

ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE
ENGENHARIA DE LISBOA

ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA CIVIL



Estudo da Compactabilidade em Laboratório de Misturas Betuminosas com Resíduos Plásticos

PATRÍCIA LOURENÇO COSTA

Licenciada em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização em Vias de Comunicação e Transportes

Orientadoras:

Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista (Inv. Auxiliar do LNEC)
Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes (Prof. Coordenadora Principal do ISEL)

Júri:

Presidente:

Doutor Luciano Alberto Carmo Jacinto (Prof. Adjunto do ISEL)

Vogais:

Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva (Prof. Auxiliar da UM)
Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista (Inv. Auxiliar do LNEC)

Fevereiro de 2015

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo o estudo da compactabilidade em laboratório de misturas betuminosas com resíduos plásticos.

São analisadas misturas betuminosas incorporando três diferentes betumes modificados com polímeros utilizando três temperaturas de compactação diferentes. Para o fabrico dos provetes com este tipo de misturas, utilizaram-se dois equipamentos de compactação distintos, um amplamente utilizado em Portugal, o compactador de impacto, e outro, a nível internacional, o compactador giratório.

Iniciou-se este trabalho com um estudo de formulação tendo sido selecionado um betume modificado convencional e uma temperatura de compactação para moldar com o compactador de impacto os provetes destinados ao estudo formulação. Após a escolha da percentagem ótima de betume e da curva de agregados ótima para estas condições, fez-se um estudo de avaliação da compactabilidade utilizando os dois equipamentos de compactação referidos, o compactador de impacto e o compactador giratório, com os outros dois betumes modificados com resíduos plásticos reciclados e diferentes temperaturas de compactação. No caso do compactador giratório foi necessário proceder à calibração dos diversos parâmetros do equipamento, como o ângulo interno, pressão, altura, velocidade de rotação, entre outros. Analisou-se também a sensibilidade à água de provetes com estes betumes modificados.

Para complementar o estudo, moldaram-se lajes utilizando o compactador de rolo, com o objetivo de efetuar o ensaio de pista para avaliação da resistência à deformação permanente.

Os resultados obtidos mostram alguma variabilidade nas características volumétricas das misturas produzidas com o compactador de impacto. Relativamente à sensibilidade à água, em geral, apresentaram uma boa resistência conservada. As misturas com o betume modificado com polietileno de alta densidade apresentaram uma maior resistência à deformação permanente do que as misturas com betume modificado por espuma vinílica de acetato, que apresentou comportamentos atípicos na análise desta característica.

Pode admitir-se, com base nos resultados obtidos, que as misturas compactadas com a temperatura de 155°C e o betume modificado por espuma vinílica de acetato alcança um melhor desempenho que os restantes.

Palavras-Chave: Betumes modificados; Compactador de impacto; Compactador giratório; Misturas betuminosas; Polímeros; Resíduos plásticos.

ABSTRACT

The main objective of this dissertation is the laboratory study of compactness of bituminous mixtures with plastic waste.

Bituminous mixtures incorporating three different modified bitumen with polymers using three different compaction temperatures were analysed. To compact this kind of mixtures it was used two distinct compaction equipment, one widely applied in Portugal, impact compactor, and another, widely used at international level gyratory compactor.

This works starts with a formulation study with one chosen bitumen and compaction temperature to mould specimens to the formulation and using impact compactor. After choosing the optimum asphalt content and optimum gradation curve at this conditions, it was held a compactness evaluation using the two compaction equipment referred, impact compactor and gyratory compactor, with the other bitumen and compaction temperature. In the case of the gyratory compactor it was necessary to calibrate some parameters of equipment, as internal angle, pressure, height, rotation speed, between others. It was also analysed the water sensitivity with this modified bitumens and using impact compactor.

To complement the study, it was also moulded slabs using roller compactor, with the goal of accomplish the wheel tracking test to evaluate de resistance to the deformation.

The results show some variability in the volumetric characteristic in the mixtures produced with the impact compactor. Relatively to the values obtain in the water sensitivity test, in general, they present a good retained resistance. The mixtures with the bitumen modified by high density polyethylene show a better resistance to permanent deformation than those with the bitumen modified by ethylene vinyl acetate, which showed atypical behaviour in the analysis to this property.

It is possible to admit, based on the obtained results, that the mixtures compacted with the temperature of 155 °C and the bitumen modified by ethylene vinyl acetate, achieved better performance than the other ones.

Keywords: Bituminous mixtures; Impact compactor; Gyratory compactor; Modified bitumen; Polymers; Plastic waste.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi elaborado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), sob orientação da Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, Investigadora Auxiliar no LNEC, e da Professora Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes, Professora Coordenadora Principal no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL).

Agradeço, em primeiro lugar, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em particular à sua Direção, na pessoa do Investigador Coordenador Engenheiro Carlos Pina por todos os meios facultados. Agradeço igualmente à Direção do Departamento de Transportes (DT), na pessoa do Investigador Coordenador Engenheiro António Lemonde de Macedo, assim como à Direção do Núcleo de Infraestruturas de Transportes (NIT), na pessoa do Investigador Principal Engenheiro Eduardo Fortunato.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia que no âmbito do programa PTDC/ECM/119179: “PLASTIROADS – Desenvolvimento de Materiais Multifuncionais com Resíduos Plásticos para Pavimentação de Estradas”, financiou o presente estudo.

À CEPSA, na pessoa da Engenheira Teresa Carvalho, e à Alves Ribeiro, pelo fornecimento dos materiais, betume comercial e agregados respetivamente, indispensáveis à realização deste trabalho.

A todas as pessoas e entidades que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

Em particular desejo agradecer:

À minha orientadora, Doutora Fátima Batista, pelos conhecimentos transmitidos assim como pela exigência, amizade, disponibilidade e leitura crítica do documento.

À minha orientadora, Doutora Maria da Graça Lopes, pela confiança depositada em mim assim como por toda a disponibilidade e incentivo que sempre demonstrou.

À Universidade do Minho (UM), na pessoa do Professor Doutor Hugo Silva e Engenheira Liliana Costa, pelo fornecimento de dados importantes para a realização deste trabalho, assim como pelo caloroso acolhimento e simpatia demonstrados.

A todos os professores do Mestrado de Vias de Comunicação e Transportes do ISEL por todos os ensinamentos transmitidos ao longo do curso.

Ao Senhor Eduardo Coimbra, técnico do NIT/DT do LNEC, pelo acompanhamento dos ensaios, disponibilidade e dedicação sempre demonstrados.

Ao Nuno Nunes e Daniel Fernandes, técnicos do DT/NIT, pela ajuda e disponibilidade. Agradeço também aos restantes técnicos pelo apoio prestado sempre que foi solicitado.

Às restantes pessoas do DT/NIT pela motivação, entusiasmo e animação sempre presente, em especial à Carla Gil, ao Diogo Marques, à Joana Machado, ao Nuno Simão, ao Pedro Marcelino, à Vânia Marecos e ao Vítor Antunes.

Às minhas amigas, Inês, Marta, Sara e Silvianna, por toda a compreensão e apoio demonstrados ao longo da minha vida, em especial nos momentos mais difíceis do meu curso. Um agradecimento especial à Ana, Diana, João e Sara por toda a amizade, convivência e apoio demonstrados, assim como os restantes amigos e colegas do ISEL.

E por último, mas não menos importante, um agradecimento aos meus pais, irmã e à Ofélia pela incondicional paciência, motivação, apoio e carinho sempre demonstrados ao longo da minha vida.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA	5
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
2 MISTURAS BETUMINOSAS COM RESÍDUOS PLÁSTICOS	9
2.1 INTRODUÇÃO	9
2.2 GENERALIDADES SOBRE MISTURAS BETUMINOSAS	9
2.3 CONSTITUINTES DAS MISTURAS BETUMINOSAS TRADICIONAIS.....	15
2.3.1 <i>Agregados</i>	15
2.3.2 <i>Ligantes Betuminosos</i>	17
2.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS EM MISTURAS BETUMINOSAS.....	20
2.4.1 <i>Resíduos Plásticos</i>	20
2.4.2 <i>Misturas Betuminosas com Betumes Modificados com Resíduos Plásticos</i> ..	22
3 ESTUDOS LABORATORIAIS: MÉTODOS DE FORMULAÇÃO E PROCESSOS DE COMPACTAÇÃO	27
3.1 INTRODUÇÃO	27
3.2 MÉTODO DE MARSHALL (COMPACTADOR DE IMPACTO)	29
3.2.1 <i>Descrição do Método</i>	29
3.2.2 <i>Compactação com o Compactador de Impacto</i>	30
3.2.3 <i>Formulação da Mistura Betuminosa</i>	31
3.3 MÉTODO SUPERPAVE (COMPACTADOR GIRATÓRIO)	36
3.3.1 <i>Descrição do Método</i>	36
3.3.2 <i>Compactação com o Compactador Giratório</i>	41
3.3.3 <i>Formulação da Mistura Betuminosa</i>	47
3.4 OUTROS MÉTODOS PARA A COMPACTAÇÃO DE PROJETOS E PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS EM LABORATÓRIO	49
3.4.1 <i>Compactação com o Compactador de Rolo</i>	49
3.4.2 <i>Ensaio de Pista</i>	51
4 ESTUDO EXPERIMENTAL.....	53
4.1 INTRODUÇÃO	53

4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	54
4.2.1	<i>Agregados</i>	55
4.2.2	<i>Ligantes Betuminosos</i>	57
4.3	FORMULAÇÃO PELO MÉTODO DE MARSHALL	59
4.3.1	<i>Preparação dos Provetes</i>	59
4.3.2	<i>Compactação</i>	60
4.3.3	<i>Caracterização dos Provetes</i>	61
4.3.4	<i>Provetes Moldados com o Compactador de Impacto, com a Percentagem Ótima de Betume</i>	67
4.4	PROVETES MOLDADOS COM O COMPACTADOR GIRATÓRIO	70
4.4.1	<i>Calibrações do Equipamento</i>	70
4.4.2	<i>Primeiras Experiências com o Equipamento</i>	76
4.4.3	<i>Preparação dos Provetes</i>	79
4.4.4	<i>Compactação</i>	79
4.4.5	<i>Caracterização dos Provetes</i>	80
4.5	LAJES MOLDADAS COM O COMPACTADOR DE ROLO	82
4.5.1	<i>Preparação dos Provetes</i>	82
4.5.2	<i>Compactação</i>	83
4.5.3	<i>Caracterização dos Provetes</i>	84
4.6	OUTROS ENSAIOS EFETUADOS	86
4.6.1	<i>Sensibilidade à Água e Tração Indireta</i>	86
4.6.2	<i>Ensaio de Pista</i>	90
4.7	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS	93
4.7.1	<i>Porosidade</i>	94
4.7.2	<i>Compactador Giratório</i>	95
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	ANEXO	111
A.1	<i>FICHA TÉCNICA DO ELASTER 13/60 (PMB 45/80-60)</i>	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário.....	10
Figura 2.2 – Organigrama dos tipos de pavimentos rodoviários e sua constituição ...	11
Figura 2.3 – (1) Composição das misturas betuminosas; (2) Provede com uma mistura betuminosa; (3) Camada de desgaste de um pavimento rodoviário.....	12
Figura 2.4 – Envelhecimento do betume.....	18
Figura 2.5 – Processo de polimerização	21
Figura 3.1 – Compactador de impacto	31
Figura 3.2 – Composição esquemática de um provede	34
Figura 3.3 – Granulometria tipo do sistema Superpave – 0,45 <i>power chart</i>	39
Figura 3.4 – Curva granulométrica tipo do sistema Superpave	40
Figura 3.5 – Compactador giratório	41
Figura 3.6 – Ângulos internos e externos do compactador giratório.....	42
Figura 3.7 – Exemplo dos resultados iniciais do estudo do ângulo interno	43
Figura 3.8 – Comparação dos valores do ângulo interno utilizando moldes quentes e moldes frios	44
Figura 3.9 – <i>Dynamic Angle Validator II</i>	44
Figura 3.10 – Esquema operacional do DAV II	45
Figura 3.11 – Compactador de Rolo do LNEC.....	50
Figura 3.12 – Painel de controlo da pressão e do número de passagens do compactador de rolo	50
Figura 3.13 – Equipamento do ensaio de pista.....	51
Figura 4.1 – Composição da mistura de agregados.....	56
Figura 4.2 – Curva granulométrica.....	56

Figura 4.3 – Amostra dos plásticos adicionados aos ligantes betuminosos, à esquerda EVAr e à direita PEADr	58
Figura 4.4 – Separação dos agregados para formulação Marshall.....	60
Figura 4.5 – Misturadora com manta de aquecimento.....	60
Figura 4.6 – Compactador de impacto	61
Figura 4.7 – Provetes moldados para a formulação	61
Figura 4.8 – Provetes imersos e respetiva pesagem para cálculo da baridade	62
Figura 4.9 – Ensaio à compressão Marshall	63
Figura 4.10 – Gráfico resultante do ensaio à compressão Marshall	63
Figura 4.11 – Aspeto de um provete após o ensaio à compressão Marshall.....	64
Figura 4.12 – Ensaio da baridade máxima teórica	65
Figura 4.13 – Gráficos das características dos provetes de formulação Marshall	67
Figura 4.14 – Provetes Marshall com a percentagem ótima betume	68
Figura 4.15 – Gráficos com as características dos provetes Marshall	69
Figura 4.16 – Equipamento para calibração da pressão, à esquerda, e ficheiro da calibração da pressão, à direita	70
Figura 4.17 – Calibração do DAV II.....	71
Figura 4.18 – Registo da calibração do DAV II.....	71
Figura 4.19 – Verificação do ângulo do DAV II.....	72
Figura 4.20 – Pratos utilizados na calibração do ângulo do GC	73
Figura 4.21 – DAV II com o prato de 18° no topo	73
Figura 4.22 – Medição do ângulo no GC.....	74
Figura 4.23 – Gráfico EvA para calibração do ângulo GC	74
Figura 4.24 – Equipamento para calibração da altura, à esquerda, e ficheiro da calibração da altura, à direita	75
Figura 4.25 – Calibração da velocidade de rotação	75
Figura 4.26 – Provetes moldados com o GC com porosidade muito reduzida	76
Figura 4.27 – Evolução da altura do provete com o número de rotações.....	77

Figura 4.28 – Provete resultante da compactação com a base do molde incorretamente colocada	78
Figura 4.29 – Provete erradamente desmoldado	78
Figura 4.30 – Identificação dos provetes	79
Figura 4.31 – Compactador giratório com o molde de D = 100 mm	80
Figura 4.32 – Variação da % ρ_m com o número de rotações, no GC	81
Figura 4.33 – Preparação dos provetes para o compactador de rolo	83
Figura 4.34 – Misturadora para as lajes moldadas pelo compactador de rolo	83
Figura 4.35 – Compactador de rolo	84
Figura 4.36 – Laje do ELA compactado a 155°C	84
Figura 4.37 – Ensaio de baridade das lajes	85
Figura 4.38 – Ensaio de sensibilidade à água	87
Figura 4.39 – Ensaio de tração indireta	88
Figura 4.40 – Provetes após o ensaio de tração indireta	88
Figura 4.41 – Ensaio de <i>Pista</i>	90
Figura 4.42 – Gráficos dos resultados com o Ensaio de <i>Pista</i>	91
Figura 4.43 – Deformação pelo ensaio de pista nas lajetas EVA 155 e PEAD 130, respetivamente	92
Figura 4.44 – Valores obtidos para a percentagem da profundidade de rodeira	92
Figura 4.45 – Porosidade obtida nos provetes moldados nos diversos equipamentos	95
Figura 4.46 – Resistência conservada a seco	95
Figura 4.47 – Percentagem de baridade máxima teórica obtida para as diferentes percentagens de betume	96
Figura 4.48 – Propriedades dos provetes para as diferentes percentagens de betume	97

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Exigências relativas aos agregados	16
Quadro 2.2 – Exigências relativas aos betumes	18
Quadro 3.1 – Exigências relativas à classificação de betumes pelo Superpave	37
Quadro 3.2 – Designação dos peneiros do sistema Superpave.....	38
Quadro 3.3 – Definição do número de rotações em função do tráfego projetado.....	47
Quadro 3.4 – Requisitos para percentagem de VMA, no SGC	47
Quadro 3.5 – Requisitos para a percentagem de VFB, no SGC	48
Quadro 4.1 – Identificação das misturas betuminosas.....	54
Quadro 4.2 – Percentagem de material passado de cada fração.....	55
Quadro 4.3 – Resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados.....	57
Quadro 4.4 – Resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos ligantes betuminosos	58
Quadro 4.5 – Resultados dos ensaios das misturas betuminosas com as diferentes percentagens de betume ELA	65
Quadro 4.6 – Resultados dos ensaios das misturas betuminosas com a percentagem ótima de betume ELA, EVAr e PEADr	68
Quadro 4.7 – Ângulos para a calibração do DAV II.....	72
Quadro 4.8 – Valores obtidos para calibração do ângulo interno do GC.....	75
Quadro 4.9 – Evolução da altura do provete com o número de rotações.....	77
Quadro 4.10 – Resultados do GC.....	80
Quadro 4.11 – Número de rotações em função do tráfego projetado.....	81
Quadro 4.12 – Resultados do segundo grupo do GC	82
Quadro 4.13 – Porosidades das lajes moldadas pelo compactador de rolo	85

Quadro 4.14 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água, com os provetes moldados com o compactador de impacto89

Quadro 4.15 – Resultados do ensaio de tração indirecta, com os provetes moldados com o compactador giratório.....89

Quadro 4.16 – Resultados obtidos com o ensaio de pista.....92

Quadro 4.17 – Síntese dos resultados obtidos.....93

Quadro 4.18 – Resultados do GC96

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLOS

Letras Gregas

ρ_b	Baridade do provete
ρ_B	Massa volúmica do ligante
ρ_m	Baridade máxima teórica
$\% \rho_m$	Baridade relativa
ρ_w	Massa volúmica da água

Letras Romanas

B	Percentagem de ligante na mistura
c	Fator de correção pelo volume no Ensaio Marshall
d_{5000}	Taxa de deformação no ciclo 5000
d_{10000}	Taxa de deformação no ciclo 10000
F	Deformação do provete
ITS_d	Resistência à tração indireta dos provetes secos
IST_w	Resistência à tração indireta dos provetes imersos
ITSR	Resistência conservada em tração indireta
m_1	Massa do provete seco
m_2	Massa do provete saturado dentro de água
m_3	Massa do provete saturado com a superfície seca
M_a	Massa de agregados
M_b	Massa de betume
Mt	Massa total
N_{ini}	Número de rotações que correspondem a um valor pré-definido de $\% \rho_m$, depende de N_{des}
N_{des}	Número de rotações que correspondem a um valor pré-definido de $\% \rho_m$, varia com o tráfego considerado
N_{max}	Número de rotações que correspondem a um valor pré-definido de $\% \rho_m$, depende de N_{des}
PITS	Resistência máxima em tração indireta
PRDAIR	Percentagem da profundidade de Rodeira
Q	Quociente de Marshall
S	Resistência máxima no ensaio Marshall
V	Volume do provete
VFB	Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com ligante

VMA	Percentagem de vazios na mistura de agregados
Va	Volume de agregados
Vb	Volume de betume
Vm	Porosidade da mistura
Vt	Volume total
Vv	Volume de ar
WTS _{AIR}	Taxa de deformação média

SIGLAS

AC	Asphalt Concrete
ASECAP	Association Européenne des Concessionnaires d'Autoroutes et d'ouvrages à Péage
ASTM	American Society for Testing and Materials
BB	Betão Betuminoso
CETO-EP	Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal
CEN	Comissão Europeia de Normalização
DAV	Dynamic Angle Validation
DT	Departamento de Transportes
EN	European Standard
EP	Estradas de Portugal, SA
ESAL	Equivalent Single Axle Load
EUA	Estados Unidos da América
EVA _r	Espuma Vinílica Acetinada reciclada (Ethylene Vinyl Acetate)
EvA	Excentricidade vs Ângulo
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
FHWA	Federal Highway Administration
HMA	Hot Mix Asphalt
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
JAE	Junta Autónoma de Estradas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV	Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional
NIT	Núcleo de Infraestruturas de Transporte
NP	Norma Portuguesa
PEAD _r	Polietileno de Alta Densidade reciclado (High Density Polyethylene)
PG	Performance Grade
PMB	Betume Modificado com Polímeros (Polymer Modified Bitumen)
SGC	Superpave Gyratory Compactor
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	SUPERior PERforming asphalt PAVEMENT
UE	União Europeia
UM	Universidade do Minho
WSDOT	Washington State Department of Transportation

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A rede rodoviária constitui a infraestrutura mais importante para o desenvolvimento socioeconómico do país. Só em Portugal, a rede rodoviária de autoestradas tem quase 3000 km (ASECAP, 2014) de extensão, sendo que mais de 90% possui pavimentos do tipo flexível, ou seja, constituídos por camadas compostas por misturas betuminosas e camadas compostas por materiais granulares.

Uma mistura betuminosa é composta por uma mistura de agregados, incluindo filler, e um ligante betuminoso. Quando se trata de misturas tradicionais aplicadas a quente, os agregados e o ligante (ou seja, betume) são misturados em determinadas quantidades, previamente definidas, sendo depois aplicadas a quente numa camada de pavimento. Consoante o tipo de camada em que a mistura betuminosa será aplicada deverá ter as características estruturais e mecânicas adequadas.

O aumento do tráfego rodoviário, das cargas transportadas e a perspetiva de contínuo crescimento de volume de tráfego, a crise económica que se vive a nível mundial e as crescentes preocupações ambientais levam ao aparecimento de soluções de pavimentação inovadoras utilizando materiais que suportam maiores exigências colocadas aos pavimentos, melhorando a sua qualidade, conforto e segurança.

No âmbito da inovação em novas tecnologias de pavimentos betuminosos está a ser desenvolvido o projeto PLASTIROADS – Desenvolvimento de Materiais Multifuncionais com Resíduos Plásticos para Pavimentação de Estradas (PTDC/ECM/119179/2010), financiado pela FCT. Este projeto é coordenado pela UM e tem como parceiro o LNEC. No âmbito do referido projeto, estão a ser realizados estudos com vista ao desenvolvimento e otimização de misturas betuminosas fabricadas a quente, incorporando resíduos plásticos. Assim, uma das soluções aqui desenvolvidas consiste na incorporação de polímeros reciclados em misturas betuminosas. Este material pode ser aplicado nas misturas betuminosas por via húmida (polímeros utilizados na modificação prévia do betume), e por via seca (polímeros adicionados como agregados) (Kalantar, Z.N., *et al.*, 2012). Neste

trabalho utiliza-se a adição de polímeros ao ligante betuminoso por via húmida, realizada na UM.

A adição de polímeros ao ligante pode aumentar a resistência do betume (à deformação, ao fendilhamento, à desagregação, ao escoamento, ao envelhecimento, *etc.*), a temperaturas elevadas sem o tornar demasiado viscoso e a baixas temperaturas sem o tornar demasiado frágil (Giavarini, C., 1994).

O plástico é essencialmente constituído por cadeias moleculares de polímeros e tornou-se um material comum desde o início do século XX. Tem sido amplamente utilizado desde essa altura resultando depois em desperdício. A produção de plástico passou de 1,5 milhões de toneladas anuais em 1950 para 245 milhões de toneladas em 2008, das quais quase 25% são produzidas só na Europa (Comissão Europeia, 2013). Prevê-se que a produção mundial de plástico triplique até 2050 (Comissão Europeia, 2013). Os 10 milhões de toneladas de plásticos que acabam no fundo dos mares e oceanos todos os anos dão origem à chamada “sopa de plástico”, que afeta todo o ecossistema marinho e costeiro.

Uma das características dos plásticos é a sua elevada durabilidade, uma vez que este material demora centenas de anos a decompor-se. Quando se pensa nas características de um pavimento rodoviário pretende-se que este tenha um elevado desempenho, nomeadamente uma maior durabilidade. Assim, a incorporação de plásticos nas misturas betuminosas poderá ser uma boa solução, pois além de poder permitir um melhor desempenho nos pavimentos, também permitiria a reciclagem de um material que, se não tiver aplicação, prejudicará o planeta. Contribui-se assim para o aumento da sustentabilidade na Terra e a preservação do meio ambiente.

Existem já diversos estudos realizados sobre a incorporação de polímeros virgens em ligantes betuminosos, no entanto, em alguns casos, este processo torna o ligante mais dispendioso não compensando as melhorias obtidas no desempenho da mistura. Começou assim a surgir a aplicação dos polímeros reciclados nos betumes, conseguindo-se resultados semelhantes quando comparados com os polímeros virgem, tendo estes a vantagem de contribuírem para a redução do desperdício de plásticos (Agarwal, S. e Gupta, K.R., 2011).

No âmbito do projeto PLASTIROADS, procedeu-se, na UM, ao fabrico e consequente caracterização de diversos betumes modificados com resíduos plásticos (Costa, L., *et al.*, 2013b) tendo-se considerado oportuno desenvolver estudos mais aprofundados sobre misturas betuminosas com polímeros como o Espuma Vinílica Acetinada Reciclada (EVAR) e o Polietileno de Alta Densidade Reciclado (PEADr). É neste contexto que se desenvolve o presente trabalho, onde são estudadas, em laboratório, misturas betuminosas fabricadas

quer com betume modificado com EVAr, quer com o betume modificado PEADr. O EVAr é utilizado em equipamentos desportivos, em painéis com células fotovoltaicas, entre outros. É bastante utilizado devido à sua leveza e flexibilidade. O PEADr é utilizado em sacos de plástico, garrafas de plástico, tubos para águas prediais, entre outros. As suas principais características são a sua elevada densidade, assim como a sua capacidade de resistência a elevadas temperaturas. Serão também moldados provetes com o betume modificado Elaster, da CEPESA, de forma a ter uma base de comparação com um betume já comercializado.

Dos estudos já efetuados no âmbito do projeto PLASTIROADS, foram detetadas algumas dificuldades na compactação de misturas betuminosas fabricadas com polímeros provenientes da reciclagem de plásticos, devido ao facto de estes materiais apresentarem temperaturas de fusão ($\approx 130^{\circ}\text{C}/140^{\circ}\text{C}$) próximas ou mesmo dentro da gama de temperaturas geralmente recomendadas para a compactação de misturas betuminosas a aplicar nas camadas ligadas dos pavimentos (Costa, L., *et al.*, 2013b).

Assim, pequenas diferenças na temperatura de mistura e de compactação das misturas betuminosas com resíduos plásticos poderão ter uma grande influência na qualidade da mistura compactada final. Por este motivo irão ser estudadas misturas betuminosas compactadas com os diferentes betumes modificados com três temperaturas: 155°C , pois é a temperatura recomendada pelo fabricante para a compactação com o betume comercial e é uma temperatura acima da de fusão dos polímeros; 130°C , dentro da gama das temperaturas de fusão; e 110°C , abaixo da temperatura de fusão. Assim poderá ter-se uma ideia do comportamento destas misturas em diferentes temperaturas de compactação.

Para o estudo em laboratório das misturas betuminosas com betume modificado em resíduos plásticos, dar-se-á especial atenção às condições e métodos de mistura e compactação, e aos métodos de formulação das misturas betuminosas com polímeros reciclados, com vista à sua otimização.

Para o estudo da influência na compactabilidade destes betumes modificados nas misturas betuminosas é necessário moldar provetes. Em Portugal, o mais habitual é a utilização do compactador de impacto, no entanto, existem outros equipamentos que poderão representar melhor as condições de compactação em obra. Um exemplo é o *Superpave Gyrotory Compactor* (SGC), que surgiu nos EUA mas é já muito utilizado em diversos outros países, como a França, estando contemplado na gama de misturas betuminosas das normas europeias.

Relativamente ao processo de formulação, o método de Marshall é um dos mais utilizados atualmente em Portugal, e é um método empírico que surgiu na década de 30 do século XX, desenvolvido por Bruce Marshall. Vale-se da experiência existente possibilitando a aplicação de determinados parâmetros, como o nível de energia de compactação aplicado através do número de pancadas do compactador de impacto, para obter misturas betuminosas com propriedades adequadas. A maior vantagem deste método poderá tornar-se numa desvantagem quando aparecem materiais novos pois os parâmetros conhecidos poderão não ser os mais adequados para misturas betuminosas diferentes das tradicionais, por exemplo quando possuem na sua constituição um betume modificado.

Entre 1987 e 1993 foi desenvolvido, nos EUA, o *Strategic Highway Research Program* (SHRP), onde foram investidos 150 milhões de dólares para desenvolver novas técnicas de melhoria do desempenho e durabilidade dos pavimentos rodoviários. Parte desta investigação resultou num novo método de especificação dos materiais de pavimentação: o método SUPERPAVE (*SUPERior PERforming Asphalt PAVEMENTS*). É um método vastamente utilizado nos EUA, sendo que em 2002 já 46 estados (WSDOT, 2014) o aplicavam. Na Europa, o compactador giratório é já utilizado em países como a França, Espanha e Finlândia, sendo que poderá utilizar-se o método de formulação Marshall compactando depois as misturas com o compactador giratório.

Uma das grandes diferenças entre estes dois métodos é a forma de compactação. No compactador giratório aplica-se uma determinada pressão com um determinado ângulo a um provete que se movimenta com um determinado número de rotações enquanto no compactador de impacto aplica-se uma determinada pressão com um determinado número de vezes em cada uma das faces do provete.

Assim, quando são estudadas novas misturas com novos materiais, como é o caso do presente trabalho, torna-se necessário estudar não só o método de compactação mais adequado mas também o nível de energia de compactação aplicado.

Outro aspeto importante de fabrico e compactação de misturas está relacionado com as temperaturas aplicadas, que dependem do tipo de betume. O betume é um material viscoelástico, que endurece a baixas temperaturas ou quando lhe é aplicado uma carga durante um curto período de tempo, e viscoso a elevadas temperaturas ou quando lhe é aplicado uma carga mais prolongada. Consequentemente, as misturas betuminosas também têm o seu comportamento dependente da temperatura de mistura e de compactação. Assim, num estudo experimental é também importante avaliar a influência das temperaturas nas características da mistura compactada.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo do presente trabalho prende-se com o estudo da compactabilidade e desempenho em laboratório de misturas betuminosas que incorporem resíduos plásticos. Dentro deste objetivo será utilizado o método de formulação Marshall com dois equipamentos de compactação: o compactador de impacto e o compactador giratório. Serão estudados os efeitos da temperatura e dos tipos de compactação em cada mistura betuminosa. Por fim, serão realizados ensaios para avaliação do desempenho da mistura, nomeadamente o ensaio de pista e o ensaio de sensibilidade à água.

