



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Pedro Miguel Loureiro Almeida Martins

**AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE
MISTURAS BETUMINOSAS INCORPORADAS COM
RESÍDUOS PLÁSTICOS ATRAVÉS DE ENSAIOS
FUNDAMENTAIS**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, orientada
pela Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida e apresentada ao
Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra.

Dezembro de 2019

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Pedro Miguel Loureiro Almeida Martins

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS BETUMINOSAS INCORPORADAS COM RESÍDUOS PLÁSTICOS ATRAVÉS DE ENSAIOS FUNDAMENTAIS

**PERMANENT DEFORMATION EVALUATION OF BITUMINOUS MIXTURES
INCORPORATED WITH PLASTIC WASTE USING FUNDAMENTAL BASED
LABORATORIAL TESTS**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,
orientada pelo Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Dezembro de 2019



**UNIVERSIDADE D
COIMBRA**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar devo agradecer à Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida por todo o apoio prestado durante o desenvolvimento desta dissertação. Pela constante disponibilidade, acompanhamento, orientação e transmissão de sugestões que permitiram a realização do presente documento.

Agradeço ao Celestino Marques, César Abreu e Luís Araújo, não só pela ajuda prestada durante a realização de procedimentos laboratoriais, como também pelo espírito de camaradagem, boa disposição e amizade demonstrada para comigo durante esta passagem pelo Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil.

Devo deixar também uma palavra de gratidão ao Carlos Renato, do Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela ajuda na realização de diversos ensaios experimentais e pela sua disponibilidade.

Um agradecimento especial ao meu pai, minha mãe, minha irmã e minha avó pelos exemplos prestados como seres humanos, pelo incessante apoio e amor incondicional em todas as etapas da minha vida, pelos sacrifícios feitos para que fosse possível chegar a esta fase da minha educação e por me ensinarem a nunca dar menos do que o máximo perante todos os obstáculos.

A todos os meus colegas de curso, que comigo partilharam diversas experiências e me marcaram direta ou indiretamente, com destaque para três que se tornaram amigos para a vida: André Rosa, Diogo Cabral e Manuel dos Santos. Um obrigado por todo o apoio e sentimento de verdadeira amizade partilhada.

Aos meus amigos, não só por todos os momentos de descompressão que partilharam comigo, mas também pela preocupação, paciência e apoio demonstrado, um obrigado.

RESUMO

Os pavimentos rodoviários são sujeitos a solicitações externas, que, durante o decorrer da sua vida útil, contribuem gradualmente para a redução da sua qualidade. Entre elas, destacam-se o tráfego e as temperaturas elevadas, que atuam como fator importante no aparecimento e evolução de patologias tais como deformações permanentes e fendilhamento. Com a crescente exigência em relação ao desempenho e durabilidade das infraestruturas de transporte, aliada à necessidade de utilizar materiais mais sustentáveis e económicos, desenvolveram-se estudos de integração de materiais de origem reciclada nas misturas betuminosas, nomeadamente de composição plástica.

A presente dissertação analisa o desempenho de misturas betuminosas a quente com a inclusão de resíduos de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). Os fragmentos de PEBD são inseridos diretamente durante o processo da mistura, via seca. Posteriormente é estudado o desempenho à deformação permanente de amostras produzidas por diferentes métodos de compactação – compactação de rolos e compactação giratória – através de um ensaio fundamental, ensaio de compressão uniaxial cíclico, que oferece uma mais detalhada caracterização das misturas em estudo.

Os diferentes métodos de compactação resultam em amostras com comportamentos distintos à deformação permanente, apesar das propriedades volumétricas serem semelhantes. Independentemente do modo de compactação analisado, a inserção de resíduos plásticos reciclados resultou num acréscimo da resistência à deformação permanente da mistura, comparativamente à mistura não aditivada.

Palavras-chave: mistura betuminosa a quente, polietileno de baixa densidade, deformação permanente, ensaio de compressão uniaxial cíclico, compactação giratória.

ABSTRACT

Road pavements are subjected to external actions, which, during its lifetime, contribute gradually to the degradation of its main qualities. Traffic and high temperatures stand out as the main factors in the emergence and development of pavement distresses such as permanent deformation and surface cracking. With the increasing demand regarding the performance and durability conditions of asphalt pavements, paired with a necessity to employ sustainable and economical materials, researches were developed in order to study the addition of recycled substances, namely plastic waste, to bituminous mixtures.

