 mm

Figura C.6 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 6 (4,5% de betume)



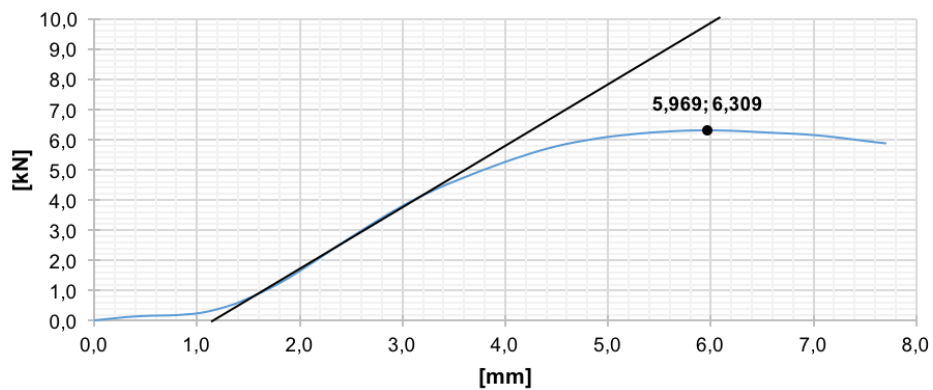
Estabilidade Marshall: 7,2 kN
Fator de correção, c: 1,02875
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 7,4 kN
Deformação nominal: 2,35 mm
Deformação Marshall, F: 4,7 mm

Figura C.7 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 7 (5,0% de betume)



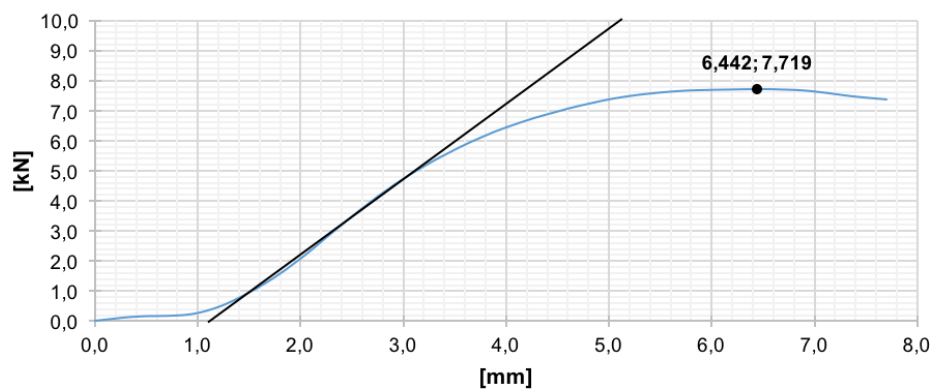
Estabilidade Marshall: 7,9 kN
Fator de correção, c: 1,01073
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 8,0 kN
Deformação nominal: 1,55 mm
Deformação Marshall, F: 6,5 mm

Figura C.8 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 8 (5,0% de betume)



Estabilidade Marshall: 6,3 kN
Fator de correção, c: 0,99437
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 6,3 kN
Deformação nominal: 1,15 mm
Deformação Marshall, F: 4,8 mm

Figura C.9 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 9 (5,5% de betume)



Estabilidade Marshall: 7,7 kN
Fator de correção, c: 1,02557
Estabilidade de Marshall corrigida, S: 7,9 kN
Deformação nominal: 1,15 mm
Deformação Marshall, F: 5,3 mm

Figura C.10 - Dados do ensaio Marshall relativos ao provete 10 (5,5% de betume)