Será estudada uma mistura betuminosa do tipo AC 14 surf (BB), utilizando três tipos diferentes de betume, o Elaster 13/60 (PMB 45/80-60), um betume modificado comercial fornecido pela CEPSA, que servirá de base de comparação para com o betume 70/100 com 5% de EVA reciclado granulado, produzido na UM e o betume 70/100 com 5% de PEAD reciclado granulado, também produzido na UM.

Para a compactação das misturas betuminosas será utilizado o compactador de impacto e realizar-se-ão algumas experiências com o compactador giratório. Relativamente às temperaturas de compactação, como já foi referido anteriormente, serão utilizadas três diferentes para que se possa observar o comportamento das misturas com temperaturas acima, abaixo e dentro da gama das temperaturas de fusão dos polímeros que foram incorporados nos ligantes betuminosos a estudar.

A metodologia a utilizar neste trabalho pode ser resumida da seguinte forma:

- Pesquisa bibliográfica, com o objetivo de sintetizar e analisar os estudos já realizados sobre a aplicação de polímeros reciclados nas misturas betuminosas e resultados obtidos sobre o desempenho das mesmas;
- Pesquisa bibliográfica, com o objetivo de sintetizar e analisar os trabalhos efetuados com o compactador giratório e relação com o compactador de impacto;
- Desenvolvimento do estudo experimental para caracterização das misturas betuminosas com betumes modificados com resíduos plásticos:
 - Formulação pelo método de Marshall e compactador de impacto, utilizando o betume Elaster e compactação a 155°C;
 - Compactação de misturas betuminosas com o compactador de impacto usando a percentagem ótima de betume encontrada, com os dois outros betumes (EVA_r e PEAD_r) e as outras duas temperaturas de compactação (130°C e 110°C);

- Compactação de misturas betuminosas com o compactador giratório com os três betumes (Elaster, EVAr e PEADr) e utilizando as temperaturas de compactação consideradas mais adequadas;
- Compactação de misturas betuminosas com o compactador de rolo, com os três betumes (Elaster, EVAr e PEADr) e utilizando as três temperaturas de compactação (155°C, 130°C e 110°C);
- Caracterização volumétrica dos provetes e lajes moldadas.
- Caracterização mecânica dos provetes e lajes moldadas, utilizando o ensaio de sensibilidade à água e tração indireta e o ensaio de pista, respetivamente.

Todos os ensaios efetuados neste trabalho foram realizados no NIT/DT do LNEC.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo este primeiro o capítulo introdutório, onde se explica o seu enquadramento no contexto nacional, e internacional, assim como a sua importância a nível ambiental. São também apresentados os objetivos a atingir e a metodologia que será utilizada.

O capítulo 2, “Misturas Betuminosas com Resíduos Plásticos”, tem como objetivo a realização de um resumo introdutório deste tema expondo alguns estudos efetuados com estes materiais. Para tal, efetua-se uma breve introdução às misturas betuminosas, com especial incidência nas que utilizam betumes modificados. São ainda expostas as suas principais características e ensaios de caracterização. São referidos os resíduos plásticos com maior incidência nos polímeros que serão incorporados nas misturas betuminosas deste trabalho. E são apresentadas algumas conclusões de estudos existentes sobre betumes com polímeros.

O capítulo 3, “Estudos Laboratoriais: Métodos de Formulação e Processos de Compactação”, pretende resumir os processos de formulação e equipamentos utilizados no capítulo seguinte para o estudo experimental. Assim, apresentam-se os métodos de formulação e respetivos compactadores mais utilizados atualmente, com especial incidência no Método de Marshall e compactador de impacto, e no Método de Superpave e compactador giratório que serão utilizados no estudo experimental. Refere-se ainda o compactador de rolo que molda lajes necessárias para a realização de ensaios de desempenho das misturas, como o ensaio de pista.

No capítulo 4, “Estudo Experimental”, é apresentado o estudo experimental realizado, com a descrição dos ensaios realizados e dos resultados obtidos e onde é apresentado uma parte do trabalho já realizado na UM com relevância para este estudo. Este estudo pretende representar as condições reais de uma camada de pavimento. Assim, será avaliada a compactabilidade das misturas betuminosas utilizando diversos equipamentos e temperaturas de compactação, já referidos. Por fim, é feita uma síntese dos resultados obtidos.

Por último, no capítulo 5, “Conclusões e Trabalhos Futuros”, apresentam-se as principais conclusões do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

2 MISTURAS BETUMINOSAS COM RESÍDUOS PLÁSTICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Uma vez que o objetivo deste trabalho é o estudo da compactabilidade das misturas betuminosas com betumes modificados, considerou-se importante fazer uma breve introdução sobre os materiais estudados, tanto os agregados e ligantes betuminosos como os polímeros incorporados nestes últimos. É também focada a importância e urgência da reciclagem de resíduos plásticos e como podem ser incorporados nas misturas betuminosas.

2.2 GENERALIDADES SOBRE MISTURAS BETUMINOSAS

As misturas betuminosas consistem na mistura uniforme e homogênea de agregados (incluindo fíler) e ligante betuminoso que poderão ter, ou não, aditivos ou produtos especiais. Estas misturas são aplicadas principalmente nas camadas superiores dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos que são, habitualmente, dimensionados para uma vida útil de 20 anos, quando se trata de construção, ou 10 anos, quando se trata de reabilitação (MACOPAV, 1995). É, por isso, necessário que o material utilizado seja suficientemente resistente às ações dos agentes climáticos e do tráfego. Geralmente, por este motivo são utilizadas as misturas betuminosas pois, para além de apresentarem maior flexibilidade relativamente a outros materiais (por exemplo, misturas com ligantes hidráulicos), apresentam frequentemente uma melhor relação de durabilidade/custo. As misturas betuminosas devem ter assim, uma elevada durabilidade e versatilidade, para garantir o conforto e segurança necessários aos utentes da via.

Existem três principais tipos de pavimentos rodoviários: rígidos, flexíveis e semi-rígidos. Distinguem-se pela composição das suas camadas, sendo que os primeiros exigem uma manutenção inferior, durante a sua vida útil, mas um maior investimento, na sua aplicação inicial, ao invés dos flexíveis que exigem um menor investimento mas necessitam de uma manutenção mais frequente. A opção por um tipo de pavimento ou

outro é feita após a avaliação da sua exequibilidade em função das características do pavimento (por exemplo, traçado) e numa segunda fase após o dimensionamento dos mesmos e contabilização dos custos de construção e manutenção.

Relativamente aos pavimentos flexíveis, estes são constituídos por diversas camadas, desde a fundação até à superfície. Nas camadas superiores dos pavimentos flexíveis são utilizadas misturas betuminosas que poderão ser aplicadas a quente, a frio ou o intermédio dos dois, misturas betuminosas temperadas. Todas estas misturas têm as suas diferentes vantagens que deverão ser avaliadas quando se dimensiona um pavimento. As características da camada de desgaste de um pavimento dependem do tipo e da natureza dos materiais constituintes, da idade e do tipo de utilização do pavimento, assim como dos agentes climáticos que o pavimento suporta (Azevedo, M.C., 2009). Esta camada de desgaste contribui para a durabilidade da estrutura do pavimento e para a estanquidade à água das chuvas (Azevedo, M.C., 2009) assim como para o conforto e segurança dos utentes da via.

Um pavimento flexível assenta no leito do pavimento ou diretamente na fundação e inclui as camadas betuminosas e granulares como se pode observar no esquema representado na Figura 2.1. Consoante o tipo de pavimento (flexível, semi-rígido ou rígido), a estrutura do pavimento poderá sofrer algumas alterações nomeadamente nos materiais aplicados.

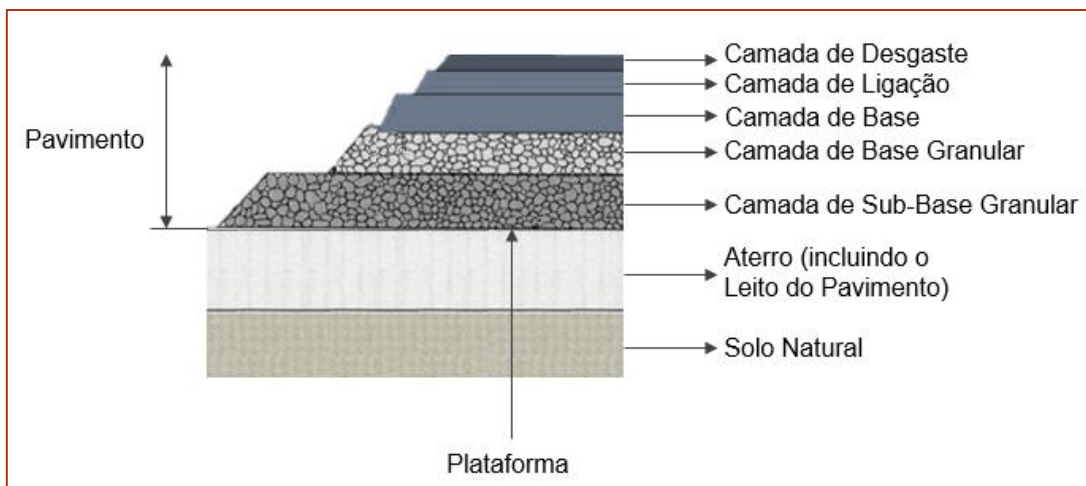


Figura 2.1 – Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (adaptado de Azevedo, M.C., 2009)

Para o dimensionamento de um pavimento é habitual utilizar, em Portugal, o Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV, 1995), onde são previstos os principais tipos de pavimentos existentes.

No organigrama representado na Figura 2.2 poderão observar-se os materiais mais comuns que são aplicados na camada de betuminoso dos pavimentos flexíveis, e utilizados neste trabalho.

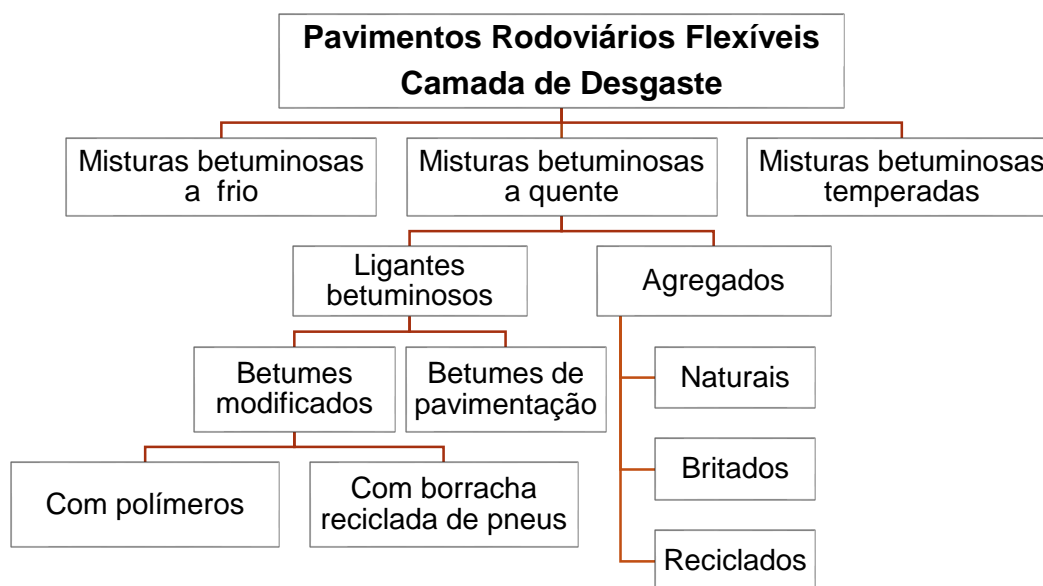


Figura 2.2 – Organigrama dos tipos de pavimentos rodoviários e sua constituição

As misturas betuminosas a quente aplicadas nas camadas de desgaste, entre outras, dos pavimentos flexíveis podem ser constituídas pela mistura de agregados e fíler com betume modificado. Os agregados podem ter origem natural ou britada e o ligante betuminoso pode ser um betume tradicional ou modificado, entre outros. As propriedades dos agregados e betumes serão abordados de forma mais aprofundada nas seções seguintes.

Quando se estuda um novo material é essencial produzir amostras do mesmo para verificar a sua viabilidade. Na Figura 2.3 é possível observar em que consiste uma mistura betuminosa de forma esquematizada, com as proporções de cada elemento (1). Geralmente, mais de 80%, em volume, de uma mistura betuminosa é constituída por agregados, sendo que uma pequena percentagem destes absorve o betume quando são misturados. O grau de absorção dependerá da porosidade dos agregados, consistência do betume e trabalhabilidade da mistura. Na segunda imagem (2) da Figura 2.3 está representado um provete resultante de ensaios laboratoriais. Estes estudos servem para que seja possível estudar determinadas composições e realizar diversos ensaios para testar a viabilidade da composição escolhida. Por fim (3), aparece a camada de desgaste de um pavimento rodoviário, que poderá ser o destino final da mistura betuminosa, após a sua formulação.



Figura 2.3 – (1) Composição das misturas betuminosas; (2) Provete com uma mistura betuminosa; (3) Camada de desgaste de um pavimento rodoviário (adaptado de Gannasphalt, 2014)

As exigências de desempenho impostas às misturas betuminosas são muito diferentes entre elas. Devem resistir à deformação e ao fendilhamento, ser duráveis ao longo do tempo, resistir à ação da água, proporcionar uma boa superfície de aderência, e ainda serem pouco dispendiosas, de fabrico rápido e colocação fácil. Face a estas exigências, é possível atuar sobre as seguintes 3 variáveis (WSDOT, 2014):

- Agregado: é possível escolher diversos tipos e tamanhos para ter as propriedades de granulometria, dureza, resistência à abrasão, durabilidade, forma, textura e limpeza pretendidas;
- Ligante Betuminoso: pode-se escolher um ligante betuminoso com ou sem aditivos e com diferentes propriedades como a durabilidade, reologia, pureza e agentes modificadores (no caso de um betume modificado);
- Proporção entre o Agregado e o Ligante Betuminoso: após a escolha do tipo de agregado e ligante betuminoso, é necessário decidir qual a proporção de cada um. Esta proporção tem um efeito profundo no desempenho da mistura. Devido às grandes diferenças em geral encontradas entre as baridades dos agregados e dos ligantes, a proporção do ligante betuminoso expressa em percentagem do peso total pode variar muito, mesmo que o volume de ligante como percentagem total de volume permaneça constante.

Ao atuar nas variáveis de agregados, ligantes e a proporção entre os dois, a formulação de misturas procura um produto final com boa estabilidade, durabilidade, impermeabilidade, trabalhabilidade, flexibilidade e resistência à fadiga.

As misturas betuminosas têm de ter suficiente quantidade de ligante para assegurar uma boa durabilidade, uma quantidade moderada de ligante que não prejudique a resistência às ações mecânicas, uma percentagem suficientemente elevada de vazios de

modo a evitar a exsudação de betume mas, não tão elevada que provoque o aparecimento de deformações permanentes, uma suficiente trabalhabilidade que permita o espalhamento da mistura e boas características de desempenho estrutural e funcional.

A estabilidade de uma mistura é a sua aptidão de resistir, com pequena deformação, às cargas provocadas pelo tráfego. Um pavimento estável mantém a sua forma sob a repetida ação de cargas, um pavimento instável desenvolve deformações, como rodeiras e ondulações, e outros sinais de instabilidade. Esta característica depende em grande parte do atrito interno e coesão. O atrito interno está especialmente relacionado com a forma e textura dos agregados e o seu imbricamento. Já a coesão resulta essencialmente da afinidade entre o agregado e o ligante. O atrito interno e coesão adequados previnem as partículas de agregado de se deslocarem umas sob as outras quando são aplicadas cargas. Quanto mais angulares e rugosos forem os agregados maior será a estabilidade da mistura. A coesão é influenciada pela quantidade de ligante e aumenta com a carga do tráfego, quando a viscosidade aumenta ou quando a temperatura do pavimento diminui. Quando se aumenta a percentagem de betume, a coesão entre partículas também é maior até um certo ponto em que a camada de ligante que envolve as partículas fica demasiado espessa, resultando na diminuição do atrito interno (InDOT, 2013).

A durabilidade de uma mistura é a capacidade do pavimento de resistir à sua desintegração, que pode ser provocada pela ação dos agentes climáticos, do tráfego, ou uma combinação de ambos. Pode ser melhorada utilizando uma maior quantidade de ligante e um agregado de granulometria contínua de forma a obter a máxima impermeabilização. Uma maior espessura de betume a envolver os agregados resulta num envelhecimento e secagem mais lentos, tendo como consequência a conservação das características do ligante. Um maior teor em betume resulta na diminuição do tamanho de vazios e na selagem dos canais de comunicação entre eles tornando difícil a penetração da água e do ar e aumentando a durabilidade do pavimento. Uma granulometria densa de agregados rígidos contribui para a durabilidade do pavimento ao oferecer um contacto mais próximo entre as partículas de agregados, o que aumenta a impermeabilidade da mistura e a resistência à desagregação sob a ação do tráfego (InDOT, 2013).

A impermeabilidade é a aptidão que uma mistura betuminosa tem de resistir à passagem do ar e da água através de si. Esta característica está diretamente relacionada com a porosidade da mistura compactada, não só pela quantidade de vazios mas pela forma como estão dispostos, se estão ou não interligados, o seu tamanho e se têm contacto com superfície do pavimento. Apesar de esta característica ser importante para a durabilidade de uma mistura, praticamente todas as misturas utilizadas em pavimentação

são impermeáveis até um determinado ponto, sendo por isso aceitável aplica-las desde que a porosidade esteja dentro de alguns valores (InDOT, 2013).

A trabalhabilidade pode ser caracterizada pela facilidade com que uma mistura é colocada e compactada. Esta característica varia ao alterar as quantidades da mistura, a origem dos agregados ou a sua granulometria. Uma mistura com um agregado mais grosseiro tem tendência a separar-se durante o seu manuseio e pode ser difícil de compactar. Já uma mistura com mais finos pode causar que esta seja mais dura ou viscosa, tornando a compactação mais difícil. Esta característica é especialmente importante na colocação e compactação à volta de buracos, curvas acentuadas ou outros obstáculos. As misturas menos rígidas são demasiado instáveis para colocar e compactar propriamente. Este problema é causado frequentemente pela falta de um filer, demasiada areia de tamanho médio, agregados arredondados e pouco rugosos, ou excesso de humidade na mistura. Apesar de não ser a principal propriedade que influencia os problemas de trabalhabilidade, o ligante tem também algumas consequências devido à sua temperatura afetar a sua viscosidade. Temperaturas muito baixas fazem a mistura ficar mais rígida e menos trabalhável. O tipo de ligante também pode afetar a trabalhabilidade, assim como a sua percentagem (InDOT, 2013).

A flexibilidade é a habilidade de uma mistura de se ajustar aos graduais assentamentos e movimentos das subcamadas sem fendilhar. Visto que praticamente todas as subcamadas ou assentam (quando sob a ação de cargas) ou aumentam (devido à expansão do solo), a flexibilidade é uma característica desejada para todos os pavimentos betuminosos. Uma granulometria descontínua com um maior volume de ligante é geralmente mais flexível que uma granulometria uniforme com uma baixa quantidade de betume. Às vezes, a necessidade de flexibilidade entra em conflito com os requisitos de estabilidade, sendo necessário estudar qual o mais essencial em cada caso (InDOT, 2013).

A resistência à fadiga é a resistência do pavimento a repetidas flexões sob as cargas de rodas (tráfego). A porosidade da mistura e a viscosidade do ligante têm um efeito significativo na resistência à fadiga. Quando a percentagem de vazios da mistura aumenta, quer por ser assim definido na formulação quer por falta de compactação, a vida do pavimento é drasticamente reduzida. Um pavimento que contenha um ligante que envelheceu e solidificou significativamente, tem uma reduzida resistência à fadiga. Os pavimentos mais espessos e bem suportados não fletem tanto, sob carga, como os pavimentos pouco espessos ou pouco suportados. Assim, pavimentos espessos e com um bom suporte têm tempos de serviço maiores (InDOT, 2013).

2.3 CONSTITUINTES DAS MISTURAS BETUMINOSAS TRADICIONAIS

2.3.1 AGREGADOS

De acordo com as definições constantes das normas europeias, agregado é 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 (CETO-EP, 2014).

Independentemente da origem, método de extração ou mineralogia, é esperado que o agregado tenha um bom esqueleto pétreo que resista à ação do tráfego. Agregados angulosos de textura rugosa têm maior resistência devido ao imbricamento das partículas entre si. As partículas de agregados mais arredondados têm tendência a deslizar umas sob as outras. Se se aplicar uma carga a uma camada de agregados arredondados irá resultar uma deformação da massa pois estes irão deslizar para a superfície. O material agregado que constitui as misturas betuminosas para pavimentação rodoviária é geralmente da ordem de 90 a 95% do seu peso, correspondendo a valores de 75 a 85% do seu volume (Branco, F., *et al.*, 2006).

Os agregados a utilizar em misturas betuminosas têm de cumprir os requisitos definidos pela norma europeia harmonizada EN 13043. Estes materiais devem ser provenientes de rochas duras, apresentar uma granulometria adequada, serem resistentes à fragmentação e rotura provocadas pela ação do tráfego e exibirem uma boa forma. Para além de ser obrigatório cumprirem os requisitos desta norma, devem também cumprir os limites estabelecidos no respetivo caderno de encargos, por exemplo o Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal (CETO-EP, 2014).

Algumas das exigências fundamentais referidas anteriormente e que serão verificadas neste trabalho são as apresentadas no Quadro 2.1, onde são referidas as normas utilizadas para cada um destes ensaios e onde é também apresentado um breve resumo dos mesmos.

Quadro 2.1 – Exigências relativas aos agregados

Ensaio	Norma	Procedimento
Granulometria: Peneiração	EN 933-1	Consiste em passar uma porção de agregados secos por uma série de peneiros de malha quadrada, de forma a separa-los em várias frações de tamanho decrescente.
Forma: Índice de Achatamento	EN 933-3	Consiste em passar cada fração de agregados por uma série de peneiros de barras com diferentes dimensões.
Limpeza: Equivalente de Areia	EN 933-8	Consiste em introduzir uma amostra da fração 0/2 mm, num cilindro graduado, juntamente com uma solução de lavagem seguido de agitação do cilindro de forma a quebrar as ligações entre as partículas. No fim, é medida a altura dos sedimentos depositados no fundo e das partículas em suspensão.
Qualidade dos Finos: Azul-de-metileno	EN 933-9	Consiste em adicionar uma solução de azul-de-metileno a uma suspensão da amostra em água. A absorção do corante pela amostra é verificada através da realização de um teste de manchas que deteta a presença do corante livre.
Resistência: Los Angeles	EN 1097-2	Consiste em submeter uma amostra de agregados a um determinado número de rotações, juntamente com uma carga de esferas de aço. No fim, o material que passa no peneiro 1,6 mm é considerado desgastado.
Baridade e Volume de Vazios	EN 1097-3	Consiste em pesar um recipiente com e sem uma amostra de agregados secos e a partir destes valores calcular-se a baridade e o volume de vazios.

2.3.2 LIGANTES BETUMINOSOS

O betume é um material muito viscoso ou quase sólido (à temperatura ambiente), aparentemente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo ou de origem natural, que é solúvel ou quase solúvel no tolueno (E80, 1997).

É um material viscoelástico o que significa que tem propriedades de um material viscoso, que permite que se comporte como um fluido, assim como propriedades de um material elástico, como a borracha. A propriedade que o ligante exibe depende da temperatura e do tempo de carga. O comportamento viscoso de um betume pode ser o mesmo para 1 hora a 60°C como 10 horas a 25°C. Isto significa que os efeitos do tempo e da temperatura estão relacionados; o comportamento a altas temperaturas em curtos períodos de tempo pode ser equivalente ao que ocorre com baixas temperaturas em longos períodos de tempo.

O fabrico e aplicação de misturas betuminosas obriga a que o betume se encontre fluido. Por este motivo, para aplicação de misturas betuminosas a quente, é necessário aquecer o betume a elevadas temperaturas. Existem outros métodos de fluidificação dos ligantes como as emulsões ou a dissolução em solventes voláteis (os “*cut-back*”).

Um betume é constituído por muitos elementos que podem ser essencialmente divididos em dois grandes grupos, os asfaltenos e os maltenos. Os asfaltenos são um material insolúvel e representam cerca de 5% a 25% da composição do betume (Shell, 2003). Quanto maior a quantidade de asfaltenos mais duro será o betume. Os maltenos podem ser subdivididos em saturados, aromáticos e resinas. Apresentam-se no estado líquido ou viscoso, sendo a sua percentagem no betume igual ou superior a 75% (Shell, 2003).

O envelhecimento do betume é um fenómeno causado, principalmente, pela perda dos maltenos do betume, e resulta no aumento da sua viscosidade e rigidez, bem como a perda de ductilidade e de adesividade entre o betume e o agregado o que dá origem a uma diminuição de flexibilidade tendo por consequência o aumento da suscetibilidade do pavimento ao fendilhamento e à penetração da água (Pellinen, T., *et al.*, 2008). A perda dos maltenos ocorre por evaporação devido ao aquecimento do betume.

Na prática, grande parte do processo de envelhecimento ocorre antes da colocação do betume, designado por envelhecimento de curta duração. No entanto, também acontece durante a vida do pavimento devido à exposição ao ar e água, envelhecimento de longa duração.

Na Figura 2.4 pode observar-se a curva do índice de envelhecimento, em cima, e a variação do peso de cada componente do ligante ao longo do tempo de serviço do pavimento.

A reologia é a ciência que estuda a fluidez e deformação da matéria. As características reológicas de um betume são determinadas pela sua constituição química e pela estrutura das moléculas no material.

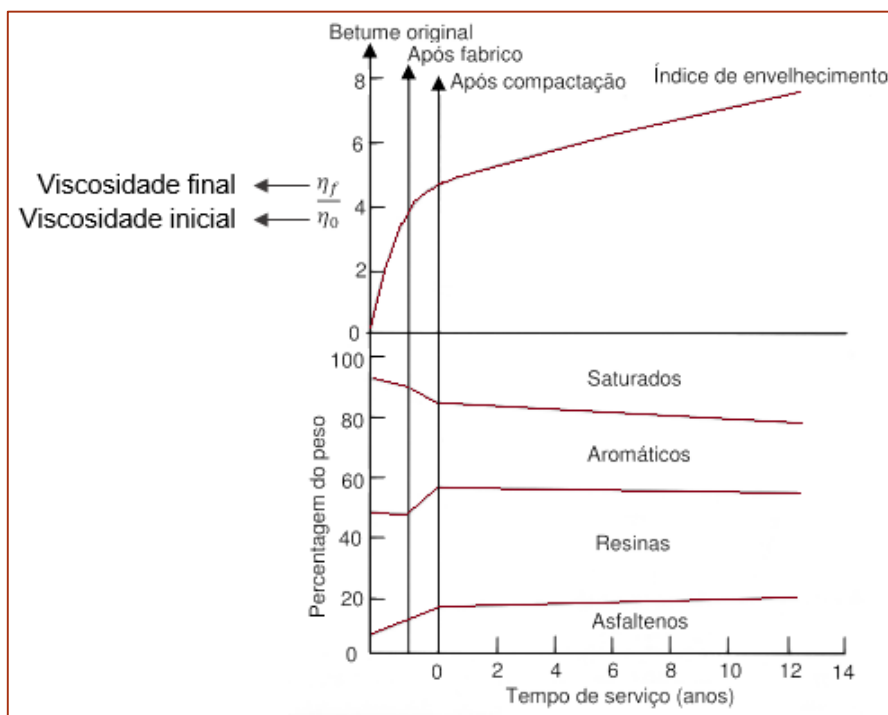


Figura 2.4 – Envelhecimento do betume (adaptado de Shell, 2003)

Algumas das exigências fundamentais referidas anteriormente e que serão verificadas neste trabalho são as apresentadas no Quadro 2.2, onde são referidas as normas utilizadas para cada um destes ensaios e onde é também apresentado um breve resumo dos mesmos.

Quadro 2.2 – Exigências relativas aos betumes

Ensaio	Norma	Procedimento
Penetração a 25°C	EN 1426	Consiste em colocar uma pequena amostra de betume dentro de um recipiente a 25°C durante 5 segundos e, utilizando uma agulha, aplicar uma carga de 100 g. A penetração é a distância, em décimas de milímetro (0,1 mm) que a agulha penetra.

Quadro 2.2 – Exigências relativas aos betumes (continuação)

Ensaio	Norma	Procedimento
Temperatura de amolecimento	EN 1427	Consiste em colocar a amostra do betume dentro de um anel submerso e colocar uma esfera de aço sobre a amostra, aquecendo-se a água a 5°C/min. Por fim mede-se a temperatura do líquido no momento em que a esfera encontra a placa de base.
Resiliência	EN 13880-3	Consiste em aplicar um deslocamento de 10 mm com uma esfera metálica a uma velocidade de 1 mm/s numa amostra de betume a 25°C. O valor de resiliência é a medida da redução percentual da penetração (recuperação elástica) da amostra que ocorre em 20 segundos.
Viscosidade Cinemática	EN 13302	Consiste em fazer uma amostra de betume, aquecida a 130, 150 e 180°C, escoar por um orifício até encher 60 ml do recipiente colocado por baixo, utilizando o viscosímetro rotacional. O valor da viscosidade corresponde ao tempo que o betume demora a escoar.
Estabilidade ao armazenamento	EN 13399	Consiste em encher tubos de alumínio com amostra de betume e armazená-los a 180°C durante 72 horas. De seguida colocam-se os tubos a -10°C durante 30 minutos e divide-se a amostra em 3 partes. Por fim, realizam-se ensaios de caracterização (penetração, ponto de amolecimento e viscosidade) de forma a verificar se não há grandes diferenças entre as propriedades do topo e da base.

2.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS EM MISTURAS BETUMINOSAS

2.4.1 RESÍDUOS PLÁSTICOS

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define o plástico como uma matéria que tem como componente essencial uma substância orgânica de elevado peso molecular, que é sólida no seu estado final, e que pode ser moldada quando está em estado fluido. Esta definição não inclui a adição de aditivos, resina, revestimentos ou tratamentos que são incorporados na maioria dos plásticos e são o que se encontra quando se recolhe plásticos para reciclagem (Merrington, A., 2011).

A indústria dos plásticos está em terceiro lugar entre todas as indústrias no mundo (Merrington, A., 2011). O plástico é um material barato e muito versátil, tendo tido um crescimento exponencial no século XX. Além da sua versatilidade tem uma elevada durabilidade, sendo também um material muito resistente. Consequentemente, a sua decomposição pode levar centenas de anos e, devido à sua elevada produção em todo o mundo, os resíduos plásticos têm aumentado. Enquanto os ambientalistas manifestam a sua crescente preocupação sobre as consequências dos resíduos plásticos no ambiente, os consumidores requerem mais e melhores produtos para simplificar as suas vidas. Prevê-se, por isso, o contínuo crescimento desta indústria que, com uma previsão mundial de nove mil milhões de pessoas em 2050 (Comissão Europeia, 2013), não demonstra qualquer sinal de abrandar.