The current dissertation analyses the performance of hot mix asphalt with the inclusion of Low-Density Polyethylene (LDPE). The LDPE fragments are inserted directly into the mixture, a process designated by dry method. Afterwards, mixtures are subjected to different compaction methods – roller compaction and gyratory compaction – and their resistance to permanent deformation evaluated through a fundamental based laboratory test, uniaxial cyclic compression test, which allows for a highly detailed characterization of the material.

The various compaction methods result in samples that show distinctive resistance to permanent deformation, although volumetric properties are nearly identical. Regardless of the compaction method used, the incorporation of plastic waste (PEBD) allowed for an increase in the performance regarding permanent deformation, in relation to the non-modified asphalt mixture.

Key words: hot mix asphalt, Low-Density Polyethylene, permanent deformation, uniaxial cyclic compression test, gyratory compaction.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2. ESTADO DA ARTE	4
2.1 Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	4
2.2 Misturas Betuminosas a Quente	5
2.3 Compactação de Misturas Betuminosas	7
2.3.1 Generalidades	7
2.3.2 Compactabilidade de misturas betuminosas.....	9
2.3.3 Compactação em obra e em laboratório	11
2.4 Deformação Permanente em Misturas Betuminosas	14
2.4.1 Deformação permanente e formação de rodeiras	14
2.4.2 Métodos de caracterização da deformação permanente	17
2.4.3 Fatores que influenciam a deformação permanente	19
2.5 Misturas Betuminosas Modificadas Com Polímeros.....	24
3. TRABALHO EXPERIMENTAL	29
3.1 Caracterização de Materiais.....	30
3.1.1 Agregados.....	30
3.1.2 Betume.....	31
3.1.3 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD).....	32
3.2 Fabrico dos Provetes	33
3.2.1 Produção das misturas betuminosas	33
3.2.2 Compactação de rolos.....	33
3.2.3 Compactação giratória.....	34
3.3 Propriedades dos Provetes	36
3.3.1 Dimensões dos provetes	37
3.3.2 Baridade geométrica e baridade SSD	37
3.3.3 Baridade teórica máxima e porosidade.....	40
3.3.4 Curvas de compactação do compactador giratório.....	42
3.4 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico.....	45
3.4.1 Descrição do procedimento de ensaio	45
3.4.2 Análise de resultados obtidos	49
4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	60
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO A	69
ANEXO B	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perfil tipo de pavimento rodoviário flexível (InIR, 2019).....	4
Figura 2.2 - Composição mássica e volumétrica de misturas betuminosas (Branco <i>et al.</i> , 2016)	8
Figura 2.3 - Extensão vertical de compressão e extensão radial de tração num pavimento rodoviário flexível (NCHRP, 2002)	14
Figura 2.4 - Diferentes processos de formação de rodeiras (Freire, 2002)	15
Figura 2.5 - Componentes da deformação permanente: a) Densificação; b) Tensões de corte	16
Figura 2.6 - Evolução genérica da deformação permanente de um provete sujeito ao ensaio de compressão uniaxial cíclico (Onofre <i>et al.</i> , 2011).....	17
Figura 2.7 - Profundidade de rodeira de mistura betuminosa com 0% PEBD e 6% PEBD (Fonseca <i>et al.</i> , 2018)	27
Figura 3.1 - Gráfico esquemático do trabalho desenvolvido na presente dissertação.....	29
Figura 3.2 - Fuso granulométrico da mistura AC 14 surf.....	31
Figura 3.3 - Resíduos de PEBD reciclado utilizados na mistura.....	33
Figura 3.4 - Produção de laje por compactação de rolos: a) Processo de compactação de rolos; b) Processo de extração por caroteamento	34
Figura 3.5 - Movimento giratório do compactador SGC (CEN, 2004).....	35
Figura 3.6 - a) Molde do compactador giratório; b) Espaçadores utilizados no processo	36
Figura 3.7 - Variação média da baridade SSD dos conjuntos de provetes retificados	38
Figura 3.8 - Comparação da baridade SSD média do conjunto de provetes produzidos	39
Figura 3.9 - Variação média da porosidade dos conjuntos de provetes retificados.....	41
Figura 3.10 - Comparação da porosidade média do conjunto de provetes produzidos.....	42
Figura 3.11 – Variação da porosidade em função do número de giros do SGC (R2 e P2).....	44
Figura 3.12 – Valores médios de K e $v(1)$ para os provetes produzidos no SGC	44
Figura 3.13 - Proвете sujeito ao ensaio de compressão uniaxial cíclico	46
Figura 3.14 - Representação da evolução do gráfico obtido no ensaio de compressão uniaxial cíclico (Gardete, 2006)	47
Figura 3.15 - Curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R1 e P1	49
Figura 3.16 - Curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R2 e P2	51
Figura 3.17 - Curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R3 e P3	52
Figura 3.18 - Curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R4 e P4	53
Figura 3.19 - Gráfico comparativo das deformações permanentes acumuladas médias dos vários conjuntos de provetes estudados.....	54
Figura 3.20 - Gráfico comparativo das velocidades de deformação médias dos vários conjuntos de provetes estudados	56
Figura 3.21 - Gráfico comparativo dos valores médios do módulo de fluência e módulo de resiliência dos vários conjuntos de provetes estudados.....	57
Figura 3.22 - Gráfico de dispersão que relaciona ϵ_{3600} com a porosidade dos provetes	58
Figura 3.23 - Gráfico de dispersão que relaciona ϵ_{3600} com a porosidade dos provetes ensaiados compactados pelo compactador giratório	59
Figura A.1 - Variação da porosidade em função do número de giros do SGC (R3 e P3).....	72
Figura A.2 - Variação da porosidade em função do número de giros do SGC (R4 e P4).....	72