As mesmas características que tornam o plástico tão útil, como a durabilidade, leveza e relativamente baixo custo, tornam problemática a sua eliminação. Assim o futuro desta indústria tem obrigatoriamente de passar pela reciclagem e reutilização dos plásticos produzidos.

Independentemente da forma como os resíduos plásticos sejam tratados, é imperativo que sejam minimizados. O futuro desta indústria tem de passar, inevitavelmente, por uma forma de eliminar a maior percentagem possível de resíduos produzidos. A forma mais simples de o fazer é através da sua reciclagem e reutilização.

No ano de 2008, calcula-se que tenham sido gerados na União Europeia (UE) cerca de 25 milhões de toneladas (Mt) de resíduos de plástico sendo que apenas 5,3 Mt (21,3 %) foram recicladas. Só em sacos de plástico, emblemáticos da sociedade de consumo em que vivemos atualmente, foram comercializados na UE 95,5 mil milhões sendo que apenas 8% foi utilizado mais que uma vez (Comissão Europeia, 2013).

A reciclagem de plásticos tem aumentado anualmente desde que há registro. No entanto, o ritmo de reciclagem não acompanha o ritmo a que os plásticos são produzidos. A reciclagem de plásticos tem sido descrita como o processo de recuperação de resíduos plásticos e reprocessamento do material em produtos úteis, às vezes completamente diferente da sua forma original (Merrington, A., 2011).

Para melhor compreender os plásticos e a sua reciclagem é necessário perceber a sua composição. Um plástico é composto por uma elevada percentagem de polímeros fabricados sinteticamente, contém também outros materiais como resinas, entre outros. Nos polímeros, esta estrutura é composta por uma série de unidades repetidas. Estas unidades são conhecidas como “monómeros”.

O processo de combinar monómeros em cadeias muito longas, os polímeros, é designado por polimerização. A maioria das vezes este processo é feito utilizando calor e pressão, como se pode observar, esquematicamente, na Figura 2.5.

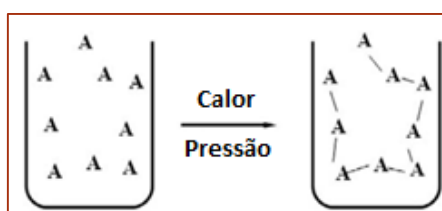


Figura 2.5 – Processo de polimerização (adaptado de Cantor, K.M. e Watts, P., 2011a)

Os polímeros podem ser divididos em três categorias, consoante as suas propriedades físicas: termorrígidos, termoplásticos e elastómeros.

Os termorrígidos são um material de elevada dureza e muito resistentes às variações de temperatura. De uma forma geral não são reutilizáveis pois o aquecimento provoca a sua deformação antes da sua fusão.

Os termoplásticos são os mais utilizados. Amolecem sob a ação do calor, fundindo-se antes de inflamarem. É, por isso, possível a sua reciclagem pois as propriedades mecânicas são reversíveis quando aplicadas elevadas temperaturas. São muito versáteis e têm inúmeras aplicações como a canalização de edifícios, brinquedos ou material hospitalar, entre outros. É por isso um dos tipos de plástico mais encontrado no mercado. Os termoplásticos têm muitas das propriedades físicas da borracha, por exemplo, a suavidade, flexibilidade e resiliência. Contudo, atingem as mesmas propriedades através de solidificação. A principal vantagem dos termoplásticos é que podem ser derretidos e solidificados rapidamente através de um processo reversível onde se aplique calor ou frio.

Os elastómeros são uma categoria intermédia dos anteriores. Não é possível fundi-los mas apresentam uma elevada elasticidade quando submetidos a temperaturas mais elevadas. A sua reciclagem é complicada devido à impossibilidade de fusão. São semelhantes à borracha natural.

Para o estudo do comportamento dos polímeros é necessário conhecer a sua reologia e relação com a temperatura e pressão, tal como com os ligantes betuminosos.

A viscosidade é a deformação permanente de um líquido com a força aplicada. No caso dos polímeros, a viscosidade ocorre quando as ligações moleculares deslizam umas sobre as outras livremente. Quando a temperatura do polímero aumenta, a viscosidade diminui o que provoca a criação de vazios entre as moléculas e conseqüente aumento de volume. As moléculas podem fluir umas pelas outras mais facilmente quando há um maior volume de vazios.

Os polímeros, que serão misturados no betume para aplicar nas misturas betuminosas no âmbito deste trabalho são o EVA reciclado granulado e o PEAD reciclado granulado.

O EVA é um termoplástico flexível, cuja temperatura de fusão se situa entre os 72°C e 102°C (Honeywell, 2005) podendo ser um problema na mistura com o ligante devido a estes poderem serem aquecidos a temperaturas até 155°C, neste trabalho.

De todos os polímeros, o Polietileno (PE) é um dos mais conhecidos e utilizados e é fabricado através da polimerização do monómero de etileno. Os polietilenos podem ser de Baixa Densidade (PEBD) ou de Alta Densidade (PEAD), sendo que neste trabalho serão utilizados os últimos. O PEAD é um termoplástico rígido, cuja temperatura de fusão se situa entre os 120°C e os 130°C (Holden, G., 2011).

2.4.2 MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS PLÁSTICOS

O desempenho dos pavimentos pode ser melhorado utilizando betumes modificados com polímeros (PMB). No entanto, muitos dos polímeros utilizados neste sentido são materiais virgens, com custos mais elevados que os reciclados, e, nalguns casos, tornam o betume assim modificado mais caro que um tradicional. Assim, a utilização de polímeros reciclados é uma solução, conseguindo-se obter resultados equivalentes, desde que seja feita uma adequada seleção dos polímeros, do betume e das suas condições de produção, para além de ajudar a reduzir o desperdício de plásticos e melhorar o desempenho dos pavimentos, tornando o produto final mais económico.

Em climas quentes, a deformação, e em climas frios, o fendilhamento, estão relacionados com a sensibilidade do betume às variações de temperatura e cargas de tráfego. Assim, um maior tráfego requer um betume com uma elevada capacidade de suporte das cargas, que tenha baixa suscetibilidade às variações de temperatura e elevada adesão aos agregados. Algumas melhorias nas propriedades do betume podem ser feitas selecionando um processo adequado de fabrico sendo, no entanto, esta propriedade muito difícil de controlar. Consequentemente, começou-se a modificar os betumes incorporando diversos aditivos. Os polímeros têm sido utilizados no betume desde 1843. No anos 1950 os EUA começaram a utilizar a borracha e a Europa, no fim dos anos 1970, começou a utilizar polímeros mas de forma limitada devido aos elevados custos (Attaelmanan, M., *et al.*, 2011).

A adição de polímeros ao ligante pode aumentar a resistência do betume (à deformação, ao fendilhamento, à desagregação, ao escoamento, ao envelhecimento, *etc.*), a temperaturas elevadas sem o tornar demasiado viscoso e a baixas temperaturas sem se tornar demasiado quebradiço (Giavarini, C., 1994).

A modificação de betumes com polímeros ou resíduos plásticos tem permitido obter misturas betuminosas com um melhor desempenho, nomeadamente uma maior resistência à deformação permanente e uma maior rigidez a temperaturas elevadas, uma menor suscetibilidade à variação da temperatura. Em alguns casos também se verificou uma melhor resistência à fadiga, dependendo do tipo de polímeros utilizados, o que influencia as propriedades reológicas do betume (Costa, L., *et al.*, 2013b).

Como os polímeros utilizados na modificação do betume são relativamente caros, a quantidade a utilizar tem de ser pequena. Polímeros reciclados mostraram resultados similares na melhoria do desempenho das camadas betuminosas de pavimentos rodoviários quando comparadas com os polímeros virgens (Costa, L., *et al.*, 2013a). Do ponto de vista económico e ambiental, utilizar polímeros reciclados como agente modificador pode melhorar o desempenho do pavimento e também contribuir para a resolução do problema da eliminação de resíduos plásticos. Os polímeros utilizados para modificar os betumes são os elastómeros e os plastómeros pois, à temperatura ambiente, podem aumentar a rigidez do betume e proporcionar uma mistura com viscosidade adequada.

As principais razões para modificar ligantes com polímeros podem ser sumarizadas como as seguintes (Lewandowski, L.H., 1994):

- Obter misturas mais viscosas, a baixas temperaturas, e reduzir o fendilhamento;

- Atingir misturas mais rígidas a altas temperaturas e reduzir as deformações;
- Aumentar a estabilidade e fortalecer a mistura;
- Melhorar a resistência à abrasão das misturas;
- Melhorar a resistência à fadiga das misturas;
- Melhorar a resistência à oxidação e ao envelhecimento;
- Reduzir a espessura dos pavimentos através da melhoria das características dos materiais;
- Reduzir os custos de vida dos pavimentos.

A maior preocupação com estes betumes modificados tem sido a melhoria da estabilidade e da compatibilidade entre o betume e o agregado através da otimização da formulação da mistura. Uma das formas utilizadas, por Hayner, R.E. (2000) para melhorar as propriedades da mistura foi a adição de dois polímeros diferentes permitindo assim atingir as propriedades desejadas.

Existem duas formas para incorporar os polímeros nos ligantes: o método húmido que consiste na adição do polímero em estado viscoso, ao betume, sendo um processo relativamente simples e fácil; ou o método seco que consiste na adição do polímero em estado sólido, sendo um método mais complexo pois requer que os dois sejam misturados para que os polímeros sejam uniformemente dispersos no betume.

Quando se adicionam polímeros ao ligante, as propriedades de betumes modificados com polímeros dependem de diversos parâmetros:

- Características do polímero;
- Características do betume;
- Condições de mistura;
- Compatibilidade entre o polímero e o betume.

Para ser eficaz, um polímero deve ser misturado no betume e aumentar a resistência às variações de temperatura. Deve também ser compatível com o betume para não causar a sua separação durante o armazenamento, transporte, aplicação e tempo de serviço. Além disso, o polímero deve ser rentável de forma a melhorar a reologia e estrutura do ligante mas assegurando que os custos da sua aplicação possam ser recuperados através dos menores custos de desempenho e de manutenção. A quantidade de polímero a adicionar ao ligante está entre os 2% e 10% do peso, no entanto, as quantidades mais utilizadas nos últimos anos estão entre os 5% e 6% (Becker, Y., *et al.*, 2001).

Como já foi referido, o polímero tem de ser compatível com o betume. Isto pode ser difícil pois os constituintes dos PMB têm estruturas e pesos moleculares, viscosidades e

densidades muito diferentes. O processo de produção do betume tem também bastante influência no tipo e composição de betume. O betume deve ter quantidade de aromatizantes suficientes para que os polímeros sejam dissolvidos (Zielinski, J., *et al.*, 1995). Polímeros incompatíveis, quando misturados no betume, resultam em misturas heterogêneas sem coesão nem ductilidade. Um grau adequado de compatibilidade entre o polímero e o ligante é necessário para evitar a separação de ambos durante o armazenamento e aplicação. Caso os polímeros e betume escolhidos não sejam compatíveis pode adicionar-se alguns elementos como enxofre, que é frequentemente utilizado para aumentar as ligações moleculares entre o betume e os polímeros (Becker, Y., *et al.*, 2001).

Estudos de Vonk, W. e Bull, A. L. (1989) mostraram que quando um elastómero está em contacto com o betume, absorve quase proporcionalmente os componentes do betume, com exceção dos asfaltenos. Os asfaltenos, no entanto, precisam dos maltenos para não se precipitarem. Assim, se a quantidade de asfaltenos for muito elevada, adicionar um elastómero pode resultar na precipitação dos asfaltenos e tornar o ligante pouco trabalhável.

A forma do polímero quando é adicionado ao betume influencia também o processo de mistura. Quanto menor o tamanho da partícula do polímero menor o tempo e intensidade de mistura para atingir uma boa dispersão. Adicionalmente, como uma partícula de menor tamanho significa mais área de superfície por unidade de massa de polímero, a penetração no betume e a absorção deste pelo polímero é facilitada e, assim, é concluída uma dissolução mais rápida. Portanto, polímeros em pó dispersam-se e dissolvem-se mais rapidamente que quando adicionados de forma granulada (Morgan, P. e Mulder, A., 1995).

As principais vantagens na utilização do PEAD em betumes modificados são a sua resistência a elevadas temperaturas e ao envelhecimento e serem relativamente baratos. Como desvantagem, são difíceis de misturar no ligante e têm problemas de estabilidade, precisam de uma maior quantidade de polímeros para obter melhores propriedades e não têm recuperação elástica (Becker, Y., *et al.*, 2001). Já a utilização do EVA em betumes modificados tem como vantagens a excelente compatibilidade com os ligantes não havendo, nalguns casos, grandes variações na viscosidade, são estáveis termicamente, são relativamente baratos e têm uma elevada aderência. A maior desvantagem na sua utilização é a inexistência de melhorias na recuperação elástica, tal como o PEAD (Becker, Y., *et al.*, 2001).

3 ESTUDOS LABORATORIAIS: MÉTODOS DE FORMULAÇÃO E PROCESSOS DE COMPACTAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados o compactador de impacto Marshall e o compactador giratório (GC), onde serão expostos os métodos utilizados para a produção de misturas betuminosas e parâmetros a aplicar. Relativamente ao GC será apresentado o método de caracterização dos agregados e ligantes utilizando assim como os parâmetros de calibração do compactador giratório. Por fim será referido outro método de compactação, pelo compactador de rolo, para a realização do ensaio de pista nas lajes aqui compactadas. Assim começa-se por apresentar os métodos de formulação de misturas betuminosas.

A determinação da composição (percentagem ótima de betume) de uma mistura betuminosa consiste no fabrico de provetes em laboratório sobre os quais são realizados diversos ensaios por forma a definirem-se as suas características e avaliar o seu desempenho. Os provetes preparados em laboratório devem ser representativos das condições de campo, devendo para tal simular o fabrico e aplicação em obra das misturas betuminosas. Assim, a partir desta simulação pode-se prever que tipo de mistura é a melhor para a aplicação numa situação particular e como irá ser o seu desempenho. Convencionou-se a classificação dos métodos de formulação como: definição por especificação, empíricos, analíticos, volumétricos e racionais (Branco, F. *et al.*, 2006).

Os métodos baseados na definição por especificação são baseados em procedimentos que já se encontram definidos em especificações. Se por um lado uniformizam o fabrico da mistura entre os diversos operadores, por outro eliminam qualquer possibilidade de inovação ou adaptação a materiais novos (Branco, F. *et al.*, 2006).

Os métodos do grupo dos empíricos são os mais utilizados, nomeadamente o Marshall, Duriez, Hveem e Hubbard-Field. Estes métodos apresentam procedimentos simples e valem-se do vasto conhecimento adquirido ao longo da sua utilização em todo o mundo, durante várias décadas. No entanto, quando se aplicam novos materiais poderão não ser adequados (Branco, F. *et al.*, 2006).

Os métodos analíticos utilizam as relações volumétricas para determinar, matematicamente, a composição da mistura. Apesar de ser possível chegar a um valor próximo do final, o mesmo nunca assegurará inteiramente as condições de desempenho necessárias, devido às diferenças na produção das misturas betuminosas (Branco, F. *et al.*, 2006).

Nos métodos volumétricos são indicadas a quantidade de betume e agregados a utilizar com base num ensaio que represente a compactação que ocorre na aplicação da mistura que é, geralmente, o ensaio com prensa giratória de corte, verificando-se também o volume de vazios, betume e agregados (Branco, F. *et al.*, 2006).

Nos métodos racionais, como o *Superpave Mix Design System*, são produzidos provetes com base em relações volumétricas ou de massa determinadas, sendo depois sujeitas a ensaios de determinação do módulo de deformabilidade, controlo do fendilhamento e da deformação permanente. Os métodos deste grupo têm a vantagem de possibilitar a verificação do comportamento destes materiais e a desvantagem, dos ensaios serem relativamente dispendiosos (Branco, F. *et al.*, 2006).

Independentemente do método utilizado, a formulação de uma mistura betuminosa consiste sempre na escolha do agregado e ligante e na combinação ótima destes dois materiais. Geralmente os métodos são distinguidos pela forma como se determina a percentagem ponderal ótima de ligante. Este processo pode ser subdividido nos seguintes (Dpto. Gestión de Calidad y Desarrollo, 2005):

- Realização de diferentes ensaios com diversas quantidades de ligante;
- Compactação das misturas no laboratório (simulação das condições reais);
- Execução de diversos ensaios laboratoriais para determinar as características da amostra. Estes ensaios representam um ponto inicial para definir as propriedades das misturas, devendo reproduzir o mais possível as condições reais;
- Escolha do ligante que melhor satisfaz os objetivos da formulação.

Durante o processo de formulação é necessário produzir diversos provetes com diferentes misturas para encontrar aquele que atinge todos os critérios do método a utilizar. É conveniente começar por escolher uma granulometria que seja semelhante à média dos limites especificados.

A compactação é um processo que tem como objetivo passar a mistura betuminosa de um estado solto para um estado denso em que as partículas estejam em contacto. Através da compactação, a mistura é rearranjada para que o material ocupe um menor

volume e o ar seja parcialmente eliminado. Só com esta modificação é possível obter um material que possa aguentar as cargas, sem ter deformações elevadas (Micaelo, R., 2008).

Nas secções seguintes serão aprofundados os dois métodos e respetivos equipamentos que se irão utilizar experimentalmente neste trabalho, o método Marshall e Superpave. Descrever-se-á também a compactação de lajes pelo compactador de rolo e os ensaios de avaliação de desempenho realizados.

3.2 MÉTODO DE MARSHALL (COMPACTADOR DE IMPACTO)

O método Marshall é um método empírico, baseado na correlação dos resultados obtidos em laboratório e no campo. Surgiu na década de 30 do século XX, desenvolvido por Bruce Marshall, e já sofreu algumas modificações desde o método inicial de forma a possibilitar a adição, de forma indireta, das variáveis da carga de tráfego, condições climáticas, entre outros. É amplamente utilizado em Portugal devido à vasta experiência que existe em trabalhar com o mesmo.

3.2.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O procedimento de formulação pelo método de Marshall consiste na seleção do tipo de agregado e ligante, preparação das amostras com as quantidades determinadas e respetiva compactação com o compactador de impacto. Depois do fabrico de provetes compactados, são efetuados ensaios para conhecer a baridade, porosidade e a estabilidade e deformação, com recurso ao ensaio de compressão Marshall. Por fim, são analisados os valores obtidos e é definida a quantidade ótima de ligante betuminoso. Podem ser realizados mais alguns ensaios de caracterização mecânica, como o ensaio de sensibilidade à água e o de tração indireta, para ter um maior conhecimento sobre o comportamento da mistura.

Para selecionar o tipo e quantidade de agregados é necessário ensaiá-los de forma a determinar algumas das suas propriedades como a granulometria, forma, qualidade dos finos e limpeza, dureza, absorção de água, entre outros. Após a realização destes ensaios estudam-se os resultados obtidos de forma a chegar à curva granulométrica a utilizar na formulação. Por norma, calculam-se, teoricamente, misturas com diversas granulometrias até ser atingida a curva granulométrica aceitável para a formulação. Em Portugal, os fusos utilizados estão especificados em cadernos de encargos, como o CETO-EP (2014). A curva granulométrica escolhida deverá estar enquadrada no fuso correspondente e acompanhar o andamento na mesma.

De seguida é necessário escolher o ligante, relativamente ao qual devem ser conhecidas a sua temperatura de amolecimento, deformação, viscosidade, entre outras características. Os ligantes utilizados poderão ser modificados ou tradicionais. Neste trabalho são utilizados betumes modificados, um betume modificado com polímeros comercial, o Elaster, fornecido pela CEPESA, e dois betumes 70/100 modificados com granulado de resíduos plásticos, dos polímeros EVAr e de PEADr.

Após a seleção dos agregados e ligante, é necessário preparar os provetes e compactá-los. O método de Marshall utiliza diversas combinações entre agregado e ligante, habitualmente 5 conjuntos com 3 provetes cada para um total de 15 provetes, onde se faz variar 0,5% a percentagem de betume entre conjunto. Deve-se tentar que dois dos conjuntos fiquem acima da percentagem ótima de betume e outros dois abaixo deste valor.

Para fabricar os provetes é essencial misturar os agregados, incluindo o fíler, secos na estufa, com o betume, aquecido à temperatura requerida, para que todas as partículas fiquem com a superfície coberta de ligante. Este processo é realizado numa misturadora, que, no caso do presente estudo, está envolvida numa manta de aquecimento para que a temperatura da mistura não diminua.

Seguidamente coloca-se a mistura aquecida dentro do molde metálico aquecido para ser compactada, com o compactador de impacto, por um martelo que aplica 35, 50 ou 75 pancadas em cada lado do provete. A compactação deverá ter início após verificar-se que a mistura está à temperatura de compactação pretendida.

Como já foi referido anteriormente, o betume altera as suas propriedades ao ser aquecido a altas temperaturas. É, por isso, indispensável o controlo das temperaturas dos materiais, de mistura e de compactação para que haja a maior uniformização possível e todos os provetes fiquem com ligantes de características semelhantes.

Após o arrefecimento do provete pode-se desmoldar e realizar os ensaios de caracterização necessários.

3.2.2 COMPACTAÇÃO COM O COMPACTADOR DE IMPACTO

A compactação é feita de acordo com o procedimento descrito na norma europeia EN 12697-30. Utiliza-se um compactador de impacto (Figura 3.1) que compacta as misturas de forma mecânica através da queda livre de uma massa deslizante com um peso de (4550 ± 20) g a uma altura de (460 ± 3) mm que aplica o número de pancadas pré definido.

São utilizados provetes cilíndricos com diâmetro interno de $(101,6 \pm 0,1)$ mm e cerca de $(63,5 \pm 2,5)$ mm de altura compactados por impactos sucessivos. As dimensões máximas do agregado não podem exceder os 22,4 mm. O número de pancadas varia em função do tipo de mistura betuminosa a compactar e, portanto, da energia de compactação utilizada em obra. Geralmente varia entre as 35 e as 75 pancadas por cada face do provete.



Figura 3.1 – Compactador de impacto

De acordo com a EN 12697-30 deve utilizar-se uma mistura entre os 1050 g e os 1400 g, variando com a massa volúmica dos materiais utilizados. Deve-se executar uma compactação experimental para definir a quantidade de mistura necessária para atingir a altura requerida.

3.2.3 FORMULAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA

Após a compactação dos provetes são realizados alguns ensaios para caracterização dos provetes compactados. Os ensaios frequentemente utilizados são os descritos em seguida.

Baridade

Para provetes com a superfície fechada, a determinação da baridade faz-se de acordo com o procedimento B da norma europeia EN 12697-6, que consiste em pesar os provetes, compactados, a seco, saturados e saturados com a superfície seca. Por fim calcula-se a sua baridade com base na equação 3.1.

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (3.1)$$

Onde,

ρ_b Baridade do provete (Mg.m^{-3})

m_1 Massa do provete seco (g)

m_2 Massa do provete saturado dentro de água (g)

m_3 Massa do provete saturado com a superfície seca (g)

ρ_w Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg.m^{-3})

Baridade Máxima Teórica

O procedimento A da norma EN 12697-5 consiste em desagregar provetes o mais possível (ou utilizar uma mistura não compactada), colocar a amostra num picnómetro e pesar este conjunto. Encher o picnómetro com a amostra de água e pesar novamente. Por fim calcula-se a baridade máxima teórica com base na equação 3.2.

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{v_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad (3.2)$$

Onde,

ρ_m Baridade máxima teórica (Mg.m^{-3})

m_1 Massa do picnómetro vazio, incluindo a tampa (g)

m_2 Massa do picnómetro com a amostra seca, incluindo a tampa (g)

m_3 Massa do picnómetro com a amostra cheio de água (g)

v_p Volume do picnómetro à temperatura de ensaio (m^3)

ρ_w Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg.m^{-3})

Porosidade

Consiste em calcular, de acordo com a equação (3.3 da EN 12697-8 a quantidade de vazios da mistura, com base na baridade dos provetes e na baridade máxima teórica da mistura.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \quad (3.3)$$

Onde,

V_m Porosidade da mistura (%)

ρ_m Baridade máxima teórica (Mg.m^{-3})

ρ_b Baridade do provete (Mg.m^{-3})

Ensaio Marshall

O procedimento deste ensaio é efetuado de acordo com a EN 12697-34 e consiste em aquecer os provetes a $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ durante 40 a 60 minutos e, de seguida, colocá-los no estabilómetro onde é aplicada uma carga crescente com uma taxa de 50 mm/min até ser atingida a rotura do provete. Por fim, registar os valores de estabilidade e deformação obtidos e corrigi-los em função do volume do provete ou da sua altura. É também calculado o quociente Marshall utilizando a equação 3.4.

$$Q = \frac{S}{F} \quad (3.4)$$

Onde,

Q Quociente Marshall (kN.mm^{-1})

S Estabilidade do provete (kN)

F Deformação do provete (mm)

Sensibilidade à Água

O método A da EN 12697-12 consiste no fabrico de 6 provetes cilíndricos compactados aos quais são medidas as alturas e diâmetro, de acordo com a EN 12697-29, e calculadas as baridades. De seguida divide-se em 2 conjuntos de 3 provetes, de baridades e alturas semelhantes, em que um conjunto é acondicionado ao ar e o outro é imerso em água durante um determinado tempo, dentro de um recipiente com vácuo. Após esse tempo mede-se as dimensões destes provetes e rejeitam-se aqueles que tenham variado mais que 2%. Depois de imersos são ensaiados à tração indireta.

Resistência à Tração Indireta

O procedimento deste ensaio é efetuado de acordo com a EN 12697-23 e consiste na aplicação de uma carga de compressão, na vertical, causando conseqüentemente uma força de tração indireta na horizontal, no provete. Quando este ensaio é efetuado após condicionamento dos provetes para efeitos de avaliação da ação da água com os resultados obtidos calcula-se o valor de resistência conservada à tração indireta (equação 3.5).

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \tag{3.5}$$

Onde,

ITSR Resistência à tração indireta (%)

ITS_w Resistência à tração indireta dos provetes imersos (kPa)

ITS_d Resistência à tração indireta dos provetes secos (kPa)

É possível conhecer outras características, por exemplo o VMA ou o VFB, de acordo com as equações 3.6 e 3.7, das misturas betuminosas compactadas utilizando, com base nas propriedades anteriormente referidas, para que seja feita uma escolha mais ponderada do material e quantidade mais adequada a utilizar. Na Figura 3.2 pode observar-se sob a forma de um esquema, a composição de uma mistura betuminosa compactada.

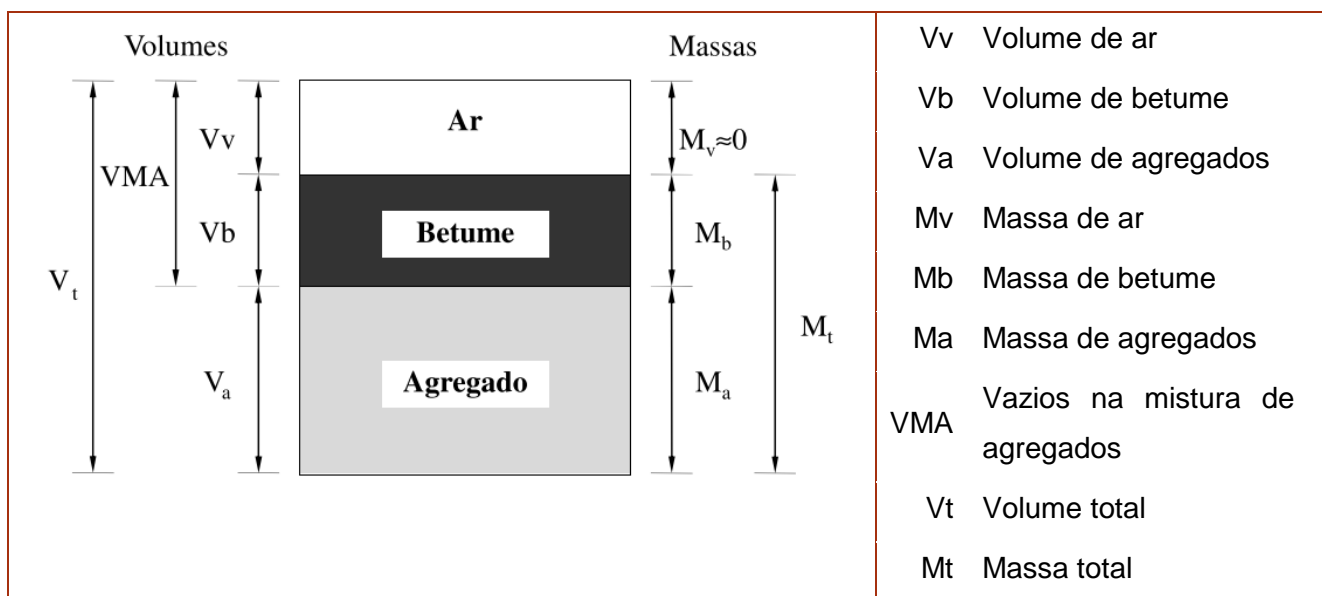


Figura 3.2 – Composição esquemática de um provete

Vazios na Mistura de Agregados

Os vazios na mistura de agregados correspondem ao volume dos vazios existentes no provete, quer estejam preenchidos com betume ou com ar.

$$VMA = V_m + \frac{B \times \rho_b}{\rho_B} \quad (3.6)$$

Onde,

VMA Percentagem de vazios na mistura de agregados (%)

V_m Porosidade da mistura (%)

B Percentagem de ligante na mistura (%)

ρ_b Baridade do provete (Mg.m^{-3})

ρ_B Massa volúmica do ligante (Mg.m^{-3})

Vazios na Mistura de Agregados Preenchidos com Ligante

Os vazios na mistura de agregados preenchidos com ligante correspondem, como o nome indica, ao volume de vazios da mistura, preenchidos com betume.

$$VFB = \frac{B \times \rho_b}{\rho_B \times VMA} \times 100 \quad (3.7)$$

Onde,

VFB Percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com ligante (%)

B Percentagem de ligante na mistura (%)

ρ_b Baridade do provete (Mg.m^{-3})

VMA Percentagem de vazios no esqueleto da mistura (%)

ρ_B Massa volúmica do ligante (Mg.m^{-3})

3.3 MÉTODO SUPERPAVE (COMPACTADOR GIRATÓRIO)

O método Superpave foi desenvolvido no âmbito do SHRP. Os investigadores deste programa desenvolveram o compactador giratório, um equipamento que permite a compactação de provetes com baridades semelhantes às atingidas sob condições de tráfego reais, conseguindo acomodar grandes quantidades de agregados e simular a compactação de forma a identificar o comportamento da mistura e os problemas de compactação. Este método inclui também novos sistemas de classificação de ligantes betuminosos e agregados e um novo processo de análise de misturas betuminosas (WSDOT, 2014).

A característica fundamental do GC é a sua capacidade de medir e registar a altura da amostra durante o processo de compactação. O procedimento do Superpave regista a baridade em termos de percentagem da baridade máxima teórica ($\% \rho_m$) a um determinado número de rotações.

3.3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

Os investigadores do SHRP produziram um novo sistema de classificação dos betumes designado por sistema PG Superpave. Este sistema mede as propriedades físicas que estão diretamente relacionadas com o desempenho em campo e caracteriza os betumes através da temperatura que irão possuir e o período de tempo em que é mais provável que ocorra o fendilhamento (WSDOT, 2014).

A classificação é feita pelo seu grau de comportamento: *Performance Grade* (PG). Esta classificação é baseada na ideia que um ligante de uma mistura betuminosa deve estar relacionado com as condições na qual é utilizado. Assim um ligante utilizado numa estrada localizada em África deverá ser completamente diferente de um utilizado nos países nórdicos. Este conceito é o mesmo que é utilizado na classificação por penetração ou viscosidade, a diferença está nas relações entre as propriedades do betume e as condições de utilização que são mais completas e precisas no sistema PG Superpave (FHWA, 2000).

Este sistema utiliza os ensaios do Quadro 3.1 para classificar o ligante.

Quadro 3.1 – Exigências relativas à classificação de betumes pelo Superpave (adaptado de FHWA, 2000)

Ensaio	Objetivo
<i>Dynamic Shear Rheometer (DSR)</i>	Medir as propriedades do ligante a temperaturas altas e intermédias
<i>Rotational Viscometer (RV)</i>	Medir as propriedades do ligante a temperaturas altas
<i>Bending Beam Rheometer (BBR)</i> <i>Direct Tension Test (DTT)</i>	Medir as propriedades do ligante a temperaturas baixas
<i>Rolling Thin Film Oven (RTFO)</i> <i>Pressure Aging Vessel (PAV)</i>	Simular o envelhecimento (durabilidade)

A cada betume é atribuída uma designação do tipo PG XX-YY, onde (Dpto. Gestión de Calidad y Desarrollo, 2005):

- PG – *Performance Grade*;
- XX – Temperatura Máxima (temperatura máxima à qual o pavimento deve manter as suas propriedades de serviço);
- YY – Temperatura Mínima (temperatura mínima à qual o pavimento deve manter as suas propriedades de serviço).

Estas temperaturas são definidas considerando a região geográfica e as temperaturas à qual estará submetido o pavimento e o tráfego expectável.

Assim, um PG 58-22 é projetado para uma temperatura máxima à qual o pavimento deve manter as suas propriedades de serviço de 58°C e para uma temperatura mínima de pavimento de -22°C. Estes números representam as temperaturas do pavimento e não do ar (apesar de serem estimadas com base em temperaturas do ar). No geral, um betume cuja classificação PG tenha uma diferença entre a temperatura máxima e mínima superior a 90°C requer algum tipo de agente modificador (WSDOT, 2014). Por exemplo, para um tráfego elevado recomenda-se um PG 76-22 já para um tráfego mais baixo um PG 64-22 poderá ser mais adequado (Dpto. Gestión de Calidad y Desarrollo, 2005).

Escolhido o betume é necessário passar à escolha do agregado. Também aqui o Superpave utiliza outro sistema de classificação.

No que concerne aos agregados, identificaram as propriedades necessárias para utilizar o sistema Superpave e dividiram-nas em propriedades de origem e de consenso (WSDOT, 2014). Adicionalmente, uma nova forma de especificar a granulometria do agregado foi desenvolvida.

As propriedades de consenso (em inglês, *consensus requirements*) são características dos agregados que são imprescindíveis para atingir uma boa mistura betuminosa. Têm esta designação devido à grande conformidade que existiu quanto ao seu uso e valores. Os valores dos requisitos de consenso são baseados no nível de tráfego e posição na estrutura do pavimento. Estas propriedades são (FHWA, 2000):

- Índice de achatamento do agregado;
- Índice de lamelação do agregado;
- Teor de argila.

As propriedades de origem (em inglês, *source properties*) são as características dos agregados que variam com a sua origem e forma de extração. Estas propriedades são (FHWA, 2000):

- Dureza
- Solidez
- Qualidade dos finos

Os tamanhos dos peneiros que o Superpave utiliza são os do Quadro 3.2. Os peneiros utilizados na Europa, para este tipo de misturas, são os da série base + 2 tendo dimensões diferentes das utilizadas nos EUA, é por isso necessário um ajuste na utilização desta tabela.

Quadro 3.2 – Designação dos peneiros do sistema Superpave
(adaptado de FHWA, 2000)

Designação do sistema Superpave	Tamanho Nominal Máximo (mm)	Tamanho Máximo (mm)
37,5 mm	37,5	50
25 mm	25	37,5
19 mm	19	25
12,5 mm	12,5	19
9,5 mm	9,5	12,5

Para especificar a granulometria, o Superpave utiliza um gráfico (Figura 3.3) de granulometria com uma linha correspondente a 0,45 da granulometria que define a granulometria permitida. Esta linha começa na origem e termina na abertura máxima do peneiro. Na Figura 3.3 é apresentado o referido gráfico, designado por “0,45 *power chart*”. A dimensão máxima corresponde à malha do peneiro acima do tamanho máximo nominal que corresponde ao peneiro acima daquele que retém mais de 10% de partículas.

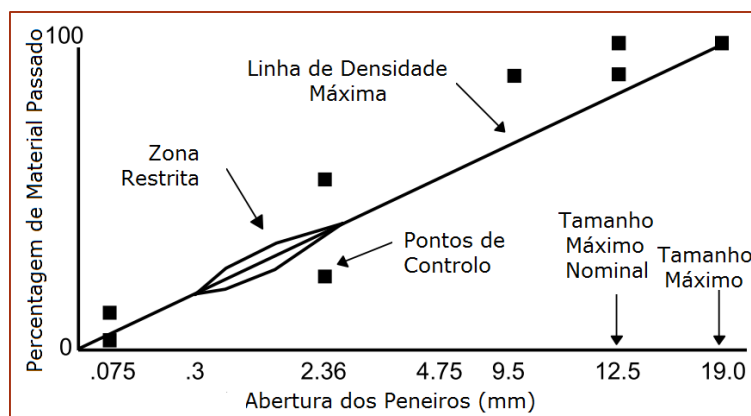


Figura 3.3 – Granulometria tipo do sistema Superpave – 0,45 *power chart* (adaptado de FHWA, 2000)

A linha de densidade máxima representa a granulometria para a qual as partículas de agregado arranjadas correspondem à máxima densidade possível. Esta granulometria é de evitar pois seria impossível colocar betume no meio de um agregado assim, resultando numa mistura pouco durável (FHWA, 2000).

Para especificar a granulometria dos agregados foram acrescentadas duas características: os pontos de controlo e uma zona restrita. Os pontos de controlo funcionam como um intervalo no qual a curva granulométrica tem de passar. Estão colocados no tamanho máximo e no tamanho máximo nominal, no tamanho correspondente aos finos e num ponto intermédio dos tamanhos referidos.

A zona restrita forma uma área onde a granulometria não deve passar. Se aqui passar isso indica que a mistura irá ter demasiada areia fina relativamente ao total de areia. Esta granulometria resulta quase sempre numa mistura suave de difícil compactação que oferece pouca resistência à deformação permanente durante a sua vida. As granulometrias que passem na zona restrita poderão ter esqueletos muito fracos que dependem da rigidez do ligante para obter uma boa resistência ao corte. Estas misturas podem facilmente tornar-se plásticas (FHWA, 2000).

Uma curva granulométrica que esteja entre os pontos de controlo e evite a zona restrita cumpre os requisitos do Superpave no que diz respeito à granulometria (Figura 3.4).

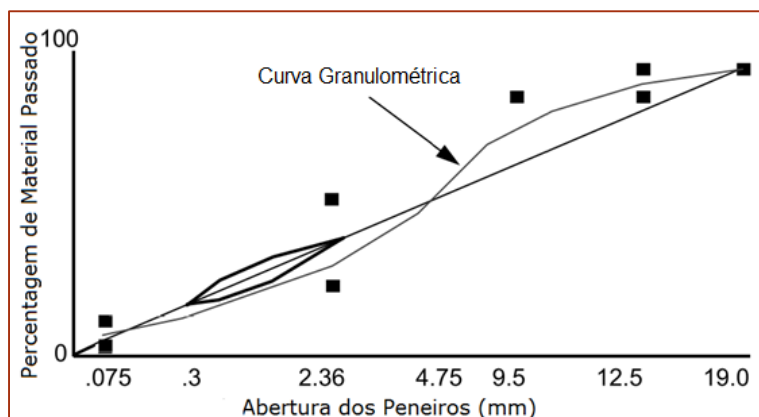


Figura 3.4 – Curva granulométrica tipo do sistema Superpave (adaptado de FHWA, 2000)

Após a escolha do agregado e do ligante inicia-se o processo de compactação com o compactador giratório. São compactados 5 conjuntos com 3 provetes cada para um total de 15 provetes, tal como pelo método de Marshall.

O método de fabrico dos provetes é idêntico ao do Marshall com a diferença da quantidade de material que deve ser calculado através da equação 3.8, em função da baridade máxima teórica.

$$M = 10^{-3} \times \pi \times \frac{D^2}{4} \times h_{min} \times \rho_m \tag{3.8}$$

Onde,

M Massa da mistura a introduzir no molde (g)

D Diâmetro interno do molde (mm)

h_{min} Altura mínima da amostra compactada, correspondente a uma porosidade de 0% (mm)

ρ_m Baridade máxima teórica ($Mg.m^{-3}$)

Sendo que a relação entre a altura mínima (h_{min}) e o diâmetro (D) deve estar entre 0,66 e 1,05, segundo a EN 12697-31.

Seguidamente coloca-se a mistura aquecida dentro do molde metálico, para ser compactada com um número de rotações ou até uma altura, pré definidos, dependendo do tráfego que se deseja estudar. Os provetes podem ter 100 mm, 150 mm ou 160 mm de diâmetro, conforme o escolhido, sendo usualmente utilizado o diâmetro de 150 mm. O diâmetro a utilizar varia consoante o tamanho máximo do agregado, sendo que não se

deve utilizar o diâmetro de 100 mm quando a dimensão máxima do agregado é superior a 25,4 mm.

Se o objetivo for apenas determinar a percentagem da baridade máxima teórica do provete em cada rotação, este pode ser desmoldado logo a seguir à sua compactação, se por outro lado, o objetivo for realizar mais ensaios deverá esperar-se que o molde arrefeça um pouco para que a mistura não deforme durante o processo de desmolde. Deve também preparar-se uma outra amostra, que não será compactada para se determinar a baridade máxima teórica, de acordo com a EN 12695-5.

3.3.2 COMPACTAÇÃO COM O COMPACTADOR GIRATÓRIO

O compactador giratório, representado na Figura 3.5, é um equipamento que compacta misturas betuminosas em moldes cilíndricos através da aplicação de uma força na parte superior do molde ao mesmo tempo que este gira.

A EN 12697-31 recomenda a utilização de uma pressão de 600 ± 18 kPa, uma velocidade de rotação de $30 \pm 0,5$ rpm e um ângulo interno efetivo de $1,16 \pm 0,02$ °.



Figura 3.5 – Compactador giratório

É imprescindível que a calibração do compactador seja feita de forma regular para que não haja variabilidade nas condições base das diversas misturas compactadas. É necessário ter em conta que se deve calibrar primeiro a pressão, depois o ângulo de rotação e por fim a altura (Troxler Electronic Laboratories, Inc., 2006b). Os períodos de calibração estão definidos na norma ASTM D6929-09.

A experiência com o compactador giratório mostra que equipamentos de diferentes fabricantes podem conduzir a compactações diferentes mesmo tendo os parâmetros de valor igual (FHWA, 2010).

3.3.2.1 Pressão

Para misturas do tipo betão betuminoso (AC), a pressão a utilizar é usualmente 600 ± 18 kPa, segundo a EN 12697-31. Para a sua calibração coloca-se uma célula de carga no local onde se coloca o molde no equipamento, e liga-se adequadamente este aparelho ao compactador. De seguida o equipamento desce o pé que faz a pressão até encontrar a célula de carga e regista a força exercida em cinco pontos. Se a pressão não estiver de acordo é necessário calibrar o compactador.

3.3.2.2 Ângulo de Rotação

Um dos parâmetros fundamentais da compactação com o compactador de impacto é o ângulo. Uma mudança de $0,1^\circ$ no ângulo pode causar uma diferença até 0,6% de porosidade (FHWA, 2010). Existem 2 ângulos a ter em conta, um interno e outro externo (Figura 3.6).

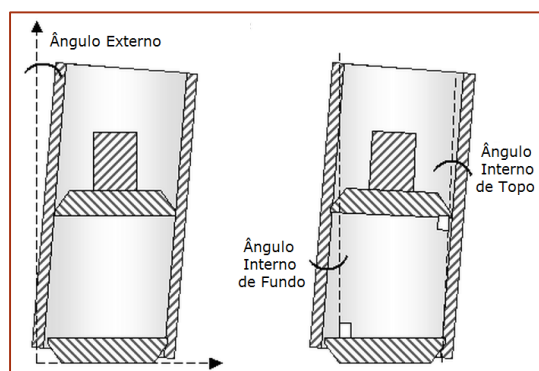


Figura 3.6 – Ângulos internos e externos do compactador giratório (adaptado de Al-Khateeb, G., *et al.*, 2002)

No início da utilização deste equipamento definiu-se a utilização de $1,25^\circ$ para o ângulo externo. Este valor foi definido com base num estudo efetuado em que se verificou que o intervalo mais baixo para ângulo era entre $1,22^\circ$ e $1,24^\circ$ e o maior entre $1,26^\circ$ e $1,28^\circ$ (FHWA, 2010b). Assim, impôs-se o valor de $1,25 \pm 0,02^\circ$ como valor de referência para o ângulo externo. No entanto, verificou-se que os equipamentos de diversos fabricantes definiam o ângulo externo de $1,25^\circ$ de diferentes formas. Optou-se então por definir o

ângulo interno de $1,16 \pm 0,02^\circ$ para todos os fabricantes. Para averiguar esta discrepância foi realizado nos EUA um estudo pelo FHWA (2010b) sobre o ângulo interno dos compactadores que envolveu 8 laboratórios. Este estudo comparou as porosidades de misturas moldadas por diferentes compactadores calibrados com o ângulo externo de $1,25^\circ$ e, depois, com o ângulo interno de $1,16^\circ$ (Figura 3.7). Os resultados obtidos mostraram que uma calibração pelo ângulo interno resultava em misturas com porosidades mais semelhantes que aquelas moldadas pelo ângulo externo. Consequentemente, definiu-se o ângulo interno do equipamento para $1,16^\circ$.

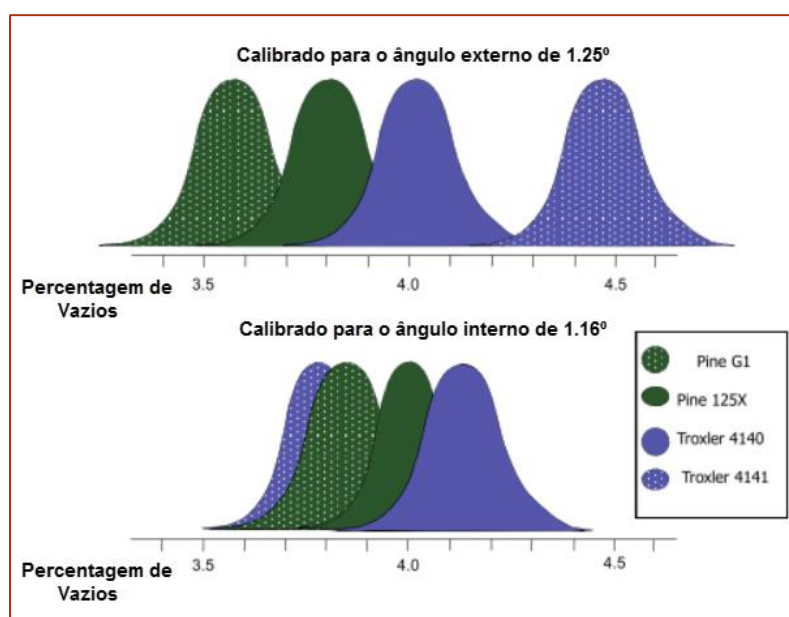


Figura 3.7 – Exemplo dos resultados iniciais do estudo do ângulo interno (adaptado de FHWA, 2010)

Outro problema encontrado dizia respeito à temperatura do molde durante a medição do ângulo. Durante a compactação utiliza-se o molde à temperatura ambiente mas após a introdução da mistura betuminosa a elevadas temperaturas no molde, este aquece. Um estudo realizado pela Universidade do Arkansas (FHWA, 2010b) verificou que o modelo Troxler 4140, o compactador utilizado neste trabalho, tem um ângulo ligeiramente menor quando o molde está quente (aproximadamente a 150°C) do que quando está frio (temperatura ambiente).

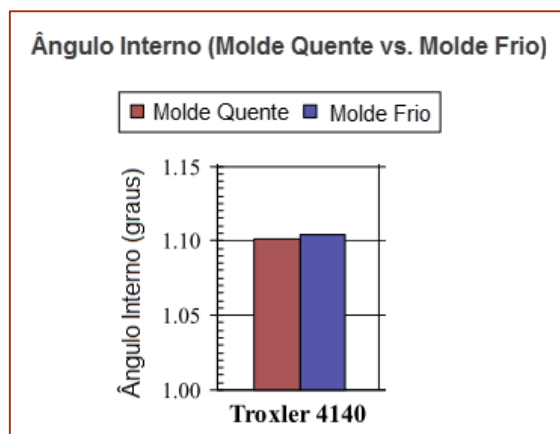


Figura 3.8 – Comparação dos valores do ângulo interno utilizando moldes quentes e moldes frios (adaptado de FHWA, 2010)

Para conhecer o ângulo interno utiliza-se um equipamento específico para a sua calibração, o *Dynamic Angle Validator II* (DAV II), no caso do presente estudo. Este equipamento (Figura 3.9) permite a calibração do ângulo utilizando uma simulação da mistura betuminosa o que permite concluir o processo em menos de uma hora, muito inferior ao necessário caso se utilizasse uma mistura (Troxler Electronic Laboratories, Inc., s.d.).



Figura 3.9 – *Dynamic Angle Validator II*

Para medir o ângulo, coloca-se o DAV II dentro do molde limpo de 150 mm. Sobre o DAV II são colocados 3 pratos cônicos à vez, com diferentes excentricidades, prato de 18°, 21° e 24°, para simular misturas com diferente rigidez. O prato de 18° representa uma mistura menos rígida, tendo por isso um diâmetro menor e aplicando um momento inferior, enquanto o de 24° representa uma mistura mais rígida, utilizando um momento maior. Cada prato tem as seguintes excentricidades (Troxler Electronic Laboratories, Inc., s.d.):

- 18° → 18,7 mm;
- 21° → 22 mm;
- 24° → 25,8 mm.

A Figura 3.10 mostra o esquema operacional do DAV II. O compactador giratório aplica uma força excêntrica no topo do DAV II, da mesma forma quando compacta uma mistura. A rotação do prato fornece valores de ângulos correspondentes a uma excentricidade. Estes valores são registados e resultam num gráfico excentricidade vs ângulo (EvA).

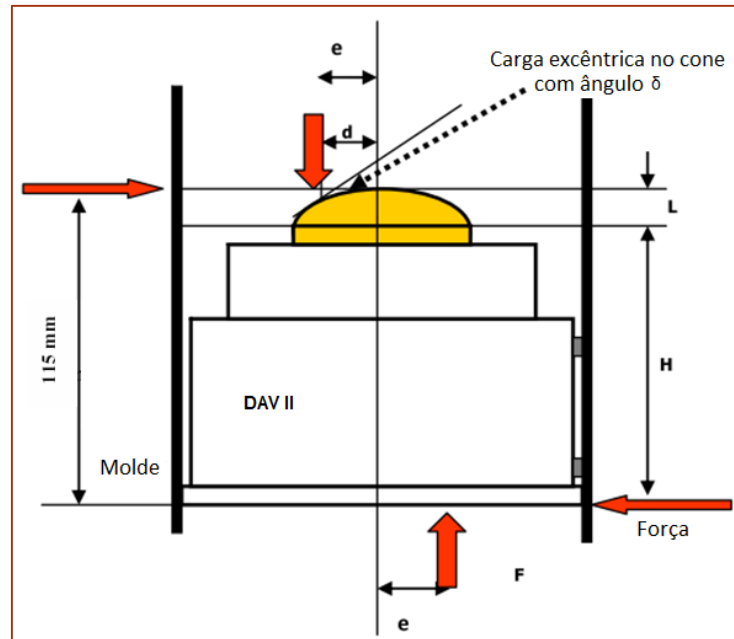


Figura 3.10 – Esquema operacional do DAV II (adaptado Test Quip, Inc.)

A medição é feita com o prato no topo e depois com o prato no fundo, utilizando um número de rotações entre 15 e 20. No fim faz-se uma média destas medições como mostra a equação 3.9.

$$\alpha (\text{efetivo}) = \frac{\alpha (\text{topo}) + \alpha (\text{fundo})}{2} \quad (3.9)$$

Onde,

α (efetivo) Ângulo interno efetivo (°)

α (topo) Média dos ângulos internos do topo (°)

α (fundo) Média dos ângulos internos do fundo (°)

Devem-se fazer pelo menos 3 medições em cada prato. A diferença entre os máximos dos ângulos medidos no topo ou no fundo não deve ser superior a 0,05°. E a diferença entre a média do ângulo de topo e de fundo não deve exceder os 0,10°. Após a verificação e ajustamento do ângulo interno para 1,16±0,02 ° poderá proceder-se à compactação da mistura.

3.3.2.3 *Altura*

A altura deve ser calibrada sempre que se utiliza o equipamento e tem de ser sempre calibrada após calibração da pressão. Para calibrar a altura é colocado um cilindro de altura pré definida no local onde se coloca o molde no equipamento. De seguida o equipamento desce o pé que faz a pressão durante a compactação, e regista a altura. A diferença entre a altura definida e a registada não deve ser superior a 0,05 mm.

3.3.2.4 *Número de Rotações*

Um parâmetro importante do GC é o número de rotações utilizados para compactar a amostra. O número de rotações a que o provete é sujeito depende da classe de tráfego da estrada e da temperatura do pavimento.

Os limites de compactação são controlados em três momentos da compactação em laboratório com o compactador giratório: N_{ini} , N_{des} e N_{max} . No número de rotações igual a N_{ini} o grau de compactação deve ser superior a 89%, para assegurar que a mistura tem suficiente atrito interno e uma forte estrutura de agregado (WSDOT, 2014). Este valor representa o estado da mistura antes da sua compactação em obra e existe para garantir que a mistura não compacta demasiado rapidamente e, conseqüentemente, se torne instável quando sujeita ao tráfego. O N_{max} deve ser inferior a 98%, valor correspondente a 2% de porosidade (WSDOT, 2014). Este parâmetro representa o estado do pavimento após a compactação pelo tráfego e assegura que a camada de desgaste não compacta demasiado e resulte num baixo volume de vazios com potencial deformação. O N_{des} deve garantir um grau de compactação igual a 96%, neste estudo, valor corresponde a 4% de porosidade (WSDOT, 2014). Este valor especifica o estado do pavimento logo após a construção.

Tipicamente define-se um valor para o N_{des} , com base nos valores do Quadro 3.3 e calculam-se os valores do N_{ini} e N_{max} com base nas expressões 3.10 e 3.11.

$$\log N_{ini} = 0,45 \times \log N_{des} \quad (3.10)$$

$$\log N_{max} = 1,10 \times \log N_{des} \quad (3.11)$$

Está também definido, na norma ASTM D6925-09, o número de rotações necessário para moldar provetes que simulem um pavimento com um determinado tráfego projetado para 20 anos na via mais solicitada (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 – Definição do número de rotações em função do tráfego projetado

N, em milhões (20 anos)	N_{ini}	N_{des}	N_{max}
< 0,1	6	50	75
0,3 a < 3	7	75	115
3 a < 30	8	100	160
> 30	9	125	205

3.3.3 FORMULAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA

Após a compactação dos provetes são realizados alguns ensaios para caracterização dos provetes compactados. A baridade máxima teórica é determinada de acordo com a norma EN 12697-5 utilizando uma amostra previamente misturada, separada da que foi utilizada para moldar os provetes. Com os provetes compactados calcula-se a porosidade, os vazios nas misturas de agregados e preenchidos com betume, como indicado em 3.2.3.

Os valores encontrados têm de obedecer a determinados critérios. A percentagem de VMA mínima admitida varia conforme a maior dimensão do agregado. Os valores mínimos admitidos estão expressos no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Requisitos para percentagem de VMA, no SGC (adaptado de WSDOT, 2014)

Maior Dimensão do Agregado	VMA Min.
9,5 mm	15
12,5 mm	14
19,0 mm	13
25,0 mm	12
37,5 mm	11

O intervalo de valores aceitáveis para a percentagem de vazios preenchida com betume varia com o tráfego pretendido para 20 anos na via mais solicitada (Quadro 3.5).

Quadro 3.5 – Requisitos para a percentagem de VFB, no SGC (adaptado de WSDOT, 2014)

N, em milhões	Min Max	
	< 0,3	70%
0,3 a < 3	68%	78%
> 3	65%	75%

Baridade

A baridade é uma percentagem da baridade máxima teórica, neste caso, 4,0%.

$$\rho_b = 0,04 \times \rho_m \tag{3.12}$$

Onde,

ρ_b Baridade do provete ($Mg.m^{-3}$)

ρ_m Baridade máxima teórica ($Mg.m^{-3}$)

0,04 Porosidade de 4% correspondente ao $\% \rho_m$ @ $N_{des} = 96\%$

Baridade Relativa

A baridade relativa consiste na taxa de compactação do provete. Varia consoante a altura do mesmo em cada rotação.

$$\% \rho_{mx} = \frac{\rho_b h_m}{\rho_m h_x} \tag{3.13}$$

Onde,

$\% \rho_{mx}$ Baridade relativa na rotação x (%)

ρ_b Baridade do provete ($Mg.m^{-3}$)

h_m Altura da amostra corresponde às rotações do N_{des} (mm)

ρ_m Baridade máxima teórica ($Mg.m^{-3}$)

h_x Altura da amostra correspondente às rotações x (mm)

Porosidade

A porosidade é o inverso da baridade relativa.

$$V_m = 1 - \% \rho_m \tag{3.14}$$

Onde,

V_m Porosidade da mistura (%)

$\% \rho_m$ Baridade relativa (%)

3.4 OUTROS MÉTODOS PARA A COMPACTAÇÃO DE PROVETES E PARA A CARATERIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS EM LABORATÓRIO

Para a avaliação do desempenho das misturas betuminosas é necessário provetes prismáticos. Um dos métodos de obter este tipo de provetes é através do compactador de rolo que molda provetes de forma quadrada ou retangular, consoante o molde utilizado.

A partir destes provetes poderá ensaiar-se as lajes moldadas com o ensaio de pista, por exemplo, ou cortar o provete em vigas para ensaiar à fadiga, por exemplo, ou ainda retirar carotes cilíndricos para ensaiar à compressão Marshall, por exemplo.

Nas secções seguintes irá fazer-se uma descrição do compactador de rolo e do ensaio de pista, ambos utilizados neste trabalho.

3.4.1 COMPACTAÇÃO COM O COMPACTADOR DE ROLO

O compactador de rolo apareceu no início dos anos 1990 na Alemanha, como resultado de um estudo que tinha como objetivo, estudar a influência do tipo de compactação em laboratório das características mecânicas de uma mistura betuminosa. O resultado deste projeto foi um compactador de laboratório capaz de produzir lajetas de misturas betuminosas com as propriedades mecânicas obtidas em campo (Renken, P., 2000).

A preparação dos materiais para este compactador é idêntica à preparação feita para o método Marshall. Selecionam-se os agregados e betume a utilizar e separam-se quantidades suficientes, neste caso, para um molde com dimensões de 305x305 mm ou 305x405 mm e espessuras que podem ir até dos 50 mm aos 100 mm.

A compactação é feita de acordo com o procedimento descrito na norma europeia EN 12697-33. O compactador de rolo (representado na Figura 3.11) tem uma secção de um cilindro de aço que aplica uma força descendente enquanto o molde, com a mistura, se move para a frente e para trás em cima de uma mesa deslizante.

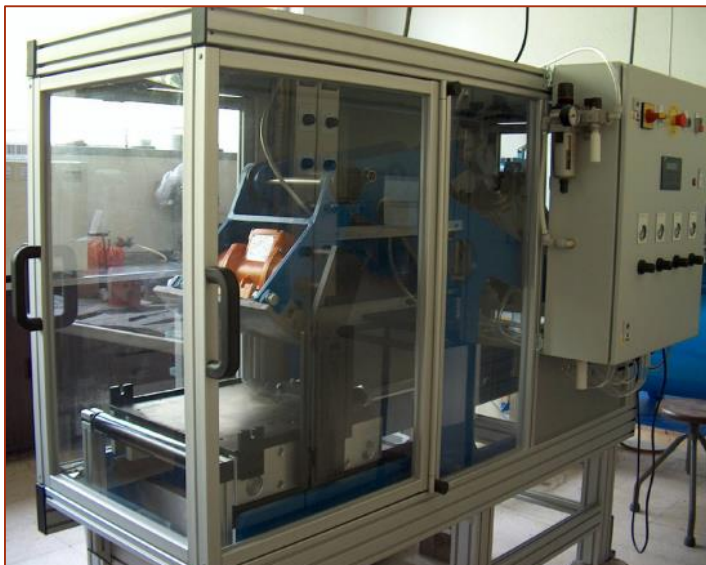


Figura 3.11 – Compactador de Rolo do LNEC

A força aplicada para compactar a laje tem quatro níveis diferentes que podem ser programados no equipamento (Figura 3.12).