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Propriedades de misturas betuminosas (Fonseca, 2011).....	6
Quadro 2.2 - Propriedades de misturas betuminosas (Fonseca, 2011).....	7
Quadro 2.3 - Legenda das grandezas da Figura 2.2 (Branco <i>et al.</i> , 2016)	8
Quadro 2.4 - Parâmetros de análise de misturas betuminosas via método húmido e seco (Mishra, 2016).....	26
Quadro 3.1 - Fuso granulométrico da mistura e limites impostos pelo Caderno de Encargos (EP, 2014).....	30
Quadro 3.2 - Resultados do ensaio de penetração a 25°C (Bandeira, 2019)	32
Quadro 3.3 - Resultados do ensaio de temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola (Bandeira, 2019)	32
Quadro 3.4 -Especificações para betumes de pavimentação com penetrações entre 20x0,1 mm e 330x0,1 mm (Adaptado de CEN (2009)).....	32
Quadro 3.5 - Parâmetros do compactador giratório SGC.....	35
Quadro 3.6 - Valores da baridade máxima teórica, ρ_m , para as misturas em estudo	41
Quadro 3.7 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico para os provetes do conjunto R1 e P1	50
Quadro 3.8 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico para os provetes do conjunto R2 e P2	51
Quadro 3.9 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico para os provetes do conjunto R3 e P3	52
Quadro 3.10 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico para os provetes do conjunto R4 e P4	53
Quadro A.1 – Variação de baridade SSD e porosidade de provetes retificados	69
Quadro A.2 - Dimensões e propriedades volumétricas de provetes produzidos.....	70
Quadro A.3 - Dimensões e propriedades volumétricas de provetes produzidos (continuação).....	71
Quadro A.4 - Valores de regressão linear no estudo de compactação dos provetes produzidos no SGC	71
Quadro B.1 - Resumo da ANOVA a 1 fator (Baridade SSD para a mistura de referência).....	73
Quadro B.2 - Comparação dos conjuntos de amostras (Baridade SSD para a mistura de referência).....	73
Quadro B.3 - Resumo da ANOVA a 1 fator (Baridade SSD para a mistura aditivada).....	73
Quadro B.4 - Comparação dos conjuntos de amostras (Baridade SSD para a mistura aditivada)	73
Quadro B.5 - Resumo da ANOVA a 1 fator (Deformação permanente para a mistura de referência).....	74
Quadro B.6 - Comparação dos conjuntos de amostras (Deformação permanente para a mistura de referência)	74
Quadro B.7 - Resumo da ANOVA a 1 fator (Deformação permanente para a mistura aditivada)	74
Quadro B.8 - Comparação dos conjuntos de amostras (Deformação permanente para a mistura aditivada)	74

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

$\%G_{mm,ng}$ – Compactação relativa, em percentagem de baridade teórica máxima, no giro ng

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AC 14 surf 35/50 – Betão betuminoso, a aplicar na camada de desgaste, produzido com um betume da classe de penetração 35/50 e com um agregado de diâmetro máximo de 14 mm