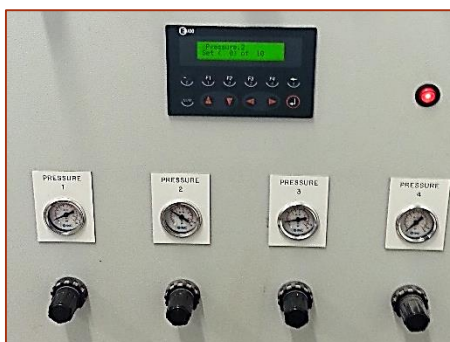


Figura 3.12 – Painel de controlo da pressão e do número de passagens do compactador de rolo

As diversas pressões e número de passagens têm como objetivo simular a compactação em obra. A primeira pressão representa o espalhamento da mistura, a segunda simula a compactação da passagem do cilindro de rolos metálicos de rasto liso, a terceira com o cilindro de pneus e a última pressão simula o acabamento final com o cilindro de rasto liso. Para além de se poder definir o número de passagens e a pressão aplicada é também possível definir se se quer que a compactação seja feita com vibração ou não.

3.4.2 ENSAIO DE PISTA

O ensaio de pista é realizado de acordo com a EN 12697-22 e tem como objetivo o estudo do comportamento, das lajetas de mistura betuminosa compactada com o compactador de rolo, à deformação permanente.

Para este estudo são colocadas 2 lajes, moldadas pelo compactador de rolo, no equipamento onde são aplicados 10000 ciclos de carga sobre as lajetas a uma velocidade de $26,5 \pm 1,0$ ciclos por minuto. O ensaio é realizado a 60°C e termina quando se atinge o número de ciclos definido, ou quando é atingida uma profundidade de rodeira de 20 mm.



Figura 3.13 – Equipamento do ensaio de pista

O equipamento (Figura 3.13) registra os dados de deformação e temperatura do ensaio em cada ciclo. No fim, obtêm-se os valores da profundidade média do cavado de rodeira, PRD_{AIR} , e a taxa de deformação média WTS_{AIR} .

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (3.15)$$

Onde,

WTS_{AIR} Taxa de deformação média (mm/ 10^3 ciclos)

d_{10000} Taxa de deformação no ciclo 10000 (mm/ 10^3 ciclos)

d_{5000} Taxa de deformação no ciclo 5000 (mm/ 10^3 ciclos)

4 ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

De forma a prever o comportamento das misturas betuminosas com betumes modificados com resíduos plásticos é impreterível a realização de um estudo laboratorial que verifique a viabilidade deste tipo de misturas.

Neste capítulo é apresentado o estudo laboratorial que pretende representar as condições reais de uma camada de pavimento (no presente caso, de uma camada de desgaste). Pretendem-se preparar provetes de misturas betuminosas compactadas representativas da camada do pavimento, sobre os quais são realizados ensaios em condições controladas, de forma a permitir prever o comportamento dos materiais sob as ações climatéricas e de tráfego durante a vida útil do pavimento.

Desta forma, no estudo experimental a desenvolver no âmbito do presente trabalho, será avaliada a compactabilidade das misturas betuminosas, utilizando, na preparação de provetes cilíndricos, quer o compactador de impacto, quer o compactador giratório, adotando diferentes betumes modificados e diferentes temperaturas de compactação. Analisar-se-á também a influência da temperatura de compactação no desempenho da mistura betuminosa devido à incorporação nos betumes de polímeros cujas temperaturas de fusão se situam na ordem dos 130°C para o PEADr (Holden, G., 2011) e 100°C para o EVAr (Honeywell, 2005), valores próximos da gama de temperaturas geralmente recomendadas para a compactação de misturas betuminosas.

O estudo iniciar-se-á pela realização da formulação, através do método de Marshall, de uma mistura betuminosa com o betume Elaster 13/60 (PMB 45/80-60). Após obtenção da percentagem ótima de betume e matriz de agregados compactar-se-ão novos provetes com o betume 70/100 com 5% de EVA reciclado granulado e betume 70/100 com 5% de PEAD reciclado granulado, com a percentagem obtida anteriormente, pelo método de Marshall. Compactar-se-ão provetes às temperaturas de compactação de 155°C, 130°C e 110°C. Escolheram-se estas temperaturas pois 155°C é o valor recomendado pela CEPISA para o betume Elaster e está acima da temperatura de fusão dos polímeros, 130°C

encontra-se dentro da gama da temperatura de fusão do PEAD, e 110°C dentro da gama da temperatura de fusão do EVA. De seguida realizar-se-ão ensaios de caracterização (baridade, baridade máxima teórica e compressão Marshall) das misturas compactadas de forma a perceber qual a temperatura de compactação mais adequada para cada betume. Após análise dos resultados obtidos serão moldados novos provetes com os três betumes, e com a temperatura de compactação mais adequada a cada um, primeiro com o compactador de impacto para posterior realização do ensaio de sensibilidade à água e tração indireta e depois com o compactador giratório. Serão também moldadas lajes, utilizando o compactador de rolo, para realização do ensaio de pista.

Todos os ensaios serão realizados nas instalações do NIT/DT do LNEC, em provetes com agregados fornecidos pela empresa Alves Ribeiro, com o betume Elaster fornecido pela CEPISA e com os betumes 70/100 com 5% de EVA granulado reciclado e 70/100 com 5% de PEAD granulado reciclado produzidos pela UM.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A escolha do tipo de mistura betuminosa recaiu sobre o AC 14 surf ligante (BB), produzido com as frações de agregados 0/4, 4/12, 10/16 e fíler, e o ligante, variável consoante a mistura, como foi referido anteriormente.

Nas misturas betuminosas foram utilizados três tipos de betumes, três temperaturas de compactação e uma mistura de agregados. No Quadro 4.1 apresenta-se a composição de cada uma das misturas betuminosas estudadas no âmbito deste trabalho.

Quadro 4.1 – Identificação das misturas betuminosas

Identificação da Mistura Betuminosa	Mistura de Agregados	Tipo de Ligante Betuminoso	Temperatura de Compactação
ELA 155	Basalto 10/16	Elaster 13/60 PMB 45/80-60	155 °C
ELA 130			130 °C
ELA 110			110 °C
EVAr 155	Basalto 4/12	Betume 70/100 + 5% EVA reciclado granulado	155 °C
EVAr 130	Basalto 0/4		130 °C
EVAr 110	Calcário 0/4		110 °C
PEADr 155	Fíler Comercial	Betume 70/100 + 5% PEAD reciclado granulado	155 °C
PEADr 130			130 °C
PEADr 110			110 °C

4.2.1 AGREGADOS

Os agregados foram recolhidos no estaleiro da empresa Alves Ribeiro, e foram transportados e armazenados no LNEC, onde se realizaram alguns ensaios de caracterização, descritos em seguida.

Na constituição da mistura utilizaram-se as seguintes frações para a mistura de agregados:

- Basalto 10/16;
- Basalto 4/12;
- Basalto 0/4;
- Calcário 0/4;
- Fíler Comercial.

Começou-se por realizar uma análise granulométrica. No Quadro 4.2 encontram-se os resultados obtidos do ensaio de peneiração, para cada fração.

Quadro 4.2 – Percentagem de material passado de cada fração

Abertura dos Peneiros (mm)		20	14	10	4	2	0,5	0,125	0,063
Basalto 10/16	22%	100	70	2	1	1	1	1	0,6
Basalto 4/12	33%	-	100	79	3	1	1	1	0,7
Basalto 0/4	20%	-	-	100	99	73	24	10	8,1
Calcário 0/4	20%	-	-	100	99	77	33	14	9,7
Fíler	5%	-	-	-	-	-	100	89	79,3
Fuso CETO-EP	Min.	100	90	67	40	25	11	6	5,0
	Max.	100	100	77	52	40	19	10	8,0
Curva Final	100%	100	93	72	46	36	17	10	7,9

Na Figura 4.1 pode-se observar a proporção de cada fração de agregados e fíler, utilizados para uma mistura betuminosa.



Figura 4.1 – Composição da mistura de agregados

Na Figura 4.2 está representada a curva granulométrica final obtida utilizando as percentagens escolhidas para cada fração. Esta curva está dentro dos limites preconizados no CETO-EP. Foi utilizada a mesma matriz de agregados em todas as misturas betuminosas deste trabalho.

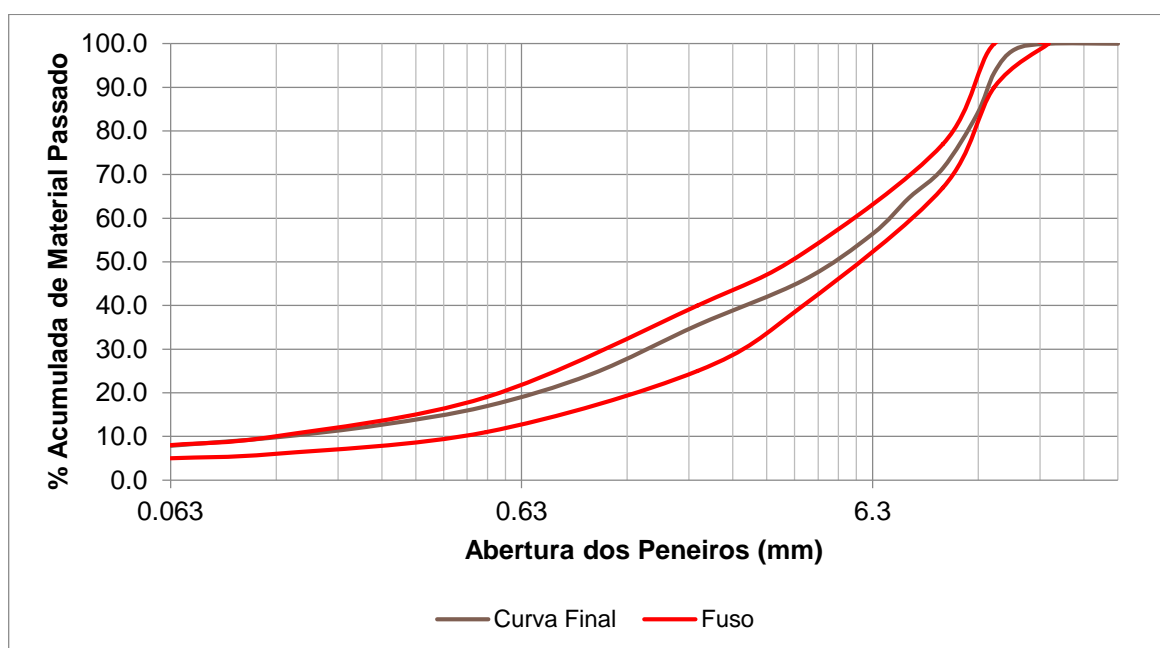


Figura 4.2 – Curva granulométrica

De forma a conhecer melhor a qualidade dos agregados que se iriam utilizar realizaram-se alguns dos ensaios requeridos no CETO-EP. Todos os ensaios foram executados de acordo com as respetivas normas e os resultados encontram-se no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Normas	Resultados			
		Basalto 10/16	Basalto 4/12	Basalto 0/4	Calcário 0/4
Peneiração	EN 933-1	Quadro 4.2			
Índice de Achatamento (%)	EN 933-3	10	25	-	-
Equivalente de Areia (%)	EN 933-8	-	-	71	71
Azul-de-metileno (%)	EN 933-9	-	-	1	3
Los Angeles (%)	EN 1097-2	10	-	-	-
Baridade (Mg.cm⁻³)	EN 1097-3	1,57	1,52	1,48	1,52
Percentagem de Vazios (%)	EN 1097-3	47,1	48,7	48,7	41,4
Massa Volúmica (Mg.cm⁻³)	EN 1097-6	2,965	2,956	2,877	2,599

4.2.2 LIGANTES BETUMINOSOS

Neste estudo foram utilizados betumes com duas origens diferentes. O betume Elaster (ELA) foi fornecido pela CEPISA. Os betumes PEADr e EVAr foram produzidos e fornecidos pela UM, onde foram realizados diversos ensaios de caracterização dos ligantes. O betume ELA, aqui referido, tinha a denominação comercial anterior de Styrelf, quando foram realizados os ensaios na UM. Segundo informação da CEPISA, o Elaster e o Styrelf tratam-se do mesmo tipo de betume modificado tendo apenas mudado a sua designação comercial.

O betume ELA consiste num betume modificado com polímeros do tipo elastomérico. Cumpre as especificações do CETO-EP para betumes modificados do tipo PMB 45/80-60, ou seja, tem uma penetração entre 45 e 80 (0,1 mm) e uma temperatura de amolecimento superior a 60°C. A sua ficha técnica encontra-se no anexo A.1.

O betume EVAr consiste na mistura de um ligante betuminoso tradicional 70/100 com 5% de EVA reciclado granulado e o betume PEADr consiste na mistura de ligante betuminoso tradicional 70/100 com 5% de PEAD reciclado granulado. Na Figura 4.3 pode-se ver uma amostra destes resíduos plásticos que foram posteriormente incorporados no betume 70/100.

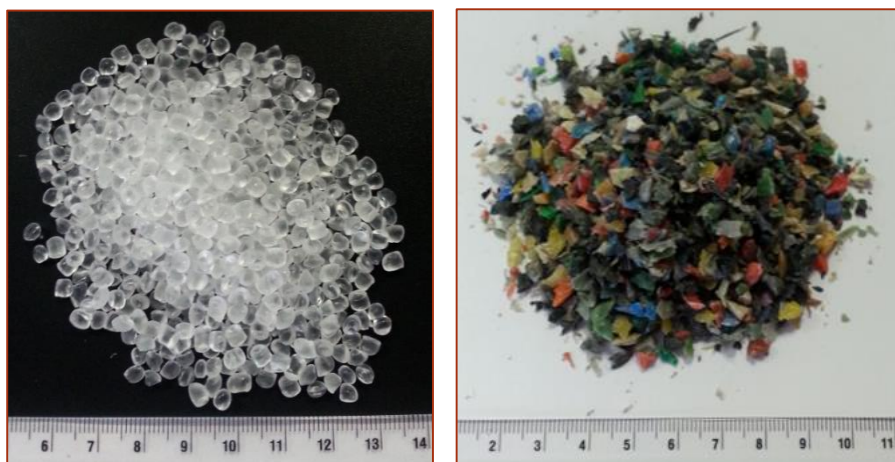


Figura 4.3 – Amostra dos plásticos adicionados aos ligantes betuminosos, à esquerda EVAr e à direita PEADr

Para melhor conhecimento das propriedades dos ligantes betuminosos modificados, realizaram-se, na UM, alguns ensaios de caracterização aos mesmos, cujos resultados se apresentam no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos ligantes betuminosos (adaptado de Costa, L., *et al.*, 2013b)

Ensaio		Normas	Resultados			
			ELA	70/100	EVAr	PEADr
Penetração a 25°C (0,1 mm)		EN 1426	37,2	45,9	26,0	26,6
Temperatura de amolecimento (°C)		EN 1427	65,5	52,2	65,2	71,1
Resiliência (%)		EN 13880-3	21	9	23	11
Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	130°C	EN 13302	3,1	0,8	3,8	3,3
	150°C		1,1	0,3	1,3	1,3
	180°C		0,3	0,1	0,4	0,4
Estabilidade ao Armazenamento	Varição da temperatura de amolecimento (°C)	EN 13399	0,6	-	6,5	64,5
	Varição da penetração (0,1 mm)		1,2	-	52,1	1,5
	Varição na resiliência (%)		1	-	21	25
	Varição na viscosidade a 150°C (Pa.s)		0,4	-	0,2	4,6

É de notar que os betumes EVAr e PEADr não têm nenhum resultado satisfatório à estabilidade ao armazenamento. As principais diferenças entre as propriedades do topo e do fundo do EVAr foram observadas na penetração e resiliência enquanto o PEADr

apresentou maiores diferenças na temperatura de amolecimento e viscosidade, por serem as propriedades mais influenciadas por estes polímeros (Costa, L., *et al.*, 2013b). Segundo estes autores, de forma a contornar a pouca estabilidade ao armazenamento que estes betumes apresentam, é necessário aquecê-los a uma temperatura de 160°C e agitá-los durante cerca de 10 minutos antes da sua aplicação.

4.3 FORMULAÇÃO PELO MÉTODO DE MARSHALL

A formulação foi realizada com o ligante betuminoso Elaster, com uma temperatura de compactação de 155°C, utilizando o método Marshall e seguindo a norma de compactação EN 12697-30.

De acordo com a ficha técnica do betume Elaster (anexo A.1), as temperaturas recomendadas pelo fabricante para moldar provetes são:

- Temperatura de mistura: 155-165 °C;
- Temperatura do ligante: 155-165 °C;
- Temperatura de compactação: 150-160 °C.

Assim, para a formulação, o ligante foi aquecido a 165°C, os agregados a 170°C, a mistura foi feita a 155°C e a compactação a 155°C.

4.3.1 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Para preparar os provetes foi necessário definir quais as percentagens de betume a usar na formulação. Optou-se por percentagens entre 4% e 6% com incrementos de 0,5%, onde foram preparados 4 provetes para cada uma das percentagens. De seguida calculou-se a quantidade de agregados necessária para cada percentagem de betume.

Preparam-se 20 amostras correspondentes a 4 provetes para cada percentagem de betume (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Separação dos agregados para formulação Marshall

4.3.2 COMPACTAÇÃO

Após a separação das frações de agregados nas respectivas quantidades foi necessário aquecê-los à temperatura adequada. Foram então colocados na estufa juntamente com os moldes dos provetes, a uma temperatura aproximada de 170°C. Numa outra estufa foi colocado o betume modificado até atingir uma temperatura de 165°C.

Após as temperaturas serem atingidas, colocaram-se os agregados e a respectiva quantidade de betume no recipiente adequado e misturou-se tudo na misturadora, como se apresenta na Figura 4.5, para assegurar uma adequada homogeneização do material. Foi colocada uma manta de aquecimento à volta do recipiente para garantir a temperatura da mistura.



Figura 4.5 – Misturadora com manta de aquecimento

De acordo com o CETO-EP, a mistura AC 14 surf deve ser moldada com o compactador de impacto utilizando 75 pancadas. Colocou-se a mistura num molde cilíndrico com 101,6 mm de diâmetro e compactou-se com o compactador Marshall, como se pode observar na Figura 4.6, com as 75 pancadas.



Figura 4.6 – Compactador de impacto

Após a compactação foi necessário esperar que os moldes arrefecessem à temperatura ambiente, para depois os desmoldar. Na Figura 4.7 estão representados os provetes correspondentes a cada percentagem de betume.



Figura 4.7 – Provetes moldados para a formulação

4.3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES

Fabricados os provetes foi necessário caracterizá-los realizando os ensaios de baridade, compressão Marshall e baridade máxima teórica, descritos em seguida.

4.3.3.1 Baridade

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento B, provete saturado com a superfície seca (SSD), da EN 12697-6.

Para determinar a baridade começou-se por pesar todos os provetes a seco e registrar a sua massa. De seguida, colocou-se o provete dentro de água a temperatura conhecida (durante 30 minutos) para ficar saturado, registando-se depois o seu peso. Retirou-se o provete da água, secou-se as suas superfícies e pesou-se de novo (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Provetes imersos e respetiva pesagem para cálculo da baridade

4.3.3.2 Ensaio Marshall

Os provetes foram submetidos ao ensaio à compressão Marshall de acordo com a EN 12697-34.

Colocaram-se todos os provetes, intervalados de 5 minutos, dentro de água a 60°C durante 40 a 60 minutos. O estabilómetro foi colocado na estufa durante, pelo menos, 30 minutos a 60°C. Após serem atingidas as temperaturas necessárias, colocou-se o provete no estabilómetro sobre o qual foi aplicado uma carga crescente com um aumento de 50 mm/min. Este processo pode ser observado na Figura 4.9.

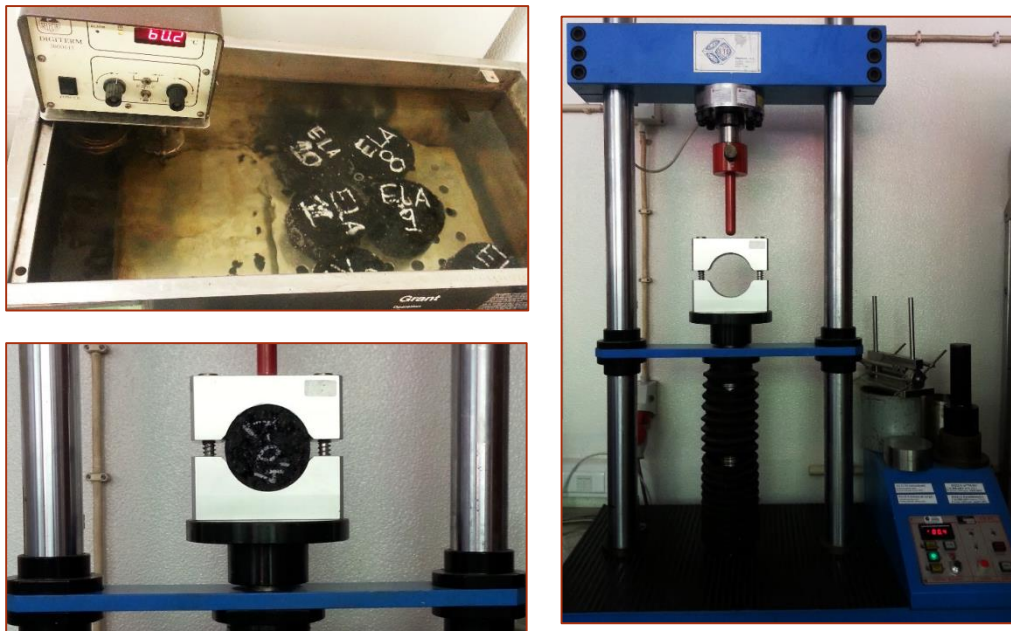


Figura 4.9 – Ensaio à compressão Marshall

Durante a aplicação da carga o programa de ensaio permite o registo dos valores da força de rotura (estabilidade) assim como a correspondente deformação, com base num gráfico semelhante ao da Figura 4.10.

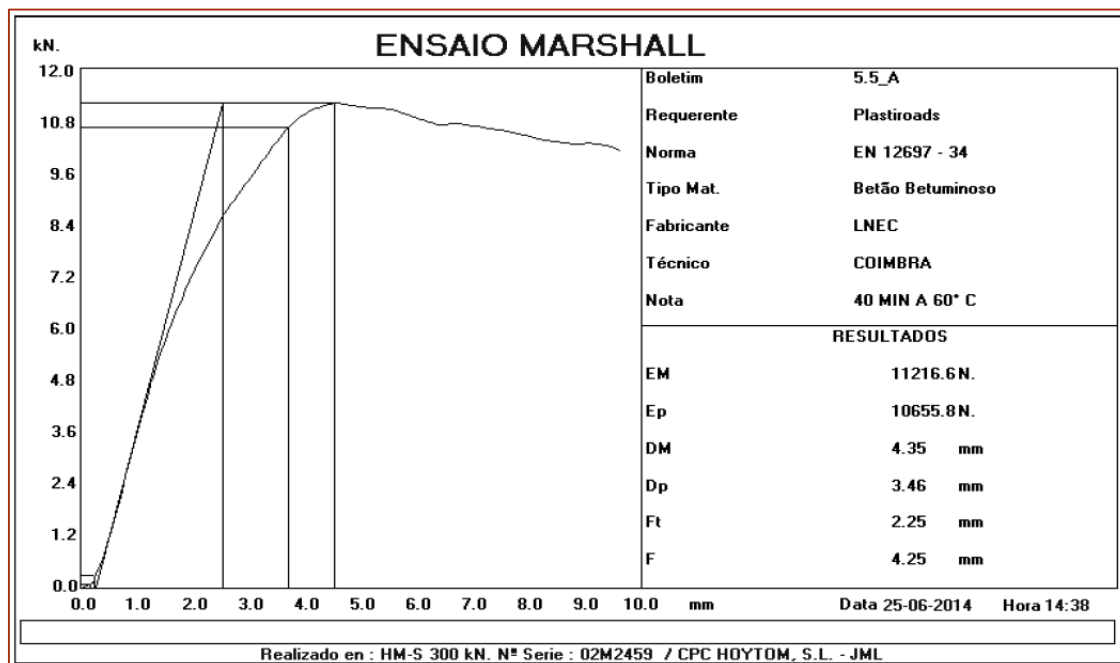


Figura 4.10 – Gráfico resultante do ensaio à compressão Marshall

Na Figura 4.11 pode-se observar a deformação ocorrida num dos provetes após o ensaio à compressão Marshall.



Figura 4.11 – Aspeto de um provete após o ensaio à compressão Marshall

4.3.3.3 Baridade Máxima Teórica

A determinação da baridade máxima teórica foi efetuada de acordo com o procedimento A, procedimento volumétrico, descrito na norma de ensaio EN 12697-5.

Começou-se por escolher dois provetes para cada percentagem de betume, optando-se pelos que tinham baridades aparentes que se aproximavam mais. De seguida foi necessário desagregar o provete de forma a ficar com os agregados separados, envoltos apenas no betume.

Foi necessário calibrar o picnómetro antes de efetuar o ensaio. Esta calibração consistiu em pesar o picnómetro vazio, enchê-lo com água e pesá-lo de novo. Não devendo existir grandes variações entre cada pesagem.

Após a calibração iniciou-se o ensaio. Primeiro pesou-se a mistura de forma a utilizar cerca de 1200g de mistura. A seguir colocou-se a amostra no picnómetro e pesou-se este conjunto registando o respetivo valor. Procedeu-se então ao enchimento do picnómetro com água tendo o cuidado de eliminar as bolhas de ar. Por fim pesou-se tudo e registou-se a temperatura da água (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Ensaio da baridade máxima teórica

4.3.3.4 Resultados

Após a realização dos referidos ensaios para caracterização das misturas betuminosas foi possível determinar alguns valores e calcular outros, como indicado em 3.2.3. No Quadro 4.5 são apresentados os valores médios obtidos.

Quadro 4.5 – Resultados dos ensaios das misturas betuminosas com as diferentes percentagens de betume ELA

Ensaio	Normas	Resultados				
		4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%
Baridade (Mg.m⁻³)	EN 12697-6	2,560	2,599	2,599	2,593	2,592
Estabilidade (kN)	EN 12697-34	17,1	16,1	14,0	13,3	13,5
Deformação (mm)	EN 12697-34	3,8	3,7	3,7	4,2	5,3
Baridade Máxima Teórica (Mg.m⁻³)	EN 12697-5	2,695	2,734	2,692	2,620	2,660
Porosidade (%)	EN 12697-8	5,0	5,0	3,4	1,0	2,6
Vazios na Mistura de Agregados (%)	EN 12697-8	19,9	16,3	16,1	14,9	17,7
Vazios na Mistura de Agregados Preenchidos com Ligante (%)	EN 12697-8	66,6	69,6	78,6	93,2	85,4
Quociente de Marshall (kN.mm⁻¹)	EN 12697-34	4,5	4,3	3,8	3,2	2,5

Após observação dos valores encontrados para as diferentes propriedades é necessário decidir qual a percentagem ótima de betume. Este valor foi obtido tendo por

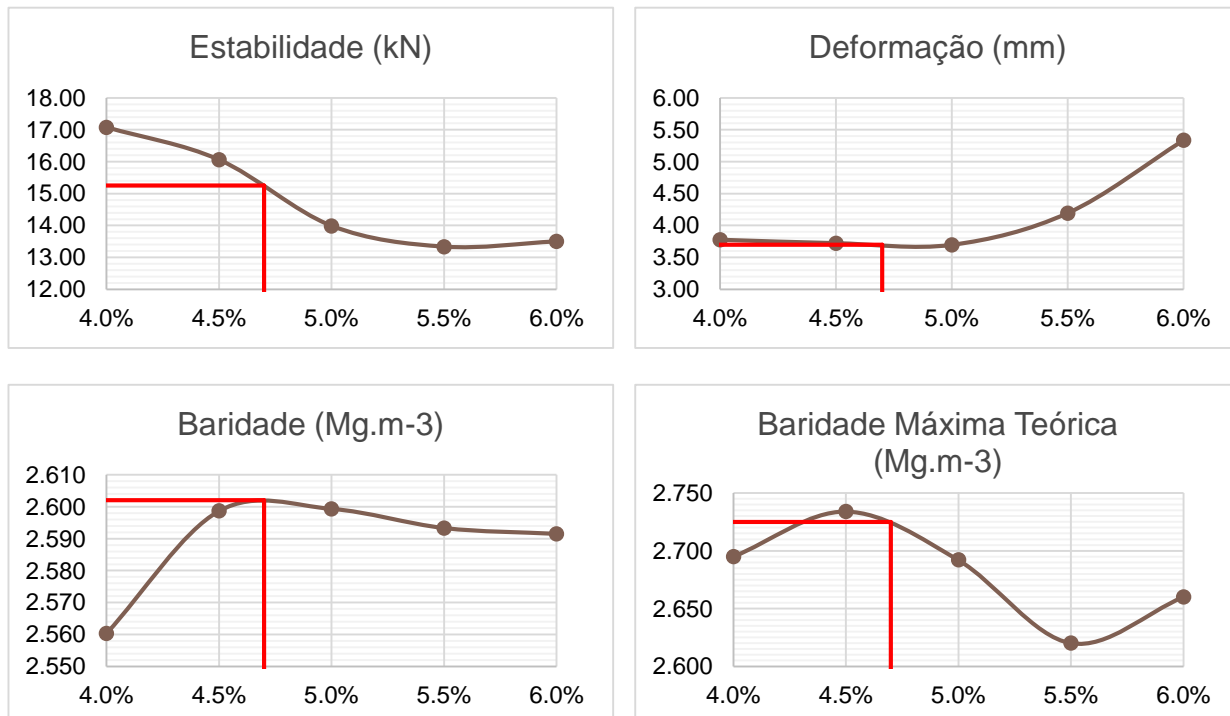
base o anexo nacional, não normativo, da EN 13108-1. Esta percentagem resulta da média das percentagens de betume que representam o valor máximo da baridade da mistura betuminosa compactada, o valor médio de porosidade dentro dos limites definidos, neste caso 4%, e o valor máximo da estabilidade Marshall.

Na Figura 4.13 estão representados os gráficos correspondentes aos valores obtidos dos ensaios realizados aos provetes compactados. A percentagem ótima foi então representada pela média dos seguintes valores:

- Percentagem de betume correspondente ao valor máximo da baridade: 5,0%
- Percentagem de betume correspondente ao valor máximo da estabilidade: 4,0%
- Percentagem de betume correspondente ao valor médio da porosidade (4%): 4,8%

Obteve-se uma percentagem de betume ótima de 4,7% que será a percentagem de betume ótima a utilizar nos ensaios realizados a seguir.

Na Figura 4.13 estão apresentados, a vermelho, os valores expectáveis correspondentes a cada propriedade do provete com 4,7%.



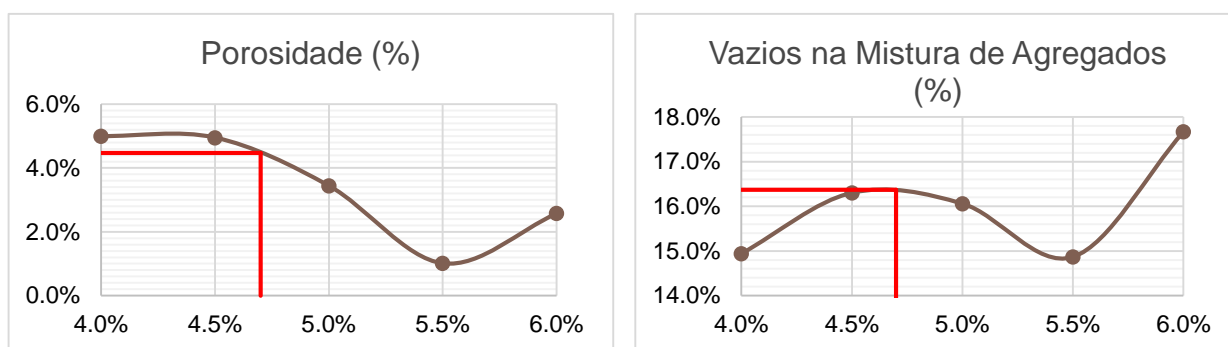


Figura 4.13 – Gráficos das características dos provetes de formulação Marshall

Analisando os resultados é de notar alguns comportamentos atípicos, nomeadamente na porosidade que apresenta valores bastante irregulares devido às baridades e baridades máximas teóricas obtidas. Para o provete com 5,5% de betume apresenta um valor muito baixo que aumenta logo nos provetes com 5,0% e 6,0% de betume.

Não se regista grande variação nos resultados obtidos para as diferentes propriedades das misturas com percentagens mais baixas, 4,0% e 4,5%, sendo alguns iguais, nomeadamente na porosidade. A exceção é a baridade máxima teórica onde se verifica um ligeiro aumento na percentagem de betume maior.

A estabilidade mostra uma tendência para diminuir com o aumento da percentagem de betume enquanto a deformação aumenta com o aumento da quantidade de betume.

4.3.4 PROVETES MOLDADOS COM O COMPACTADOR DE IMPACTO, COM A PERCENTAGEM ÓTIMA DE BETUME

Obtida a percentagem ótima de betume foi necessário compactar novos provetes com os diferentes betumes modificados e temperaturas de compactação.

Preparam-se 36 amostras correspondentes a 4 provetes para cada tipo de betume modificado e temperatura.

Sabendo que os polímeros a utilizar são sensíveis à temperatura considerou-se oportuno avaliar a importância da temperatura de compactação no desempenho da mistura betuminosa. Por este motivo, e como referido anteriormente, utilizaram-se as temperaturas de compactação de 155°C, 130°C e 110°C. Escolheram-se estas temperaturas pois 155°C é o valor recomendado pela CEPISA para o betume Elaster e está acima da temperatura de fusão dos polímeros, 130°C encontra-se dentro da gama da temperatura de fusão do PEAD, e 110°C dentro da gama da temperatura de fusão do EVA.

Utilizou-se então 4,7% de betume modificado em todos os provetes que foram compactados com 75 pancadas, com o ligante ELA, EVAr e PEADr. Cada betume foi aquecido a 165°C e os agregados e restante material a 170°C. Após a mistura e, antes de se compactar, verificou-se a temperatura de forma a compactar a mistura a 155°C, 130°C ou 110°C, consoante o provete.

A Figura 4.14 mostra os 36 provetes depois de compactados.



Figura 4.14 – Provetes Marshall com a percentagem ótima betume

Fabricados os provetes foi necessário caracterizá-los realizando os ensaios de baridade, compressão Marshall e baridade máxima teórica. No Quadro 4.6 é possível verificar quais os valores obtidos nos ensaios efetuados.

Quadro 4.6 – Resultados dos ensaios das misturas betuminosas com a percentagem ótima de betume ELA, EVAr e PEADr

Temperatura (°C)	ELA			EVAr			PEADr		
	155	130	110	155	130	110	155	130	110
ρ_b (Mg.m ⁻³)	2,620	2,597	2,574	2,613	2,602	2,591	2,598	2,585	2,593
S (kN)	16,3	16,4	15,1	13,0	12,7	11,8	14,7	14,3	13,3
F (mm)	3,8	3,3	3,7	3,2	3,7	2,9	3,2	2,9	3,8
ρ_m (Mg.m ⁻³)		2,667			2,712			2,680	
Vm (%)	1,8%	2,6%	3,5%	3,7%	4,1%	4,5%	3,0%	3,6%	3,2%
VMA (%)	13,7%	14,5%	15,2%	15,6%	15,9%	16,3%	14,9%	15,4%	15,1%
VFB (%)	87,0%	81,8%	77,1%	76,6%	74,5%	72,5%	79,6%	76,8%	78,5%
Q (kN.mm ⁻¹)	4,3	4,9	4,1	4,0	3,5	4,1	4,6	4,9	3,5

Na Figura 4.15 encontram-se representados os valores obtidos sob a forma de gráficos para facilitar a observação dos resultados encontrados.

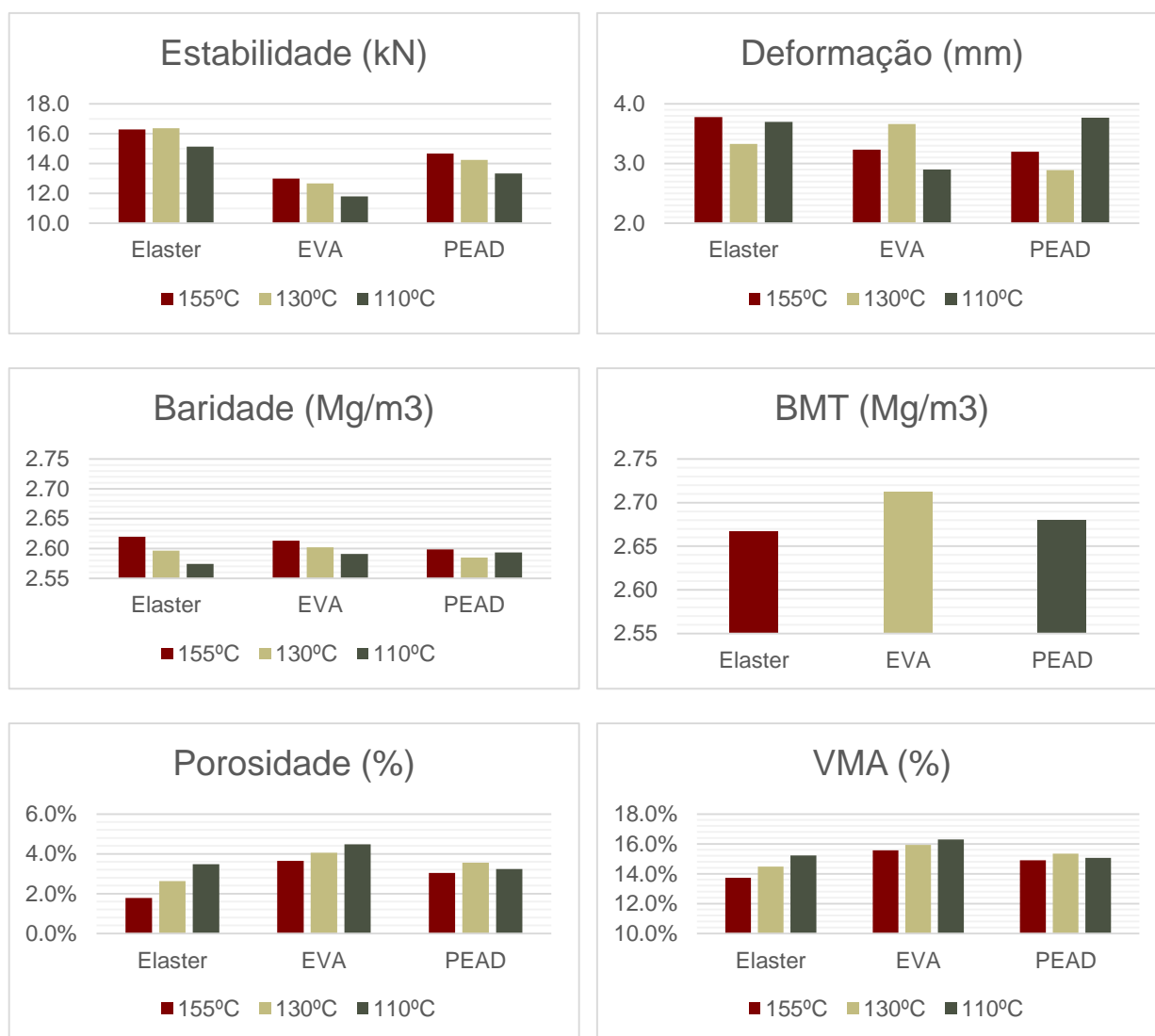


Figura 4.15 – Gráficos com as características dos provetes Marshall

Da observação do Quadro 4.6 e da Figura 4.15, apesar de se ter registado alguma variabilidade nos resultados obtidos, podem-se verificar as seguintes tendências:

- A baridade das misturas betuminosas compactadas diminui com a temperatura de compactação, para todos os tipos de betume modificado;
- A estabilidade de uma mesma mistura betuminosa também diminui com a temperatura de compactação, o que certamente estará relacionado com a maior porosidade das misturas;
- Relativamente à deformação não foi possível observar uma tendência.

4.4 PROVETES MOLDADOS COM O COMPACTADOR GIRATÓRIO

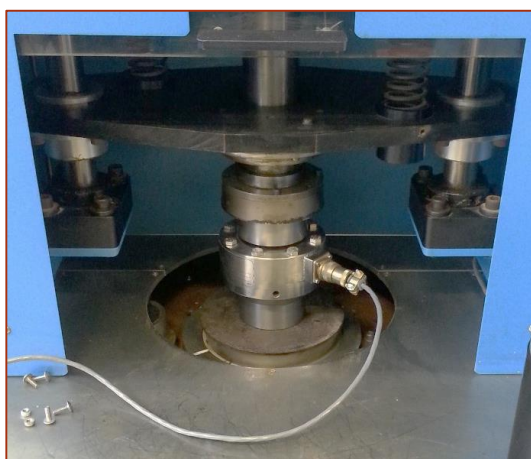
Antes de se moldar provetes com o compactador giratório foi necessário efetuar a calibração dos diversos parâmetros do equipamento. De seguida realizaram-se algumas experiências com diferentes critérios para que se pudesse encontrar os valores mais adequados a utilizar para este tipo de misturas. Por fim compactaram-se alguns provetes com este equipamento.

4.4.1 CALIBRAÇÕES DO EQUIPAMENTO

O manual do compactador giratório (Troxler Electronic Laboratories, Inc., 2006b) recomenda a calibração do equipamento pela seguinte ordem: primeiro a pressão, depois o ângulo de rotação e, por fim, a altura. Nas secções seguintes serão descritas as calibrações efetuadas.

4.4.1.1 Calibração da Pressão

A pressão foi calibrada através da introdução de uma célula de carga no lugar do molde e aplicação da pressão (Figura 4.16). De seguida, utilizando o menu do equipamento imprimiu-se um ficheiro com a leitura da pressão. A norma EN 12697-31 recomenda que a pressão seja de 600 ± 18 kPa, valor que foi o obtido na média das três medições realizadas.



```
*****
Troxler 4140 Gyratory Compactor
SN: 130
Date: 12/06/14 Time: 11:17 am
*****
HEIGHT CALIBRATION
Time: 11:15 am Date: 12/06/14
Actual: 114.30 mm Measured: 114.40 mm
Pressure: 600 KPa Mold Size: 100 mm
```

Figura 4.16 – Equipamento para calibração da pressão, à esquerda, e ficheiro da calibração da pressão, à direita

4.4.1.2 Calibração do Ângulo

A calibração do ângulo interno do compactador giratório foi efetuada utilizando o DAV II e de acordo com o manual de instruções deste aparelho (Troxler Electronic Laboratories, Inc., s.d.).

Começou-se pela calibração do DAV II, para tal colocou-se o aparelho em cima de uma peça de forma prismática que ajudou a encaixar na peça em forma de L, como se pode observar na Figura 4.17, tendo-se tido o cuidado de verificar se os sensores do DAV II estavam corretamente posicionados na peça.

De seguida ligou-se o DAV II ao computador, através de um cabo, e registaram-se os dados, utilizando o *software* fornecido com o aparelho. Foram obtidas 4 leituras na calibração.



Figura 4.17 – Calibração do DAV II

Após a calibração deverá obter-se um gráfico semelhante ao da Figura 4.18 onde está registado, no eixo horizontal, a data e hora da calibração, e no eixo vertical, a distância entre o sensor e a peça em L. Quando o gráfico tem a ordenada igual a zero significa que o DAV II não está em contacto com a peça em L (1). Quando a ordenada do gráfico é diferente de zero, mas horizontal representa o ângulo que o aparelho tem (2).



Figura 4.18 – Registo da calibração do DAV II

Foram feitas 3 medições com o DAV II sendo depois utilizada a média entre estas na folha de cálculo fornecida com o aparelho. Dos valores registados nesta calibração obteve-se o seguinte gráfico.

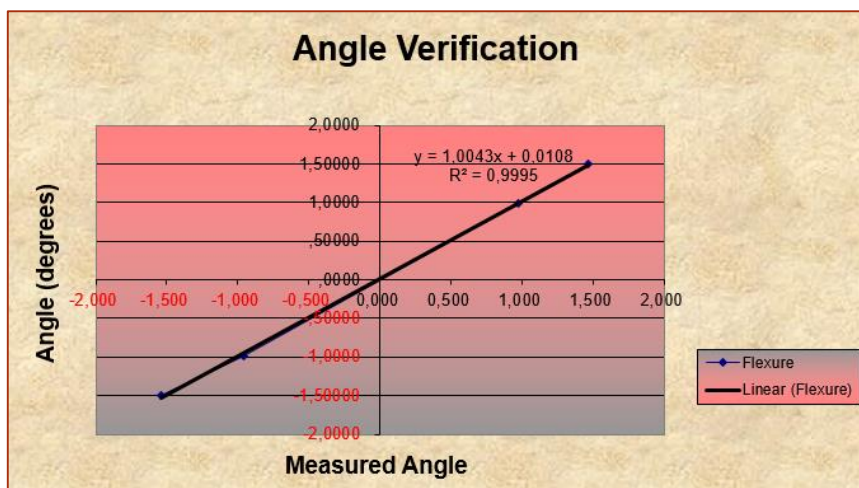


Figura 4.19 – Verificação do ângulo do DAV II

Daqui foi necessário analisar a equação do gráfico, $y=1,0043x+0,0108$, que mostra em que percentagem e para que lado o aparelho tem erro. Neste caso, 1,0043, significa que está 0,43% acima do ângulo real.

O valor do R^2 é também um parâmetro muito importante pois estabelece o quão linear a linha é. Este valor deve situar-se entre 0,999 e 1, segundo o manual do aparelho.

No Quadro 4.7, os ângulos medidos são os valores registados pelo DAV II, os ângulos de referência são os valores estabelecidos no aparelho como corretos. Cada valor resulta dos obtidos na Figura 4.18.

Quadro 4.7 – Ângulos para a calibração do DAV II

Média dos ângulos medidos	Ângulo de referência
1,470	1,496
0,977	0,991
-0,955	-0,990
-1,541	-1,503

Após a verificação da calibração do DAV II pode-se proceder à calibração do GC que foi feita através da utilização de pratos (Figura 4.20), como referido em 3.3.2.2.

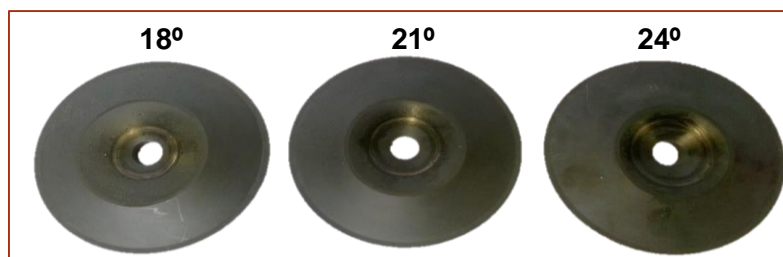


Figura 4.20 – Pratos utilizados na calibração do ângulo do GC

O prato de 18° foi colocado no topo do DAV II, como mostra a Figura 4.21, e inserido no molde de 150 mm do GC. Após as 20 rotações foi colocado o prato no fundo do molde com o DAV II ao contrário.

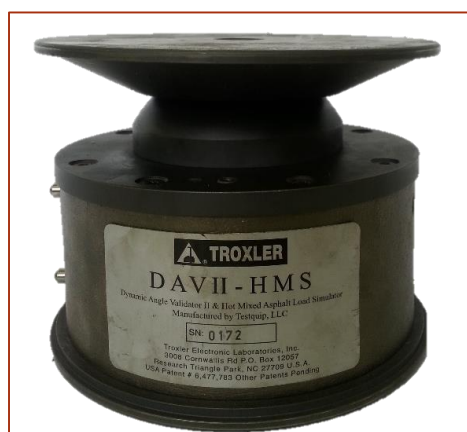


Figura 4.21 – DAV II com o prato de 18° no topo

Repetiu-se o processo para os restantes pratos e por fim ligou-se o aparelho ao computador onde se obteve o gráfico da Figura 4.22. Quando o gráfico tem a ordenada igual a zero significa que o DAV II não está a medir o ângulo (1). Quando a ordenada do gráfico é diferente de zero (2), representa o ângulo que o aparelho está a registar em cada rotação. As variações observáveis em (3) estão relacionadas com o movimento provocado ao DAV II quando se troca o prato ou quando se alterna da medição do topo para a do fundo e vice-versa.

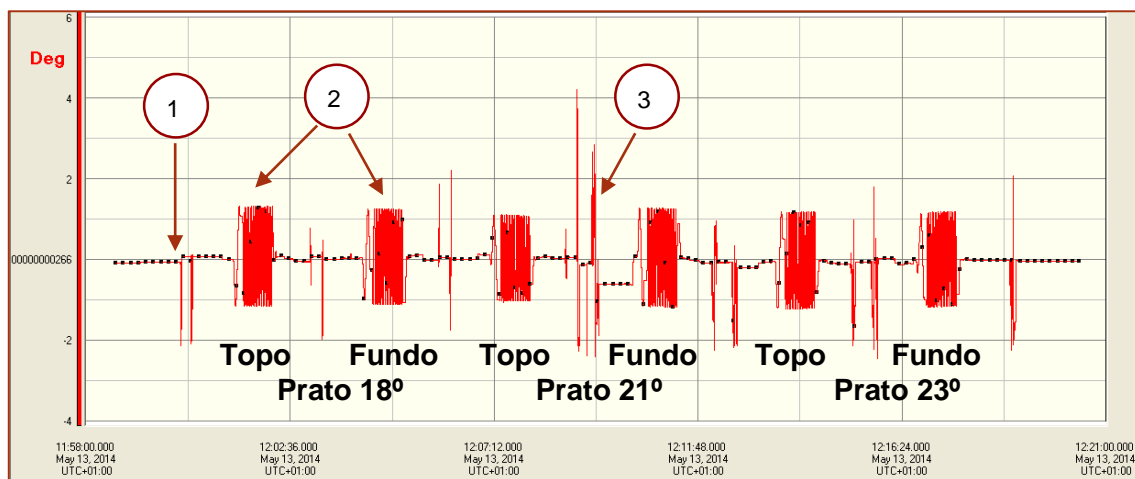


Figura 4.22 – Medição do ângulo no GC

Foram feitas três medições com o DAV II sendo depois utilizada a média entre cada na folha de cálculo fornecida com o aparelho. Foram desprezados os 2 primeiros e 2 últimos valores para minimizar os erros de medição. Com os valores finais obteve-se o gráfico EvA, que relaciona a excentricidade com o ângulo (Figura 4.23)

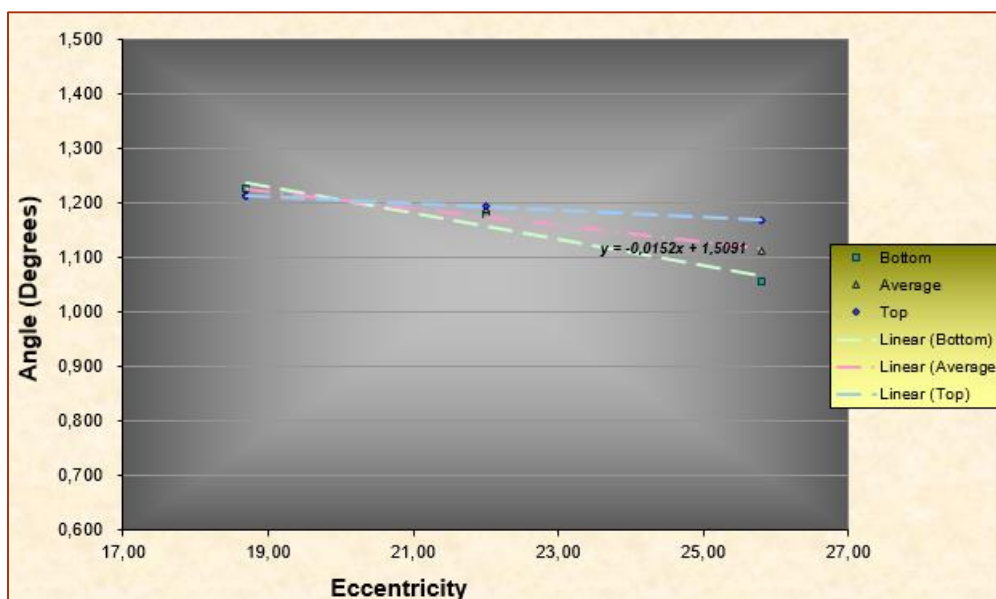


Figura 4.23 – Gráfico EvA para calibração do ângulo GC

Os valores obtidos foram os do Quadro 4.8. O manual refere que a variação entre o ângulo medido no topo e o medido no fundo, em cada prato, não deverá ser superior a 0,1°, observando os valores registados verifica-se que apenas o do prato 25,80 mm se situa na ordem dos 0,1°.

Quadro 4.8 – Valores obtidos para calibração do ângulo interno do GC

Excentricidade (mm)		18,70	22,00	25,80
Ângulo (°)	Topo	1,212	1,196	1,167
	Fundo	1,227	1,180	1,058
	Média	1,219	1,188	1,113
	Variação	0,015	0,016	0,109

4.4.1.3 Calibração da Altura

A altura foi calibrada através da introdução de uma célula de carga no lugar do molde e aplicação do pé de compactação do GC (Figura 4.24). De seguida, utilizando o menu do equipamento imprimiu-se um ficheiro com a leitura da altura. A norma recomenda que a altura seja de 115 ± 5 mm que foi o obtido na média das 3 medições realizadas.



```

*****
                TROXLER 4140 Gyrotory Compactor
                  SN: 130
          Date: 12/06/14           Time: 11:17 am
*****
HEIGHT CALIBRATION
Time: 11:15 am           Date: 12/06/14
Actual: 114.30 mm       Measured: 114.40 mm
Pressure: 600 KPa       Mold Size: 100 mm

```

Figura 4.24 – Equipamento para calibração da altura, à esquerda, e ficheiro da calibração da altura, à direita

4.4.1.4 Calibração da Velocidade de Rotação

A velocidade de rotação foi calibrada através da medição do número de rotações em 1 minuto (Figura 4.25). A norma recomenda que esta velocidade seja de $(30 \pm 0,5)$ rpm.



Figura 4.25 – Calibração da velocidade de rotação

4.4.2 PRIMEIRAS EXPERIÊNCIAS COM O EQUIPAMENTO

Foram realizadas algumas experiências iniciais com o compactador giratório, apresentadas em seguida. Todas estas experiências foram realizadas com 5,0% de betume Elaster na mistura e foram compactadas a 155°C.

Uma das características fundamentais deste equipamento é a possibilidade de compactar provetes com vista a obter uma determinada porosidade. Assim, teoricamente, é possível compactar um provete com uma porosidade muito reduzida, praticamente nula. Verificou-se então esta condição. Para tal compactou-se um provete com diâmetro de 150 mm e outro com diâmetro de 100 mm, apresentados na Figura 4.26, com 300 rotações ao qual se realizou o ensaio de baridade imersa obtendo-se uma porosidade muito reduzida, quase nula. Foi também possível acompanhar a evolução da altura do provete ao longo da compactação (Figura 4.27Figura 4.26). Devido ao elevado grau de compactação, torna-se difícil retirar o papel do topo e do fundo do provete, que se utiliza para que a mistura não fique agarrada ao fundo.

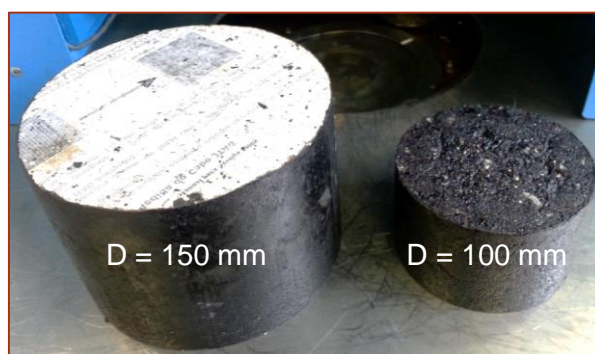


Figura 4.26 – Provetes moldados com o GC com porosidade muito reduzida

Verificou-se também que entre as 125 e as 300 rotações, a altura do provete não varia mais que 1,3 mm, no diâmetro de 150 mm, e 0,45 mm, no diâmetro de 100 mm.

Este pode ser o motivo pelo qual o número máximo de rotações considerado, nos EUA, é 125 para o N_{des} e 203 para o N_{max} , no caso de uma estrada com um tráfego projetado para 20 anos na via mais solicitada superior a 30 milhões e quando se utilizam provetes com um diâmetro de 150 mm.

Para o diâmetro de 100 mm não se encontram valores tabelados, apenas valores recomendados por estudos. Um estudo encontrado, realizado por Tapkin, S. e Keskin, M. (2013) recomenda a utilização de 35 rotações, para misturas betuminosas com betumes modificados moldadas com o molde de diâmetro de 100mm.

Se se observar os valores obtidos no Quadro 4.9, verifica-se que a até à rotação 100 existe uma variação considerável na altura do provete, sendo que se se terminasse a compactação na rotação 35 poderia não se obter a compactação desejada. Assim, é necessário avaliar mais aprofundadamente este parâmetro para os provetes de diâmetro de 100 mm.

Quadro 4.9 – Evolução da altura do provete com o número de rotações

Número de Rotações	Altura do provete (mm)	
	D = 150 mm	D = 100 mm
0	134,80	75,05
10	121,10	68,50
35	113,20	64,75
50	111,30	63,95
75	109,30	63,30
100	108,20	62,95
125	107,50	62,80
150	107,10	62,65
200	106,70	62,50
300	106,20	62,35

Na Figura 4.27 encontra-se, sob a forma de um gráfico, os valores correspondentes às alturas obtidas com ambos os moldes, com as misturas betuminosas compactadas até às 300 rotações.

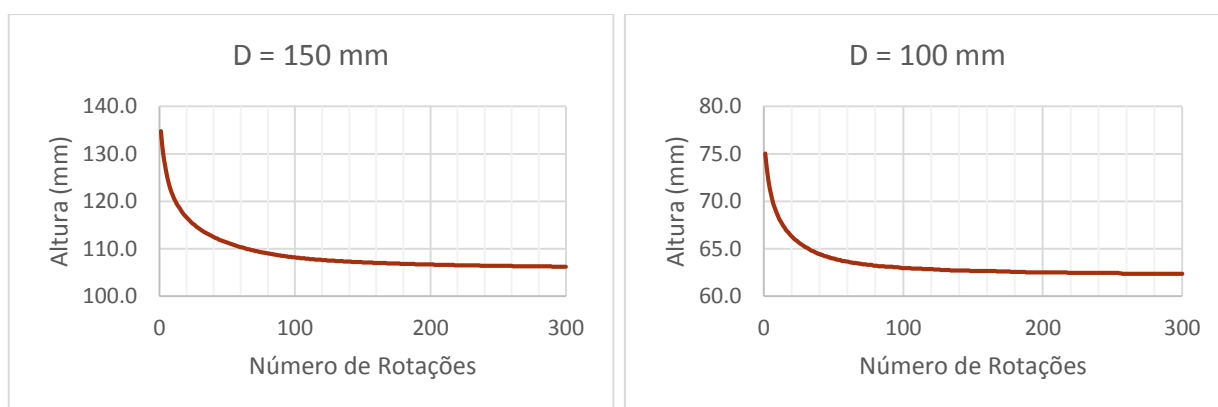


Figura 4.27 – Evolução da altura do provete com o número de rotações

Outra particularidade a ter em conta é a posição do fundo do molde pois se estiver mal posicionada, resulta num provete como o da Figura 4.28 em que a parte de baixo está muito pouco compactada.



Figura 4.28 – Provete resultante da compactação com a base do molde incorretamente colocada

A EN 12697-31 refere que é necessário um período de arrefecimento de 5 a 10 minutos. No entanto, quando se esperou apenas 10 minutos após o fim da compactação, e se retirou a mistura do molde, esta começou a abrir pois não tinha arrefecido o suficiente e conseqüentemente não tinha ainda a estabilidade necessária. Apesar de ter sido novamente colocada no molde e ter bom aspeto (Figura 4.29), a porosidade esperada era de 4% mas resultou em 7%. Após este episódio começou-se a aguardar, pelo menos, 2 horas antes de se proceder ao desmolde. Há que ter em conta que retirar o molde do equipamento provoca o movimento da base podendo também resultar numa deformação.



Figura 4.29 – Provete erradamente desmoldado

É aconselhado marcar a forma como o provete é compactado identificando o lado de cima e o lado de baixo (Figura 4.30).



Figura 4.30 – Identificação dos provetes

4.4.3 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Realizaram-se 2 grupos distintos, caracterizados em seguida, para a realização de diferentes ensaios. Devido à existência de apenas um molde de 100 mm de diâmetro e outro de 150 mm podiam-se moldar somente 2 provetes por dia, sendo necessário esperar que o molde arrefecesse para se poder desmoldar e utilizá-lo de novo. Os provetes descritos em seguida foram moldados utilizando apenas o molde com 100 mm de diâmetro.

No primeiro grupo, compactaram-se 2 provetes com o ELA 155 utilizando 4,0%, 4,7% e 5,5% de betume. Prepararam-se 6 amostras correspondes a 2 provetes para cada conjunto do primeiro grupo. Com este grupo pretende-se analisar o comportamento da percentagem da baridade máxima teórica com diferentes percentagens de betume modificado.