ANOVA – Análise de variância

BB – Betão Betuminoso

CEN – Comissão Europeia de Normalização

CG – Compressão giratória

cm^3 – Centímetro cúbico

CR – Compressão de rolos

CV – Compressão vibratória

d – Diâmetro

EUA – Estados Unidos da América

EAPA – European Asphalt Pavement Association

EN – European Normative

E_n – Módulo de fluência do provete no ciclo de aplicação de carga n

EP – Estradas de Portugal

$E_{r,n}$ – Módulo de resiliência do provete no ciclo de aplicação de carga n

f_c – Velocidade de deformação

FN – Flow Number

h – Altura

Hz – Hertz

InIR – Instituto de Infraestruturas Rodoviárias

IPQ – Instituto Português de Qualidade

K – Inclinação da curva de evolução da porosidade

kg – Quilograma

km – Quilómetro

km/h – Quilómetro por hora

kN – Quilonewton

kPa – Quilopascal

K_s – Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuído ao dimensionamento do pavimento

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

m – Massa

m^3 – Metro cúbico

mm – Milímetro

mm² – Milímetro quadrado

MPa – Megapascal

n – Número de ciclos de aplicação de carga no ensaio de compressão uniaxial cíclico

N_{80} – Número de eixos padrão de 80 kN

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program

ng – Número de giros do compactador giratório

° - Graus, medida de ângulo

°C – Graus Celsius

P – Proвете composto pela mistura aditivada com PEBD

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

R – Proвете composto pela mistura de referência

rpm – Rotações por minuto

s – Segundos

SGC – SUPERPAVE Gyrotory Compactor

SHRP – Strategic Highway Research Program

SSD – Saturated Surface Dry

SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavements

$v(ng)$ – Porosidade após ng giros

V_m – Porosidade

ϵ_n – Deformação axial permanente acumulada do provete após n ciclos de aplicação da carga

ϵ_v – Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação

$\rho_{b,dim}$ – Baridade geométrica do provete

$\rho_{b,SSD}$ – Baridade SSD do provete

ρ_m – Baridade máxima teórica da mistura

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A rede rodoviária corrente em Portugal tem uma extensão de cerca de 17874 km (IP, 2019). Esta infraestrutura tem uma grande importância visto promover o crescimento económico das regiões, a coesão social territorial e assegurar a mobilidade de pessoas e bens em todo o país. A maioria dos pavimentos existentes são do tipo flexível, compostos por diversas camadas constituídas por misturas betuminosas.

Logo após a sua construção, os pavimentos rodoviários são sujeitos a ações por agentes diversos que, ininterruptamente, contribuem para a redução gradual da sua qualidade. Um desses agentes inclui o tráfego, que, com o aumento do seu volume, principalmente de veículos pesados, verificado nos últimos anos, atua como um fator importante na aparição e evolução de patologias à superfície do pavimento.

As degradações de pavimento mais relevantes incluem a manifestação de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas. Ambas estas patologias são consideradas nos critérios de dimensionamento dos pavimentos flexíveis. O fendilhamento por fadiga é uma das principais causas de deterioração de camadas betuminosas. Por outro lado, a deformação permanente manifesta-se geralmente através de assentamentos na área de passagem dos pneus dos veículos, denominados “rodeiras”. Ambas estas patologias diminuem o nível de segurança e comodidade dos condutores. Torna-se, portanto, fundamental, manter durante a vida útil de um pavimento, as características funcionais e estruturais de modo a assegurar boas condições aos utentes do mesmo e impedir a degradação das infraestruturas de vias de comunicação.

Devido ao aumento da exigência em relação ao desempenho e durabilidade dos pavimentos rodoviários, foram desenvolvidos certos processos de modificação de misturas betuminosas, que datam desde o final do século XIX. Estudos que descrevem a modificação do ligante através da inserção de materiais como borracha e polímeros virgens ou naturais na mistura, permitiram alterar propriedades mecânicas do material, melhorando a sua estabilidade, e, conseqüentemente, a sua durabilidade.

No entanto, e apesar dos polímeros plásticos apresentarem excelentes propriedades como a resistência térmica, flexibilidade, baixa densidade e baixo custo de produção, compõem uma das principais fontes de poluição a nível mundial. As qualidades referidas explicam a sua crescente produção ao longo das últimas dezenas de anos. No entanto, durante a sua produção e, principalmente, no processo de eliminação, provocam impactos prejudiciais ao ambiente. A decomposição de resíduos plásticos pode levar centenas de anos e estima-se que menos de 30% de resíduos plásticos recolhidos na Europa seguem o processo de reciclagem (Comissão Europeia, 2018).

Deste modo, e como forma de garantir uma melhor rentabilização do ciclo de vida do plástico, têm-se vindo a desenvolver estudos sobre a inserção de resíduos plásticos reciclados em misturas betuminosas, seja por via seca ou via húmida (Ahmad e Jaya, 2016; Bandeira, 2019; Costa *et al.*, 2017; Fonseca, 2018; Kalantar *et al.*, 2012; Sarang *et al.*, 2016). As alterações promovidas pelos resíduos reciclados nas propriedades da mistura betuminosa (maior estabilidade e durabilidade) são semelhantes às promovidas pelos polímeros virgens, e, portanto, identificam-se como uma solução mais económica e sustentável.

A caracterização da resposta de misturas betuminosas à deformação permanente pode ser efetuada através de diversos métodos laboratoriais que incluem os ensaios empíricos, fundamentais e de simulação. Os ensaios fundamentais (EN 13108-1, IPQ, 2008a) consideram-se basilares na tendência futura de formulação de misturas betuminosas. Estes permitem não só classificar as misturas betuminosas relativamente à sua resistência à deformação permanente como também obter diversos parâmetros característicos da amostra em estudo.

A resposta de uma mistura betuminosa à deformação permanente é influenciada por diversos fatores. Entre eles, a compactação revela-se como um dos mais importantes, especialmente para estudos efetuados em laboratório. A compactação efetuada em laboratório procura aproximar-se da realizada em obra. Deste modo, procura-se que os métodos de compactação laboratoriais sejam processos de simples execução, com fácil controlo dos parâmetros de compactação e que aproximem as propriedades volumétricas e mecânicas das misturas betuminosas às encontradas em obra. No entanto, verifica-se ainda a inexistência de um consenso acerca de qual método de compactação reúne as condições mencionadas, visto que os diversos processos de compactação promovem um rearranjo distinto das partículas sólidas que compõem a mistura betuminosa, resultando em respostas diferentes quando solicitadas a ações externas.

1.2 Objetivos

O presente trabalho decorre no seguimento de dois estudos efetuados anteriormente: Fonseca (2018) e Bandeira (2019). Fonseca (2018) estudou a incorporação de diferentes taxas de resíduos reciclados de PEBD (Polietileno de Baixa Densidade) numa mistura betuminosa geralmente aplicada em camadas de desgaste. Concluiu que o valor ótimo a incorporar numa mistura do tipo era de 6% em relação à massa de betume. Bandeira (2019) avaliou a mesma mistura (com 0% de PEBD e 6% de PEBD). Para tal caracterizou a resistência à deformação permanente (via ensaios de simulação) e a resistência à fadiga. Os resultados permitiram obter conclusões satisfatórias acerca da inserção dos resíduos reciclados de plástico de PEBD na mistura em estudo.

Verificada a viabilidade da inserção de PEBD na mistura betuminosa, pretende-se com a presente dissertação analisar a resistência à deformação permanente das misturas analisadas pelas duas autoras com recurso a ensaios fundamentais, caso do ensaio de compressão uniaxial cíclico. Para tal, proceder-se-á à produção de amostras através de métodos de compactação distintos: compactação de rolos e compactação giratória. Deste modo, será possível observar o comportamento das misturas quando submetidas a processos de compactação variados.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos e dois anexos. A descrição do conteúdo apresentado em cada um dos capítulos é descrito na presente secção.

No presente capítulo, Capítulo 1, é exposto o enquadramento do tema desenvolvido, definidas as metodologias e objetivos do trabalho de investigação e a sua estruturação.

No capítulo seguinte, Capítulo 2, são esclarecidos os conceitos teóricos mais importantes para a compreensão do desenvolvimento do trabalho experimental realizado. Para tal, são expostas diversas investigações de carácter científico desenvolvidas por vários autores. O capítulo

divide-se por secções, abordando inicialmente os pavimentos rodoviários flexíveis e as misturas betuminosas a quente (secção 2.1 e secção 2.2). Em seguida, são esclarecidos diversos conceitos acerca da compactação das misturas betuminosas (secção 2.3). Posteriormente desenvolve-se o estudo da deformação permanente e formação de patologias desse tipo (secção 2.4). Por fim, é feita uma análise acerca da modificação das propriedades das misturas betuminosas por adição de certos materiais, com maior ênfase nos materiais poliméricos virgens e reciclados (secção 2.5).