No segundo grupo, compactaram 2 provetes com os 3 betumes modificados (ELA, EVAr e PEADr) e utilizando 4,7% de percentagem de ligante. Relativamente às temperaturas de compactação decidiu-se utilizar apenas uma para cada ligante, devido à limitação dos moldes. Optou-se por utilizar 155°C para os ligantes ELA e EVAr e 130°C para o ligante PEADr. Esta escolha foi baseada nos resultados obtidos dos provetes Marshall. Foram então compactados 2 provetes para cada conjunto resultando num total de 6 amostras.

4.4.4 COMPACTAÇÃO

O processo de mistura dos agregados com o betume foi idêntico ao utilizado no método Marshall. Para a compactação utilizou-se o procedimento descrito na norma de ensaio EN 12697-31.



Figura 4.31 – Compactador giratório com o molde de D = 100 mm

Em todos os provetes utilizou-se a mesma pressão, 600 kPa, e a mesma velocidade de rotação, 30 rpm, de acordo com o referido na norma EN 12697-31. Para o primeiro grupo utilizaram-se 300 rotações de forma a cobrir toda a variação de alturas do provete. No segundo grupo programou-se o equipamento para terminar a compactação quando o provete atingisse os 63,5 mm de altura, o que, com a quantidade de material utilizada, correspondeu a rotações entre 9 e 14.

4.4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES

Determinaram-se as características volumétricas (baridade e porosidade) de todos os provetes. Utilizaram-se os valores obtidos na baridade máxima teórica nos provetes moldados anteriormente. Nos provetes do primeiro grupo obtiveram-se porosidades quase nulas pois foram compactados até às 300 rotações. Nos do segundo grupo obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 – Resultados do GC

	Número de Rotações	Altura Final (mm)	Baridade Máxima Teórica (Mg.m ⁻³)	Baridade (Mg.m ⁻³)	Porosidade (%)
ELA 155	9	64,3	2,667	2,518	5,6%
EVAr 155	9	64,0	2,712	2,517	5,4%
PEADr 130	14	63,7	2,680	2,530	5,3%

Realizou-se também o ensaio à compressão Marshall nos provetes do segundo grupo, no entanto, nenhum dos provetes atingiu o pico de carga antes do estabilómetro fechar por completo. Isto poderá ser devido ao baixo número de rotações aplicado que resultou numa fraca compactação.

Na Figura 4.32 expõe-se a evolução da baridade relativa com o número de rotações e com as diferentes percentagens de betume. Como já referido anteriormente é possível observar que a partir da rotação 125, a altura mantém-se relativamente uniforme, sendo por isso desnecessário compactar depois desse ponto, a não ser para verificação do N_{max} .

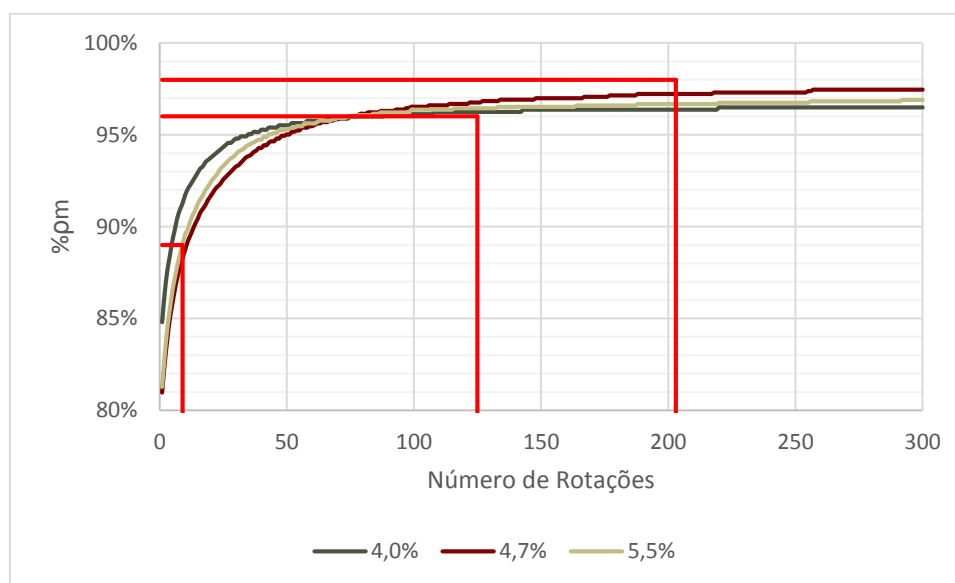


Figura 4.32 – Variação da %pm com o número de rotações, no GC

Nesta figura a primeira linha vermelha corresponde ao N_{ini} de 9 rotações, a segunda ao N_{des} de 125 rotações e a última ao N_{max} de 205 rotações, o que resulta na avaliação da mistura para um tráfego superior a 30 milhões, como se pode ver no Quadro 4.11

Quadro 4.11 – Número de rotações em função do tráfego projetado

N, em milhões (20 anos)	N_{ini}	N_{des}	N_{max}
< 0,1	6	50	75
0,3 a < 3	7	75	115
3 a < 30	8	100	160
> 30	9	125	205

Sabendo que o valor da baridade relativa correspondente ao N_{ini} deve estar acima dos 89%, a do N_{max} deverá ser abaixo dos 98% e a do N_{des} igual a 96%, observando o Quadro 4.12 pode-se observar que todas as percentagens cumprem estes requisitos.

Sabe-se também que para um tráfego projetado para 20 anos na via mais solicitada superior a 30 milhões, o valor de VFB deve situar-se entre os 65% e 75%, neste caso o provete de 5,5% não se enquadra neste requisito. O valor do VMA depende da maior dimensão do agregado, no caso deste estudo é 16,0 mm, no entanto as tabelas referentes ao GC incluem peneiros ASTM, com diferentes dimensões, considerou-se por isso uma dimensão de 19,0 mm, o que corresponde a um valor de VMA mínimo de 13%, sendo que todas estas percentagens de betume cumprem este requisito.

Quadro 4.12 – Resultados do segundo grupo do GC

	BMT (Mg.m⁻³)	%pm em Nini	%pm em Ndes	%pm em Nmax	VMA em Ndes	VFB em Ndes
4,0%	2,695	91,3%	96,2%	96,4%	14,0%	71,5%
4,7%	2,667	88,3%	96,8%	97,2%	15,7%	74,5%
5,5%	2,620	89,0%	96,5%	96,7%	17,4%	77,1%

4.5 LAJES MOLDADAS COM O COMPACTADOR DE ROLO

4.5.1 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Para preparar os provetes foi utilizado 4,7% de betume modificado e foram compactadas 2 lajes para cada conjunto de betume/temperatura de compactação, excepto para o betume ELA para o qual apenas se utilizou a temperatura de compactação de 155°C, por ser a temperatura recomendada pelo fabricante. Prepararam-se 14 amostras correspondentes a 2 lajes para cada conjunto de betume/temperatura de compactação (Figura 4.33).



Figura 4.33 – Preparação dos provetes para o compactador de rolo

4.5.2 COMPACTAÇÃO

O processo de mistura dos agregados com o betume foi idêntico ao utilizado no método Marshall com a diferença de ter sido utilizada uma misturadora maior (Figura 4.34) devido à maior quantidade de material a utilizar para moldar as lajes. A compactação foi feita de acordo com a EN 12697-33.



Figura 4.34 – Misturadora para as lajes moldadas pelo compactador de rolo

Colocou-se a mistura no molde de 305x305x50 mm e, após atingir a temperatura de compactação necessária, compactou-se com o compactador de rolo, como se pode observar na Figura 4.35.



Figura 4.35 – Compactador de rolo

Após a compactação foi necessário esperar que os moldes arrefecessem à temperatura ambiente, para depois os desmoldar, obtendo-se lajes equivalentes à da Figura 4.36.

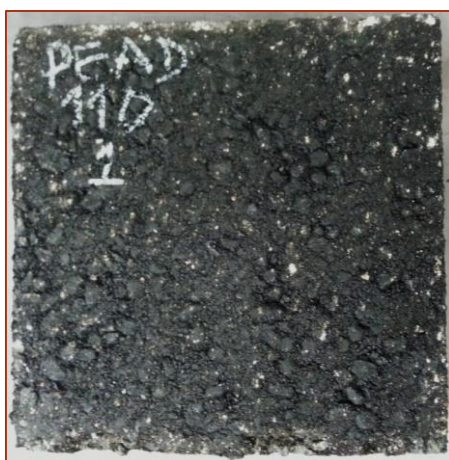


Figura 4.36 – Laje do ELA compactado a 155°C

4.5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PROJETES

Fabricados os provetes foi necessário caracterizá-los realizando o ensaio da baridade, de acordo com o procedimento B, provete saturado com a superfície seca (SSD), da EN 12697-6.



Figura 4.37 – Ensaio de baridade das lajes

Utilizando as baridades máximas teóricas determinadas anteriormente para misturas betuminosas idênticas e as baridades imersas encontradas, calculou-se a porosidade das lajes (Quadro 4.13).

Quadro 4.13 – Porosidades das lajes moldadas pelo compactador de rolo

Laje	BMT (Mg.m ⁻³)	Baridade (Mg.m ⁻³)	Porosidade (%)
ELA 155	2,667	2,641	1,0
EVAr 155	2,712	2,637	2,8
EVAr 130	2,712	2,643	2,6
EVAr 110	2,712	2,633	2,9
PEADr 155	2,680	2,588	3,5
PEADr 130	2,680	2,598	3,1
PEADr 110	2,680	2,576	3,9

A partir do Quadro 4.13 observa-se que a porosidades da laje compactada com o betume ELA é muito baixa. As porosidades obtidas com o EVAr e PEADr são bastante satisfatórias pois encontram-se dentro dos limites normalmente utilizados em cadernos de encargos, como o CETO-EP (2014).

4.6 OUTROS ENSAIOS EFETUADOS

4.6.1 SENSIBILIDADE À ÁGUA E TRAÇÃO INDIRECTA

O ensaio de sensibilidade à água foi realizado de acordo com o procedimento descrito na norma de ensaio EN 12697-12.

Foram moldados 6 provetes para cada conjunto de betume/temperatura de compactação, utilizando o compactador de impacto. Este ensaio foi realizado para os conjuntos ELA 155, EVAr 155, PEADr 155 e PEAD 130. Relativamente às temperaturas de compactação utilizadas decidiu-se utilizar apenas uma para cada ligante, excepto para o PEADr pois tinha apresentado um comportamento dúbio no ensaio Marshall. Optou-se por utilizar 155°C para os ligantes ELA e EVAr e 130°C para o ligante PEADr. Esta escolha foi baseada nos resultados obtidos dos provetes Marshall.

Posteriormente moldaram-se mais 18 provetes com o compactador giratório, com 125 rotações, para avaliação da tração indirecta nos provetes a seco. Este ensaio foi realizado para os conjuntos de 3 provetes do EVAr 155, EVAr 130, EVAr 110, PEADr 155, PEAD 130 e PEAD 110 por forma a analisar o comportamento das novas misturas modificadas, moldadas a todas as temperaturas estudadas, à resistência à tração indirecta.

Preparam-se então, primeiramente, 24 amostras correspondentes a 6 provetes para cada conjunto de betume/temperatura de compactação. Após a compactação dos provetes, estes foram pesados e foi calculado o seu volume pelo método geométrico, efectuou-se também o ensaio de baridade. Com estes dados separaram-se os provetes em 2 conjuntos onde, em cada, a média das alturas não variava mais que 5 mm e a baridade não variava mais que 1,5 Mg.m⁻³.

Colocaram-se 3 provetes de um conjunto a 20±5 °C ao ar, enquanto os outros 3 foram colocados num picnómetro de vácuo em água a 20±5 °C de modo a que a água passasse 2 cm acima dos provetes. Diminui-se o vácuo no picnómetro, gradualmente para evitar contração dos vazios, até 6,7±0,3 kPa, mantendo-se esta pressão durante 30±5 min. A seguir aumentou-se o vácuo até à pressão atmosférica e manteve-se assim durante mais 30±5 min (Figura 4.38).

Determinou-se novamente o volume e rejeitaram-se os provetes onde variasse mais que 2% do valor original.



Figura 4.38 – Ensaio de sensibilidade à água

De seguida submeteram-se os provetes ao ensaio de tração indireta realizado de acordo com o procedimento descrito na norma de ensaio EN 12697-23.

Colocou-se o conjunto de 3 provetes, submetido ao picnómetro de vácuo, dentro de água a 20 ± 5 °C durante um período de 68 a 72 horas. Após este período colocaram-se os provetes dentro de água a 15°C durante 2 horas. Os provetes mantidos a seco foram colocados dentro de sacos impermeáveis que se depositaram dentro de água a 15°C durante 2 horas (Figura 4.39). Por fim, colocaram-se os provetes, individualmente, na prensa Marshall onde foi aplicada uma força vertical permitindo obter o valor da resistência máxima do provete.



Figura 4.39 – Ensaio de tração indireta

Após o ensaio de tração indireta obtiveram-se provetes com falhas ao longo de uma linha relativamente limpa, sem áreas deformadas ao longo da falha. A presença de agregados fraturados é muito pouca, existe apenas um ou dois fragmentos partidos em alguns provetes (Figura 4.40).

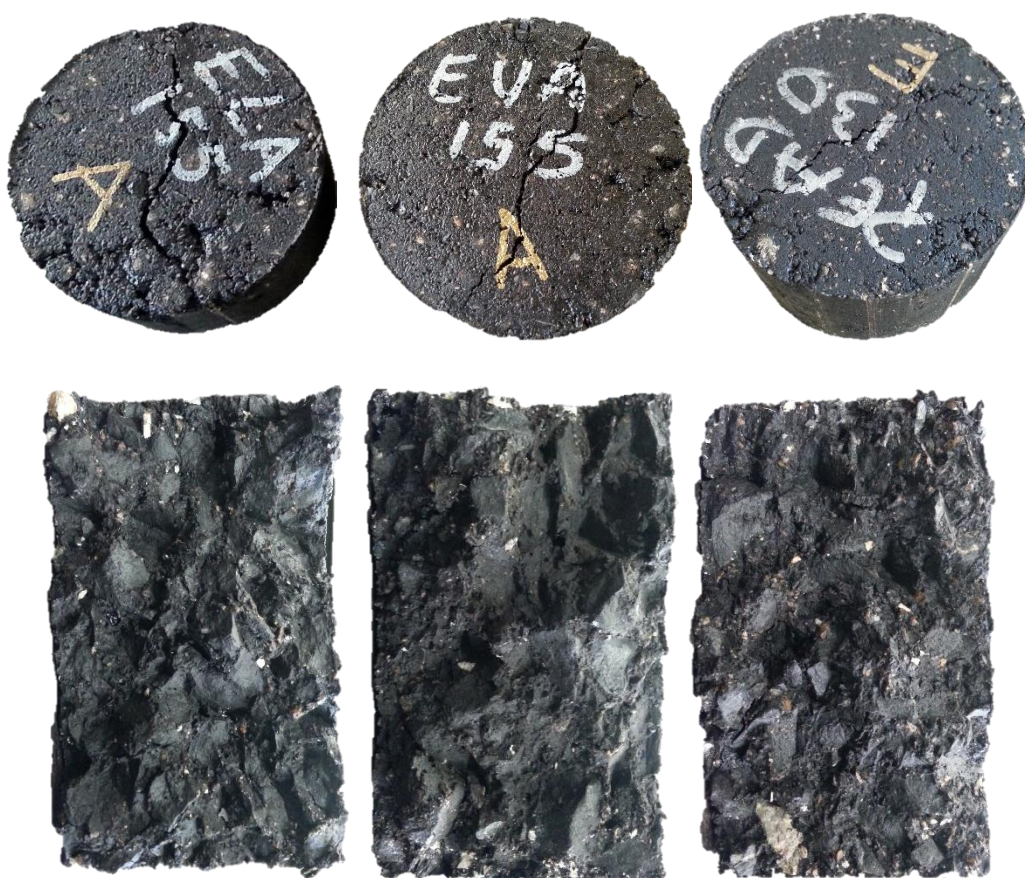


Figura 4.40 – Provetes após o ensaio de tração indireta

Os resultados obtidos do ensaio da resistência à tração indireta são os apresentados no Quadro 4.14, onde se pode observar que os valores obtidos correspondentes à resistência conservada são bastante satisfatórios, situando-se todos acima dos 85%. Tradicionalmente, o valor mínimo exigido nos cadernos de encargos é de 75%, estando todos os resultados acima deste valor.

Quadro 4.14 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água, com os provetes moldados com o compactador de impacto

		ρ_b (Mg.m ⁻³)	V_m (%)	P_{IST} (kN)	ITS_m (kPa)	ITRS (%)
ELA 155	A seco	2,635	1,2	20,0	2100	100
	Imerso	2,635		20,1	2100	
EVAr 155	A seco	2,637	2,8	18,7	1910	108
	Imerso	2,637		19,6	2060	
PEADr 130	A seco	2,614	2,6	19,7	2060	102
	Imerso	2,606		20,1	2100	
PEADr 155	A seco	2,601	3,1	22,8	2120	86
	Imerso	2,592		16,2	1830	

Os resultados do ensaio de sensibilidade à água dos provetes moldados com o compactador giratório estão expressos no Quadro 4.15, podendo-se constatar que os valores obtidos com o compactador giratório foram ligeiramente inferiores àqueles obtidos nos provetes moldados pelo compactador de impacto. No entanto, apresentam boas resistências à tração e valores dentro da mesma gama.

Quadro 4.15 – Resultados do ensaio de tração indirecta, com os provetes moldados com o compactador giratório

	ρ_b (Mg.m ⁻³)	V_m (%)	P_{IST} (kN)	ITS_d (kPa)
EVAr 155	2,643	2,5	20,4	2100
EVAr 130	2,647	2,4	21,4	2200
EVAr 110	2,626	3,2	22,2	3190
PEADr 155	2,611	2,6	20,5	2080
PEADr 130	2,580	3,7	17,5	1750
PEADr 110	2,571	4,1	20,1	1970

4.6.2 ENSAIO DE PISTA

O ensaio de pista foi realizado de acordo com o procedimento para equipamentos de pequenas dimensões descrito na norma de ensaio EN 12697-22.

São colocadas 2 lajes, neste caso, moldadas com o compactador de rolo e com características semelhantes, no equipamento que efetua o ensaio de pista. De seguida definiu-se o equipamento para aquecer a 60°C e as lajes permaneçam a esta temperatura durante pelo menos 4 horas.

Após este tempo iniciou-se o ensaio começando por baixar os pneus até estes estarem em contacto com a laje (Figura 4.41). Foram realizadas 10000 passagens com uma velocidade de $26,5 \pm 1,0$ passagens por minuto. A carga aplicada através do pneu é de 700 ± 10 N.

Foi colocado fíler no meio da laje para evitar que o pneu agarrasse à mistura.

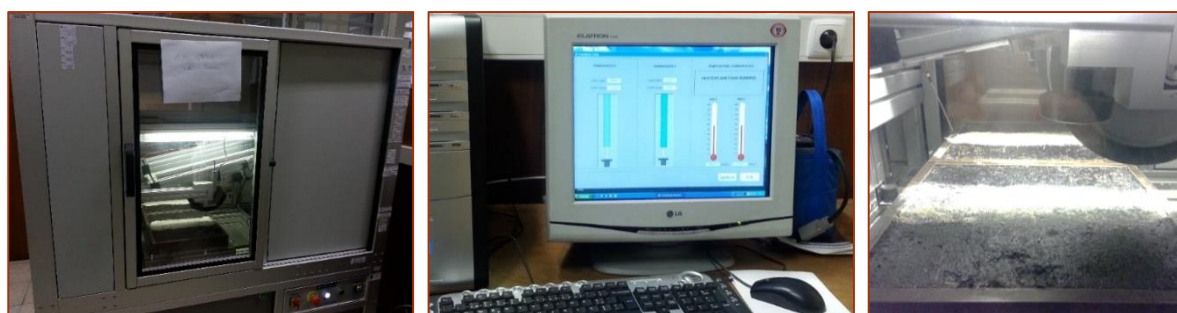


Figura 4.41 – Ensaio de *Pista*

Os gráficos obtidos neste ensaio constam na Figura 4.42 onde se pode observar a evolução da deformação ao longo do número de passagens. Apesar de estarem representados nos gráficos, ambas as lajetas, para alguns considerou-se apenas uma, como é o caso do EVAr 130, EVAr 155 e PEADr 155 onde só se considerou a amostra 1, devido aos resultados irregulares da segunda amostra. Pressupõe-se que nestes moldes com comportamentos atípicos poderá ter caído algum material, que tenha sido empurrado para o lado, na zona de passagem da roda resultando num valor de deformação anómalo.

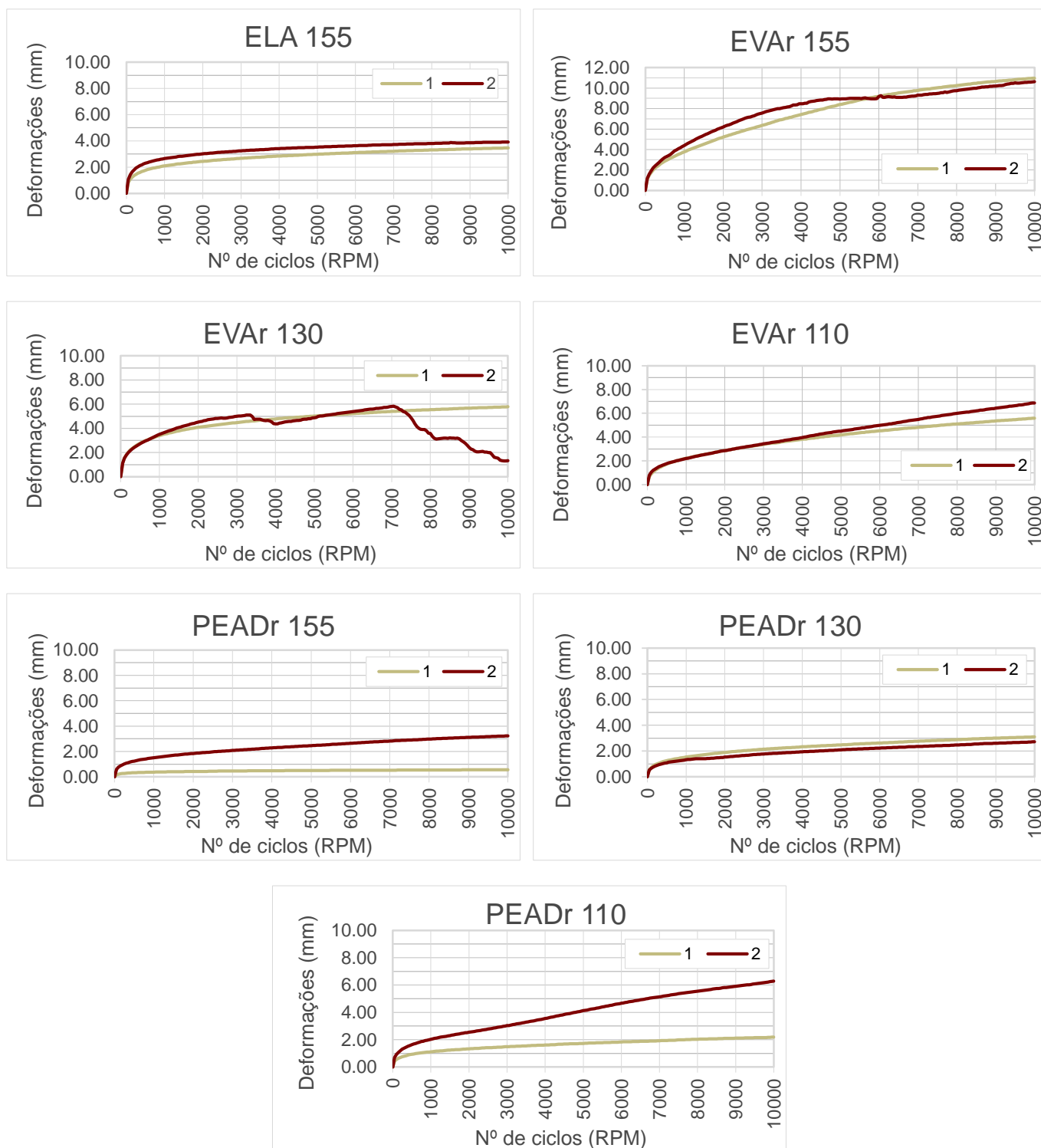


Figura 4.42 – Gráficos dos resultados com o Ensaio de Pista

Na Figura 4.43 pode-se observar o estado de duas das lajes após o ensaio de pista. Verifica-se que na zona lateral ao local onde passou o pneu sofreu levantamento dos agregados e betume. Em algumas lajes verifica-se alguma ondulação na zona do pneu podendo isso demonstrar que o material foi empurrado.

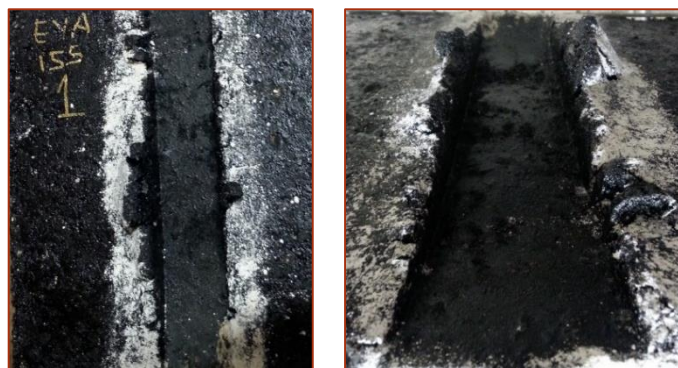


Figura 4.43 – Deformação pelo ensaio de pista nas lajetas EVA 155 e PEAD 130, respetivamente

Após a análise dos dados registados calculou-se a taxa de deformação média (WTS_{AIR}) e a percentagem da profundidade de rodeira (PRD_{AIR}), conforme se apresenta no Quadro 4.16.

Quadro 4.16 – Resultados obtidos com o ensaio de pista

Provete	Média da profundidade da rodeira a 10000 ciclos (mm)	WTS_{AIR} ($mm \cdot 10^{-3}$ ciclos)	PRD_{AIR} (%)
ELA 155	3,7	0,09	7,4
EVAr 155	5,5	0,26	11,0
EVAr 130	2,9	0,08	5,8
EVAr 110	6,2	0,38	12,4
PEADr 155	0,3	0,01	0,6
PEADr 130	2,9	0,12	5,8
PEADr 110	4,2	0,26	8,4

Analisando a Figura 4.44 verifica-se que as lajes que incorporam os ELA 155, PEADr 155 e PEADr 130 obtiveram um bom comportamento à resistência à deformação permanente. O EVAr registou um comportamento atípico numa das lajes compactadas para todas as temperaturas.

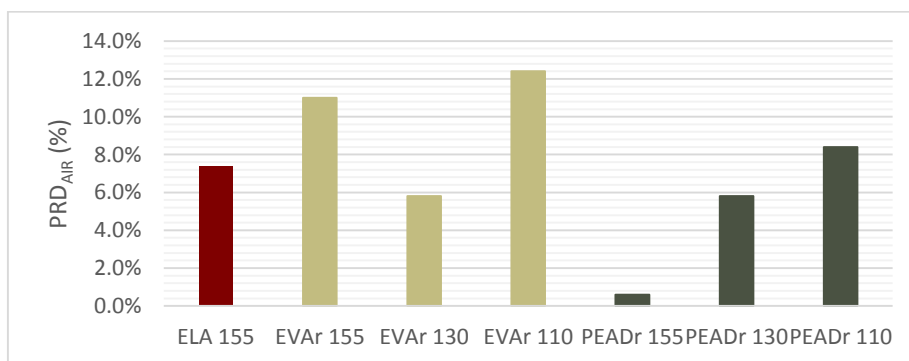


Figura 4.44 – Valores obtidos para a percentagem da profundidade de rodeira

4.7 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste trabalho foram moldados mais de 150 provetes de misturas betuminosas com os 3 diferentes ligantes e as 3 diferentes temperaturas de compactação.

No Quadro 4.17 apresenta-se um resumo dos principais resultados obtidos ao longo do trabalho. Todos os valores exibidos neste quadro resultam de provetes com 4,7% de betume.

Quadro 4.17 – Síntese dos resultados obtidos

Compactador Utilizado	Características	ELA			EVAr			PEADr		
		155	130	110	155	130	110	155	130	110
Compactador de Impacto	ρ_b (Mg.m ⁻³)	2,620	2,597	2,574	2,613	2,602	2,591	2,598	2,585	2,593
	ρ_m (Mg.m ⁻³)		2,667			2,660			2,670	
	V_m (%)	1,8	2,6	3,5	3,7	4,1	4,5	3,0	3,6	3,2
	S (kN)	16,3	16,4	15,1	13,0	12,7	11,8	14,7	14,3	13,3
	F (mm)	3,8	3,3	3,7	3,2	3,7	2,9	3,2	2,9	3,8
Compactador de Impacto (para análise da sensibilidade à água)	ρ_b (Mg.m ⁻³)	2,635	-	-	2,637	-	-	2,597	2,610	-
	V_m (%)	1,2	-	-	2,8	-	-	3,1	2,6	-
	ITS “a seco” (kPa)	2100	-	-	1910	-	-	2120	2060	-
	ITS “imerso” (kPa)	2100	-	-	2060	-	-	1830	2100	-
	ITRS (%)	100	-	-	108	-	-	86	102	-
Compactador Giratório	Nº de rotações	9	-	-	9	-	-	-	14	-
	Altura final (mm)	64,3	-	-	64,0	-	-	-	63,7	-
	ρ_b (Mg.m ⁻³)	2,518	-	-	2,517	-	-	-	2,530	-
	V_m (%)	5,6	-	-	5,4	-	-	-	5,3	-
Compactador Giratório (para análise à tração indireta)	Nº de rotações	-	-	-	125	125	125	125	125	125
	Altura final (mm)	-	-	-	63,9	64,6	66,2	63,7	63,6	64,3
	ρ_b (Mg.m ⁻³)	-	-	-	2,643	2,647	2,626	2,611	2,580	2,571
	V_m (%)	-	-	-	2,5	2,4	3,2	2,6	3,7	4,1
	P_{IST} (kN)	-	-	-	20,4	21,4	22,2	20,5	17,5	20,1
	ITS “a seco” (kPa)	-	-	-	2100	2200	3190	2080	1750	1970

Quadro 4.17 – Síntese dos resultados obtidos (continuação)

Compactador Utilizado	Características	ELA			EVAr			PEADr		
		155	130	110	155	130	110	155	130	110
Compactador de Rolo	ρ_b (Mg.m ⁻³)	2,641	-	-	2,637	2,643	2,633	2,588	2,598	2,576
	V_m (%)	1,0	-	-	2,8	2,6	2,9	3,5	3,1	3,9
	WTS _{AIR} (mm.10 ⁻³ ciclos)	0,09	-	-	0,26	0,08	0,38	0,01	0,12	0,26
	PRD _{AIR} (%)	7,4	-	-	11,0	5,8	12,4	0,6	5,8	8,4

Apesar de se ter seguido os critérios dos procedimentos de ensaio, tendo especial cuidado com as temperaturas utilizadas em todo o processo de compactação devido à importância que as mesmas têm no comportamento do betume, há que salientar a grande variabilidade encontrada, nomeadamente nas porosidades tanto dos provetes utilizados para a formulação como para os restantes moldados para outros fins.