No Capítulo 3 é descrito o desenvolvimento do trabalho experimental efetuado. Inicialmente, são detalhadas diversas propriedades referentes aos materiais utilizados (secção 3.1). Em seguida, procede-se à explicação da metodologia desenvolvida para a produção de provetes bem como a exposição das suas propriedades (secção 3.2 e secção 3.3). Por fim, na secção 3.4, é detalhado o processo do ensaio de caracterização à deformação permanente utilizado e são apresentados e comentados os resultados obtidos.

O capítulo 4 reserva-se para a exposição de conclusões retiradas após a análise dos resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho experimental, fazendo uma comparação com a revisão bibliográfica efetuada anteriormente. Este capítulo destina-se também a sugestões de investigações futuras referentes ao tema desenvolvido.

No capítulo 5 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no decurso do desenvolvimento do documento.

Por fim, no Anexo A e no Anexo B são expostas diversas ilustrações de gráficos e quadros que se consideraram relativamente menos importantes para colocar no corpo do texto.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Pavimentos Rodoviários Flexíveis

A principal função de um pavimento rodoviário é garantir uma superfície livre dotada de determinadas qualidades funcionais – elevado grau de segurança, comodidade e economia na circulação de veículos – e qualidades estruturais, que se relacionam com a capacidade de suporte resultante da aplicação de uma diversidade de cargas de tráfego e condições climáticas adversas sem que sofram alterações significativas, que possam comprometer a sua aptidão funcional. Em relação à sua constituição, um pavimento rodoviário considera-se como um sistema estratificado, composto por diversas camadas de espessura finita que se apoiam diretamente na sua fundação (Branco *et al.*, 2016).

Da associação de estratos constituídos por diversos materiais resultam diferentes tipos de pavimentos, cujos comportamentos variam consoante a sua solicitação sob determinadas ações de tráfego e diferentes condições climáticas. De acordo com o tipo de material e suscetibilidade à deformação, podem distinguir-se, por ordem decrescente de deformabilidade, os pavimentos, como: flexíveis, semi-rígidos e rígidos (InIR, 2019).

Um pavimento flexível é constituído por camadas superiores compostas por misturas betuminosas ou misturas com ligantes hidráulicos, sendo as camadas subjacentes a estas, e sobrejacentes ao leito do pavimento, constituídas por materiais granulares. Os pavimentos semi-rígidos apresentam idêntica constituição nas suas camadas superiores, diferenciando-se pelo facto de nas suas camadas granulares serem adicionados ligantes hidráulicos. Por último, os pavimentos rígidos utilizam misturas hidráulicas integrantes na composição dos estratos superiores (Branco *et al.*, 2016; InIR, 2019). Na Figura 2.1, é ilustrado um exemplo de um perfil de pavimento rodoviário flexível e dos estratos que o compõem.

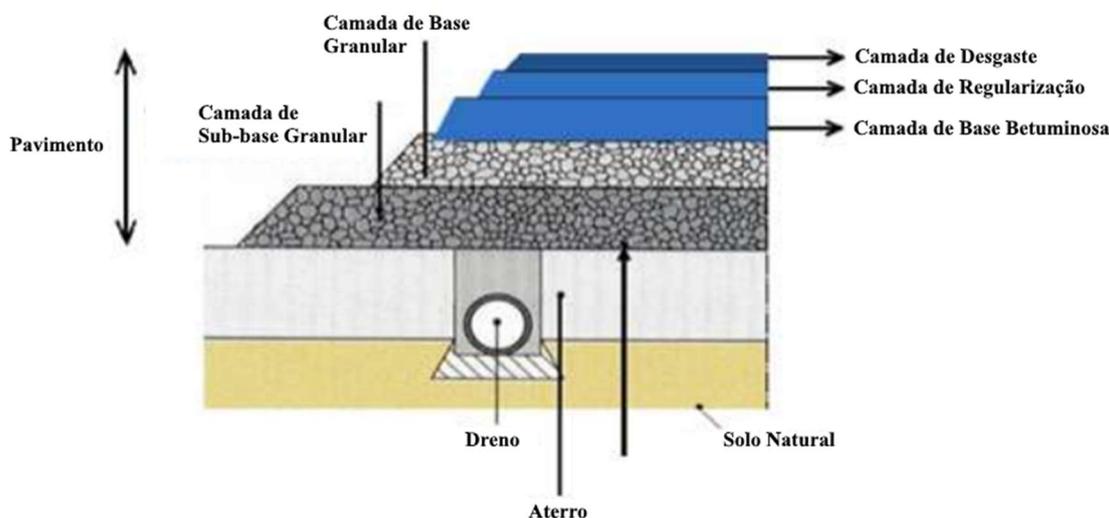


Figura 2.1 - Perfil tipo de pavimento rodoviário flexível (InIR, 2019)