Nas secções seguintes serão apresentados gráficos obtidos dos valores apresentados no Quadro 4.17.

4.7.1 POROSIDADE

Analisando a Figura 4.45, pode-se verificar as seguintes tendências:

- A porosidade obtida pelo compactador giratório, nos provetes moldados com as temperaturas de compactação mais baixas, é superior à dos restantes equipamentos, o que se pode dever ao facto da mistura já sendo mais fria é colocada num molde a frio podendo resultar numa compactação menos boa;
- A porosidade das misturas betuminosas compactadas aumenta com a temperatura de compactação, para todos os tipos de betume modificado e utilizando o compactador de impacto;
- Relativamente ao compactador de rolo, as porosidades dos provetes compactados a 130°C são inferiores às dos provetes produzidos a 155°C e 110°C;
- No geral, o compactador de impacto é o que se aproxima mais da porosidade considerada ideal, 4%. No entanto, deve-se ter em conta que ao utilizar os outros dois compactadores é possível obter-se as porosidades desejadas sendo necessário ajustes na baridade utilizada para o cálculo da quantidade de material a utilizar.

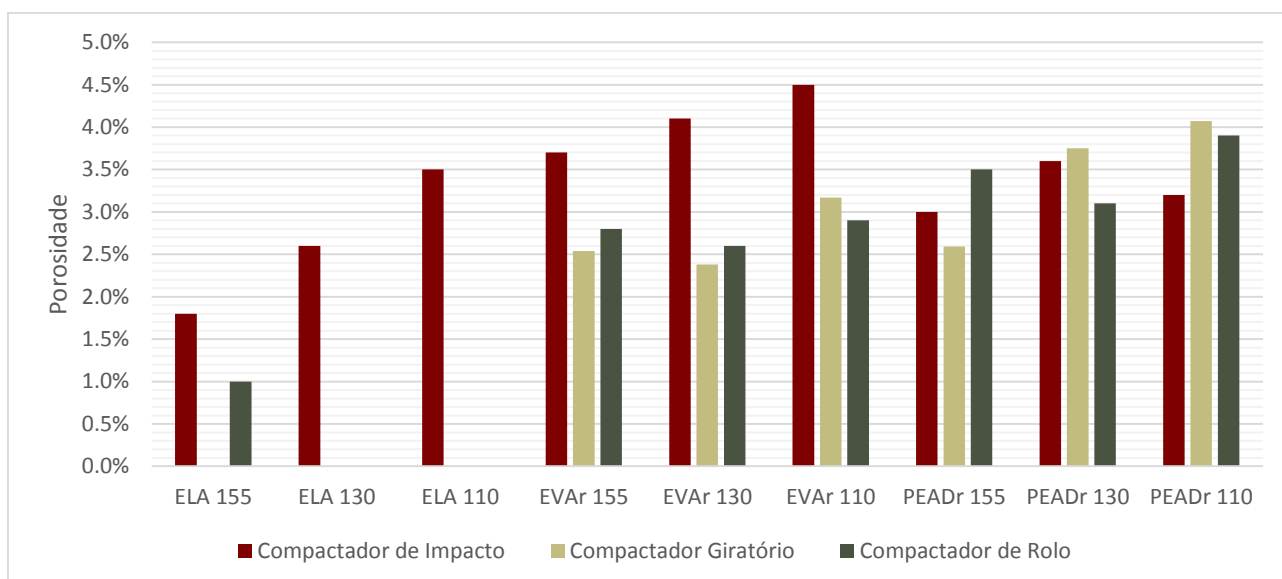


Figura 4.45 – Porosidade obtida nos provetes moldados nos diversos equipamentos

4.7.2 RESISTÊNCIA CONSERVADA A SECO

Dos provetes analisados à resistência conservada a seco, com o compactador de impacto (75 pancadas em cada face) e o compactador giratório (125 rotações), obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 4.46. Daqui pode-se retirar as seguintes conclusões:

- Os valores obtidos com o compactador giratório foram ligeiramente inferiores àqueles obtidos nos provetes moldados pelo compactador de impacto;
- Ambos apresentam bons valores de resistência à tração indireta;
- Todos os conjuntos de betume/temperatura situam-se na mesma gama, perto dos 2000 kPa, exceto o EVAr110 que apresenta uma resistência muito mais elevada que os restantes.

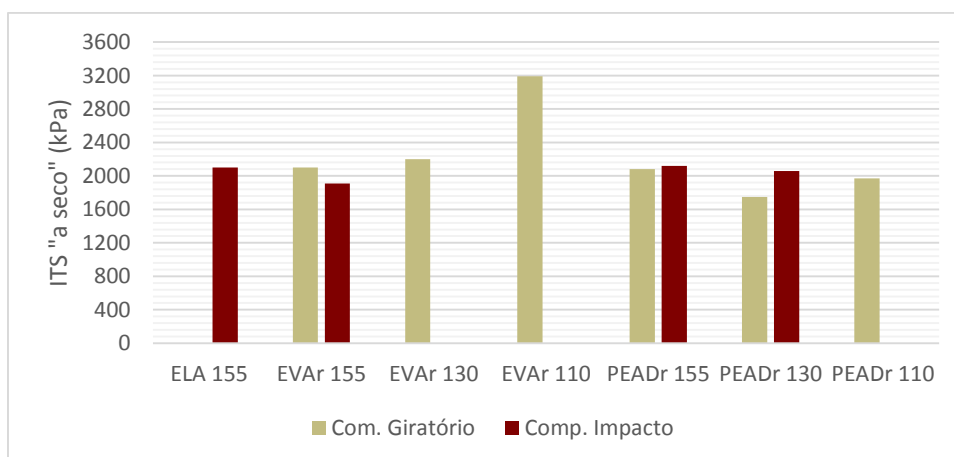


Figura 4.46 – Resistência conservada a seco

4.7.3 COMPACTADOR GIRATÓRIO

Compactaram-se dois provetes para cada percentagem de betume, utilizando o molde de diâmetro de 100 mm e 300 rotações. Utilizou-se apenas o betume Elaster e uma temperatura de compactação de 155°C. Utilizaram-se os seguintes parâmetros de compactação:

- $N_{ini} = 9$ rotações;
- $N_{des} = 125$ rotações;
- $N_{max} = 205$ rotações.

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.18.

Quadro 4.18 – Resultados do GC

	%pm @ Nini	%pm @ Ndes	%pm @ Nmax	VMA @ Ndes	VFB @ Ndes
4,0%	91,3%	96,2%	96,4%	14,0%	71,5%
4,7%	88,3%	96,8%	97,2%	15,7%	74,5%
5,5%	89,0%	96,5%	96,7%	17,4%	77,1%

Observando-se a Figura 4.47 pode-se tirar algumas conclusões:

- O provete com 4,7% apresenta um aumento na percentagem de baridade máxima teórica mais repentino que os restantes, pois no N_{ini} tinha o menor valor e no N_{des} já possuía o maior;
- Não existem grandes variações entre o N_{des} e o N_{max} , sendo por isso desnecessário compactar após as 125 rotações, exceto se o objetivo fosse verificar que o N_{max} cumpria o requisito de possuir uma percentagem de baridade máxima teórica inferior a 98%.

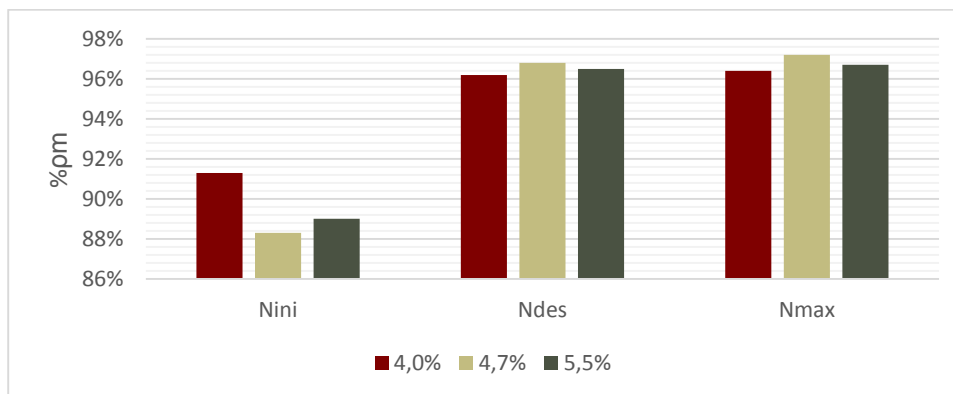


Figura 4.47 – Percentagem de baridade máxima teórica obtida para as diferentes percentagens de betume

Na Figura 4.48 estão representadas as percentagens de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com ligante dos provetes compactados. Daqui pode-se concluir:

- Ambas as percentagens aumentam ligeiramente com o aumento do betume na mistura;
- A percentagem de vazios na mistura de agregados cumpre o requisito mínimo que define esta propriedade tem de ser superior a 13%;
- A percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com ligante cumpre o requisito mínimo que define esta propriedade tem de ser superior a 65% e inferior a 75%, estando o provete de 5,5% fora destes limites.

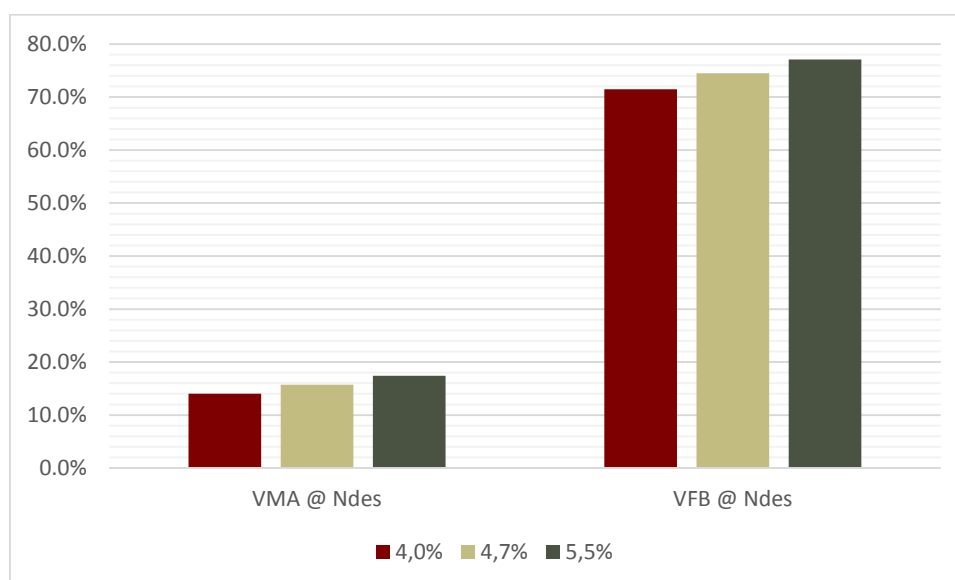


Figura 4.48 – Propriedades dos provetes para as diferentes percentagens de betume

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho pretendeu avaliar a compactabilidade em laboratório de misturas betuminosas com resíduos plásticos. Para o efeito utilizaram-se, para as misturas betuminosas, três tipos diferentes de ligante, um do tipo comercial e outros dois produzidos em laboratório que incluem uma percentagem de polímeros reciclados. Para o estudo da compactabilidade utilizou-se o compactador de impacto, através do método de Marshall, e também o compactador giratório. Por fim considerou-se útil utilizar o compactador de rolo para moldar lajes, o que permitiu avaliar o desempenho mecânico das misturas através do ensaio de pista.

Devido às temperaturas de fusão dos polímeros estarem situadas na gama de temperaturas de fabrico das misturas betuminosas, considerou-se também oportuno o estudo do seu comportamento sob diferentes temperaturas de compactação.

Os trabalhos desenvolvidos na parte experimental em laboratório compreenderam a análise de nove conjuntos com diferentes betumes e temperaturas de compactação, utilizando para tal três diferentes compactadores, com diferentes objetivos.

As misturas betuminosas fabricadas foram as seguintes:

- ELA – Mistura betuminosa composta por uma matriz de agregados de basalto e calcário e o ligante Elaster 13/60 (PMB 45/80-60);
- EVAr – Mistura betuminosa composta por uma matriz de agregados de basalto e calcário e o ligante 70/100 com 5% de EVA granulado reciclado;
- PEADr – Mistura betuminosa composta por uma matriz de agregados de basalto e calcário e o ligante 70/100 com 5% de PEAD granulado reciclado.

As temperaturas de compactação utilizadas foram as seguintes:

- 155°C – temperatura recomendada pelo fabricante para a compactação de misturas com o Elaster, é também uma temperatura acima da de fusão dos polímeros utilizados nos restantes betumes;
- 130°C – pertence à gama de temperaturas de fusão do PEAD;
- 110°C – pertence à gama de temperaturas de fusão do EVA.

Os equipamentos de compactação utilizados foram os seguintes:

- Compactador de impacto – é um equipamento para com o qual existe uma elevada experiência sendo, neste caso, uma referência para comparação com o fabrico de misturas com os novos betumes;
- Compactador giratório – é um equipamento que simula melhor a compactação em obra devido à possibilidade de atuar diretamente sobre as características volumétricas do provete, permitindo moldar provetes com as alturas e porosidades escolhidas;
- Compactador de rolo – é um equipamento permitir moldar lajes que melhor simulam a compactação que ocorre numa obra e possibilitou o estudo do comportamento da mistura à deformação permanente, utilizando para tal o ensaio de pista.

A análise comparativa das misturas betuminosas produzidas indica as seguintes tendências:

- Existência de alguma variabilidade nas características volumétricas (porosidade e estabilidade) dos provetes moldados por compactador de impacto;
- A baridade e a estabilidade dos provetes moldados com o compactador de impacto diminui com a temperatura de compactação, para todos os betumes modificados.
- Ao utilizar o compactador giratório é impreterível que a calibração esteja em dia pois a mínima alteração poderá fazer variar os resultados;
- Quando se utiliza o GC é necessário compactar um primeiro provete para testar a evolução da percentagem da baridade máxima teórica e verifica a quantidade de material necessária;
- Os valores obtidos para a resistência conservada foram muito semelhantes em cada conjunto de provetes ensaiados, existindo pouca variabilidade e obtendo valores bastante bons;
- As lajes ELA 155, PEADr 155 e PEADr 130 obtiveram um bom comportamento à resistência à deformação permanente. O EVAr registou um comportamento atípico numa das lajes compactadas para todas as temperaturas. Pressupõe-se que nestes moldes com comportamentos atípicos poderá ter caído algum material, que tenha sido empurrado para o lado, na zona de passagem da roda resultando num valor de deformação anómalo.

Resumidamente, no geral, as misturas com betume ELA e com uma temperatura de compactação de 155°C apresentam melhores resultados que os betumes modificados com resíduos plásticos aqui utilizados. E relativamente às misturas com betume EVAr e PEADr, conclui-se que apesar do PEADr resistir melhor à deformação permanente, o EVAr obtém melhores resultados nas restantes características, nomeadamente à temperatura de 155°C.

Pode então admitir-se, com base nos resultados obtidos, que as misturas compactadas com a temperatura de 155°C e o betume EVAr obtém melhores resultados que os restantes.

Considera-se que os resultados obtidos contribuem para a melhor caracterização de misturas betuminosas com betumes modificados com resíduos plásticos. No entanto, considera-se oportuno o desenvolvimento de mais alguns ensaios para melhor conhecer estes ligantes e a influência que as temperaturas de compactação poderão ter nos mesmos. De seguida apresentam-se algumas sugestões de desenvolvimentos futuros:

- Alargar a utilização do compactador giratório a todos os tipos de misturas abordados neste trabalho;
- Caracterizar o envelhecimento direto das misturas estudadas;
- Caracterizar a resistência à fadiga das misturas betuminosas com EVAr e PEADr, através do ensaio de flexão em quatro pontos, por exemplo;
- Generaliza o estudo efetuado a outras misturas betuminosas com betumes incorporando diferentes polímeros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, S.; Gupta, K. R. (2011) – “Plastics in buildings and construction”. Em Kutz, M. - “Applied plastics engineering handbook: Processing and materials”. Pensilvânia, Plastics Design Library.
- Al-Khateeb, G; Paugh, C.; Stuart, K.; Harman, T.; D’Angelo, J. (2002) – “Target and tolerance study for the angle of gyration used in the superpave gyratory compactor (SGC)”. Virginia , Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Anderson R. M.; McGennis, R. B. (1995) – “Superpave asphalt mixture design illustrated - Level 1 lab methods”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-SA-95-004.
- ASECAP (2014) – “Statistical bulletin”. Paris, Association Européenne des Concessionnaires d’Autoroutes et d’ouvrages à Péage.
- Asphalt Institute (1997) – “Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types”. Pensilvânia, Asphalt Institute.
- Attaelmanan, M.; Pei Feng, C.; Al, A. H. (2011) – “Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier”. Construction and Building Materials, Vol. 25(5), pp. 2764-2770.
- Awwad, M. T.; Shbeeb, L. (2007) – “The use of polyethylene in hot asphalt mixtures”. American Journal of Applied Sciences, Vol. 4(6), pp. 390-396.
- Azevedo, M. C. (2009) – “Directivas para a concepção de pavimentos: critérios de dimensionamento de pavimentos”. Lisboa, INIR.
- Batista, F. (2004) – “Novas técnicas de reabilitação de pavimentos: misturas betuminosas a frio”. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Univerisade do Porto, Portugal.
- Becker, Y.; Méndez, M. P.; Rodríguez, Y. (2001) – “Polymer modified asphalt”. Vision Tecnologica, Vol. 9(1), pp. 39-50.

- Belcher, S. L. (2011) – “Blow Molding”. Em Kutz, M. - “Applied plastics engineering handbook: Processing and materials”. Pensilvânia, Plastics Design Library, ISBN 978-1-4377-3514-7.
- Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L. P. (2006) - “Pavimentos rodoviários”. Coimbra, Edições Almedina, S.A.
- Burguete, L. (2013) – “Contribuição para o estudo do comportamento de misturas betuminosas incorporando nanomateriais”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Cantor, K. M.; Watts, P. (2011a) – “Plastic materials”. Em Kutz, M. - “Applied plastics engineering handbook: Processing and materials”. Pensilvânia, Plastics Design Library.
- Cantor, K. M.; Watts, P. (2011b) – “Plastics processing”. Em Kutz, M. - “Applied plastics engineering handbook: Processing and materials”. Pensilvânia, Plastics Design Library.
- CETO-EP (2014) – “Caderno de Encargos Tipo Obra: Vol. 14.03 – Pavimentação: Características dos materiais”. Estradas de Portugal, S.A., Setembro de 2014.
- Comissão Europeia (2013) – “Uma estratégia europeia para os resíduos de plástico no ambiente”. Livro Verde da Comissão Europeia.
- Costa, L.; Fernandes, S.; Silva, H.; Oliveira, J.; Pereira, P.; Fonseca, P. (2013a) – “Valorização de materiais reciclados na produção de betumes modificados para pavimentos”. XVII Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Guatemala, 17-22 de Novembro.
- Costa, L.; Fernandes, S.; Silva, H.; Oliveira, J. (2013b) – “Valorização de resíduos plásticos na modificação de betumes para pavimentos rodoviários”. 7º Congresso Rodoviário Português “Novos Desafios para a Atividade Rodoviária”, Lisboa, Portugal, 10-12 de Abril.
- Dantas, G. (2013) – “Estudo do emprego do compactador giratório superpave na compactação de um solo argiloso”. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Portugal.
- Dpto. Gestión de Calidad y Desarrollo (2005) – “Metodología SUPERPAVE para el diseño de mezclas asfálticas”, Bitumix CVV – Especialidades Asfálticas.
- Fawcett, A. H.; McNally, G. M.; Andrews, F; Clarke, J. (1999) – “Blends of bitumen with polyethylenes”. Polymer, Vol. 40(23), pp. 6337-6349.

- FHWA (2000) – “Superpave fundamentals reference manual”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, NHI Course #131053.
- FHWA (2001) – “Superpave mixture design guide”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration
- FHWA (2006) – “HMA technician training manual”. Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group, Federal Highway Administration.
- FHWA (2010a) – “Superpave mix design and gyratory compaction levels”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-HIF-11-031.
- FHWA (2010b) – “Superpave gyratory compactors”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-HIF-11-032.
- FHWA (2011) – “Hot mix asphalt for the undergraduate including the superpave mix design system, Block 3: HMA mix design”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Fuentes-Audén, C.; Sandoval, J. A.; Jerez, A.; Navarro, F. J.; Martínez-Boza, F. J.; Partal, P.; Gallegos, C. (2008) – “Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen”. *Polymer Testing*, Vol. 27(8), pp. 1005-1012.
- Gannasphalt (2014) – “Gann Asphalt & Concrete”. Consulta efetuada em Julho de 2014: <http://www.gannasphalt.com/>.
- García-Morales, M.; Partal, P.; Navarro, F. J.; Gallegos, C. (2006) – “Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen”. *Fuel*, Vol. 85(7-8), pp. 936-943.
- Gardete, D.; Santos, L. P.; Capitão, S. D.; Silva, H. (2008) – “The use of gyratory compactor in the design of portuguese bituminous mixtures”. 3rd European Pavement and Asset Management Conference, Coimbra, Portugal.
- Giavarini, C. (1994) – “Polymer-modified bitumen”. Em Yen, T. F.; Chilingarian, G. V. – “Developments in Petroleum Science, Vol. 40, Part A – Asphaltenes and Asphalts. 1”. Amesterdão, Elsevier Science B.V.
- Hayner, R. E. (2000) – “Sulfur in oil asphalt and polymer composition and process”. Marathon Ashland Petroleum LLC, US Patent Number 6133351.
- Holden, G. (2011) – “Thermoplastic elastomers”. Em Kutz, M. - “Applied plastics engineering handbook: Processing and materials”. Pensilvânia, Plastics Design Library.

- Honeywell (2005) – “Material safety data sheet: ethylene-vinyl acetate copolymers”. ACPA0002, Abril.
- InDOT (2013) – “Chapter 4: Mix Design”. Indiana Department of Transportation.
- Kalantar, Z. N.; Karim, M. R.; Mahrez, A. (2012) – “A review of using waste and virgin polymer in pavement”. *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 55-62.
- Lewandowski, L. H. (1994) – “Polymer modification of paving asphalt binders”. *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 67(3), pp. 447-480.
- MACOPAV (1995) – “Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional”. Almada, Junta Autónoma de Estradas.
- McDaniel, R. S.; Leahy, R. B.; Huber, G. A.; Moulthrop, J. S; Ferragut, T (2011) – “The superpave mix design system: anatomy of a research program”. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Project 9-42.
- Mendes, S. (2011) – “Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes”. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal.
- Merrington, A. (2011) – “Recycling of plastics”. Em Kutz, M. - “Applied plastics engineering handbook: Processing and materials”. Pensilvânia, Plastics Design Library.
- Micaelo, R. (2008) – “Compactação de misturas betuminosas - Ensaio de campo e modelação numérica”. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Miranda, H. (2008) – “Resistência à fadiga de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Morgan P.; Mulder A. (1995) – “The Shell bitumen industrial handbook”. Surrey, Shell Bitumen.
- Nugent, P. (2011) – “Rotational molding”. Em Kutz, M. - “Applied plastics engineering handbook: Processing and materials”. Pensilvânia, Plastics Design Library.
- Pellinen, T.; Xiao, J.; Shah, A. (2008) – “The effect of aging on mechanical properties of hot mix asphalt”. International Symposium on Asphalt Pavements and Environment, Zurique, Suíça.

- Pereira, F. (2009) – “Estudo da sensibilidade à água das misturas betuminosas”. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal.
- Pimentel, C. (2013) – “Formulação de misturas betuminosas a quente - Contribuição para um novo método de formulação”. Tese de Mestrado. Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologia, Portugal.
- Renken, P. (2002) – “Influence of specimen preparation onto the mechanical behaviour of asphalt-aggregate mixtures”. 2nd Euraspalt and Eurobitume Congress, Barcelona, Espanha.
- Ribeiro, A. S. (2002) – “Apontamentos da unidade curricular Construção de Vias de Comunicação Rodoviárias”. Mestrado em Vias de Comunicação e Transportes. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal.
- Santos, A. (2011) – “Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados”. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Shell (2003) – “Shell Bitumen handbook”. Londres, Thomas Telford Publishing.
- Tapkin, S.; Keskin, M. (2013) – “Rutting Analysis of 100 mm Diameter Polypropylene Modified Asphalt Specimens Using Gyratory and Marshall Compactors”. Materials Research, Vol. 16(2), pp.546-564.
- Test Quip, Inc. – “DAV II and hot mix simulator”. Consulta efetuada em Maio de 2014: <http://www.testquip.com/>.
- Troxler Electronic Laboratories, Inc. (2006a) – “Manual of operation and maintenance – GyroPave”. Carolina do Norte, Troxler Electronic Laboratories, Inc.
- Troxler Electronic Laboratories, Inc. (2006b) – “Manual of operation and maintenance - Model 4140 Gyratory Compactor”. Carolina do Norte, Troxler Electronic Laboratories, Inc.
- Troxler Electronic Laboratories, Inc. (2009) – “Application brief - model 4140/4141 gyratory compactor - specimen preparation in superpave mix design”. Carolina do Norte, Troxler Electronic Laboratories, Inc.
- Troxler Electronic Laboratories, Inc. (s.d.) – “DAV II Manual”. Carolina do Norte, Troxler Electronic Laboratories, Inc.

Vol, J.; Kraus, J.; McLaughlin, S.; Willoughby, K.; McLean, I. (2007) – “Superpave gyratory compactor internal angle of gyration study”. Washington State Department of Transportation.

Vonk, W. C.; Bull, A. L. (1989) – “Phase phenomena and concentration effect in blends of bitumen and cariflex TR.”. VII Intl Roofing Congress, Münche, Alemanha, 30 de Maio-01 de Junho.

WSDOT (2012) – “Method for determining volumetric properties of HMA”. Washington State Department of Transportation, WSDOT SOP 731.

WSDOT (2014) – “WSDOT Pavement Guide”. Consulta efetuada em Maio de 2014: <http://classes.engr.oregonstate.edu/cce/spring2014/ce492/>.

Zielinski, J.; Bukowski, A.; Osowiecka, B. (1995) – “An effect of polymers on thermal stability of bitumens”. Journal of Thermal Analysis, Vol. 43(1), pp. 271-277.

DOCUMENTOS NORMATIVOS

Normas Europeias

EN 933-1:2012	Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method
EN 933-3:2012	Tests for geometrical properties of aggregates. Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index
EN 933-8:2012	Tests for geometrical properties of aggregates. Part 8: Assessment of fines - Sand equivalent test
EN 933-9:2009 + A1:2013	Tests for geometrical properties of aggregates. Part 9: Assessment of fines - Methylene blue test
EN 1097-6:2013	Test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption
EN 12697-5:2009 / AC 2012	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 5: Determination of the maximum density
EN 12697-6:2012	Test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption
EN 12697-8:2003	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens
EN 12697-10:2001	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 10: Compactibility
EN 12697-12:2008	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens

EN 12697-22:2003 + A1:2007	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel Tracking
EN 12697-23:2003	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens
EN 12697-29:2009	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen
EN 12697-30:2012	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 30: Specimen preparation by impact compactor
EN 12697-31:2007	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor
EN 12697-34:2012	Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test
EN 13302:2010	Bitumen and bituminous binders. Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus
EN 13399:2010	Bitumen and bituminous binders. Determination of storage stability of modified bitumen
EN 13880-3:2003	Hot applied joint sealants. Part 3: Test method for the determination of penetration and recovery (resilience)

Normas Portuguesas

NP EN 1097-2:2011	Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação
NP EN 1097-3:2002	Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios
NP EN 1426:2010	Betumes e ligantes betuminosos. Determinação da penetração com agulha
NP EN 1427:2010	Betumes e ligantes betuminosos. Determinação da temperatura de amolecimento: Método do Anel e Bola
NP EN 13108-1:2011	Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso
NP EN 13108-20:2008	Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 20: Ensaio de tipo
NP EN 13043:2004 / AC:2010	Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Normas Americanas

ASTM D6925-09 Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Gyratory Compactor

Especificações Técnicas

E80 (1997) Betumes e ligantes betuminosos. Betumes de pavimentação. Classificação, propriedades e exigências de conformidade

E284 (1973) Terminologia rodoviária. Pavimento

ANEXO

A.1 FICHA TÉCNICA DO ELASTER 13/60 (PMB 45/80-60)



CEPSA Portuguesa Petróleos, SA

ELASTER 13/60 (PMB 45/80-60)

DEFINIÇÃO:

Betume asfáltico modificado com polímeros, obtido por reação química entre o ligante base e polímeros de tipo elastomérico, que cumpre as especificações da EN 14023.

ESPECIFICAÇÕES:

CARACTERÍSTICAS		UNIDADE	NORMA	MIN.	MAX.
Penetração, 25°C		0,1 mm	EN 1426	45	80
Temperatura de amolecimento		°C	EN 1427	60	-
Coesão Força-Ductilidade, a 5°C (Tração a 50 mm/min)		J/cm ²	EN 13589 EN 13703	2	-
Ponto de fragilidade Fraass		°C	EN 12593	-	-12
Recuperação elástica a 25°C		%	EN 13398	70	-
Estabilidade ao armazenamento:	Diferença penetração (25°C)	0,1 mm	EN 13399 EN 1427	-	9
	Diferença temperatura de amolecimento	°C	EN 13399 EN 1426	-	5
Temperatura de inflamação		°C	ISO 2592	235	-
Durabilidade – Resistência ao envelhecimento EN 12607-1					
Variação de massa		%	EN 12607-1	-	1
Penetração retida		%	1426	60	-
Δ Temperatura de amolecimento		°C	1427	-	10
Diminuição da Temperatura de amolecimento		°C	1427	-	5

APLICAÇÕES:

- Misturas drenantes
- Misturas descontinuas
- Misturas betuminosas convencionais

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABALHO:

- Temperatura da mistura (°C): 155-165
- Temperatura do ligante (°C): 155-165
- Temperatura de compactação (°C): 150-160