A fundação é constituída pelo leito do pavimento e pelo terreno natural. A fundação suporta o pavimento e as suas características mecânicas inatas determinam e condicionam o dimensionamento do mesmo. O leito do pavimento garante a transição do terreno natural ou parte superior do aterro para as camadas superiores. Este evita a deformação do solo de fundação e homogeneiza as suas características, protege da ação do gelo, serve como uma

plataforma durante a fase construtiva, e, em certas circunstâncias, melhora as condições de compactação das camadas subjacentes (Santos, 2016; InIR, 2019).

As camadas de base e de sub-base são geralmente constituídas por materiais granulares. Estas permitem dotar o pavimento da resistência mecânica necessária para suportar as cargas verticais induzidas pelo tráfego, redistribuindo as tensões sobre a plataforma (fundação), de modo a manter as deformações dentro de limites toleráveis. O estrato de sub-base, capacita, suplementarmente, a drenagem interna do pavimento, a resistência face à erosão, a proteção à subida de água por capilaridade e o resguardo das camadas inferiores durante a fase de construção (Santos, 2016; InIR, 2019).

As camadas betuminosas são compostas pela camada de desgaste, de regularização, de ligação e de base betuminosa, podendo, contudo, em algumas situações ocorrerem apenas duas destas camadas num pavimento. A camada de desgaste é a camada final da estrutura do pavimento, também denominada de superfície de rolamento. Sobre ela, são exercidas diretamente as ações combinadas do tráfego e do clima. Deste modo, este estrato tem como função assegurar uma cómoda e segura circulação dos veículos, distribuir as tensões provocadas pelos mesmos, bem como comportar-se de um modo impermeabilizante ou drenante. A camada de ligação tem como função efetuar a transição entre as camadas adjacentes. A camada de regularização permite regularizar a área superior da camada de base, assegurando uma superfície livre e desempenada para a aplicação das camadas superiores e confere ao pavimento maior capacidade estrutural. Por último, as camadas de base betuminosa são, em alguns casos, aplicadas de modo a permitirem um maior suporte estrutural (Branco *et al.*, 2016; Santos, 2016; INIR, 2019).

Os comportamentos dos pavimentos rodoviários são determinados pelas ações contínuas do tráfego e agentes climáticos, pela sua composição e pelas características da fundação. Devido a este facto, o dimensionamento e constituição do pavimento rodoviário reveste-se de uma importância fulcral na garantia e manutenção das suas características funcionais e estruturais perante os carregamentos previstos no período de duração da sua vida útil (Branco *et al.*, 2016).

2.2 Misturas Betuminosas a Quente

Na execução dos pavimentos rodoviários, aplicam-se fundamentalmente misturas betuminosas ou misturas com ligantes hidráulicos. As misturas do primeiro tipo são as mais utilizadas em Portugal, bem como a uma escala global. São compostas por um conjunto de agregados granulares doseados, que constituem cerca de 95% da mistura em massa, combinados com uma quantidade de ligante previamente determinada, de modo a que todas as partículas de agregado sejam revestidas pelo ligante. O betume é o ligante mais utilizado na confeção destas misturas, produzidas numa central própria para o efeito. Depois de transportadas, espalhadas e compactadas passam a constituir uma camada de pavimento (Branco *et al.*, 2016).

O processo de produção das misturas betuminosas ocorre, em grande parte dos casos, a temperaturas significativamente superiores às da temperatura ambiente. Consoante a amplitude de temperaturas definida, as misturas betuminosas podem ser enquadradas em quatro grupos: misturas betuminosas a frio, misturas betuminosas semi-temperadas, misturas betuminosas temperadas e misturas betuminosas a quente. As últimas distinguem-se das restantes pelo facto do seu processo de fabrico ser executado a temperaturas superiores (entre cerca de 150°C a 200°C). São também as mais aplicadas e estudadas a uma escala mundial, sendo objeto de análise da presente dissertação (Bandeira, 2019; Branco *et al.*, 2016).

Ao longo dos anos, devido ao incremento da intensidade do tráfego e uma maior exigência face aos níveis de resistência e longevidade dos pavimentos, os métodos de formulação das misturas betuminosas evoluíram. Visto que as proporções e características intrínsecas dos elementos que compõem as misturas betuminosas alteram, diretamente, o comportamento das mesmas, os métodos de formulação procuram otimizar o tipo de material e a respetiva proporção volumétrica ou ponderal a integrar na produção das misturas. Consequentemente, é possível garantir um comportamento adequado para a aplicação desejada (Branco *et al.*, 2016; Pimentel, 2013; Silva, 2014).

Os vários métodos existentes para formular as misturas betuminosas podem ser classificados como: analíticos, empíricos, racionais, volumétricos, baseados no desempenho, definidos por especificação ou mistos. O método empírico mais comumente empregue denomina-se de método de Marshall. Este procedimento consiste na determinação de vários parâmetros que caracterizam a mistura, através da realização de ensaios laboratoriais, permitindo obter uma previsão e projeção do seu comportamento (Branco *et al.*, 2016; Pimentel, 2013; Silva, 2014).

Os ensaios aplicados aos provetes no método de Marshall permitem determinar várias grandezas inerentes às misturas betuminosas, como a força de rotura (estabilidade), deformação e quociente de Marshall. Diversas propriedades volumétricas que caracterizam a mistura betuminosa são também calculadas. Este método permite obter a percentagem ótima de betume para a mistura estudada, através da média das percentagens de betume correspondentes ao melhor comportamento da mistura estudada nesses parâmetros (Pimentel, 2013; Silva, 2014).

Em Portugal, para a formulação de misturas utiliza-se um método misto, detalhado na norma EN 13108-1 (IPQ, 2008a). Este consiste da combinação do método de Marshall com ensaios relacionados com o desempenho das misturas, nomeadamente ensaios de sensibilidade à água e de resistência à deformação permanente, com o intuito de melhorar ou confirmar a percentagem ótima de betume obtida no método de Marshall (IPQ, 2008a).

Como mencionado anteriormente, consoante o tipo de camada betuminosa a aplicar, podem pretender-se, como principais exigências, propriedades funcionais e/ou estruturais. Em qualquer dos casos, as misturas betuminosas devem apresentar atributos de durabilidade, facilidade de execução e economia de modo a otimizar a sua aplicação e longevidade durante o período de vida útil. Para além destas singularidades, e independentemente do seu propósito, as misturas betuminosas devem reunir e cumprir as seguintes características e requisitos: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Branco *et al.*, 2016; Gomes, 2018). No Quadro 2.1 e Quadro 2.2 são definidas essas propriedades e identificados os parâmetros que as afetam (Fonseca, 2011).

Quadro 2.1 - Propriedades de misturas betuminosas (Fonseca, 2011)

Propriedade	Definição	Variáveis que afetam a propriedade
Estabilidade	Capacidade adequada para resistir, com reduzida deformação, às cargas a que fica sujeito em serviço.	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume; grau de compactação.
Durabilidade	Resistência à desintegração causada pelas solicitações climáticas e pelo tráfego.	Granulometria; percentagem de betume; grau de compactação; sensibilidade à água.

Quadro 2.2 - Propriedades de misturas betuminosas (Fonseca, 2011)

Propriedade	Definição	Variáveis que afetam a propriedade
Flexibilidade	Capacidade para se adaptar gradualmente às movimentações do seu suporte.	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume.
Resistência à fadiga	Aptidão da mistura em resistir a esforços de flexão repetidos sem que ocorra fendilhamento.	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume; grau de compactação; temperatura da mistura.
Aderência	Apetência da superfície de um pavimento, quando húmida, em contrariar os fenómenos de derrapagem e deslizamento.	Granulometria; tipo e textura do agregado; resistência do agregado ao polimento.
Impermeabilidade	Resistência à passagem de água e ar através das camadas do pavimento.	Granulometria; percentagem de betume; grau de compactação.
Trabalhabilidade	Facilidade de uma mistura em ser trabalhada e compactada.	Granulometria; percentagem e tipo de betume; tipo de agregado.

2.3 Compactação de Misturas Betuminosas

2.3.1 Generalidades

Vários autores consideram a compactação um dos fatores determinantes do comportamento dos pavimentos. Uma mistura betuminosa bem formulada e composta por materiais com características adequadas ao comportamento pretendido pode apresentar deficiências em serviço em consequência de uma deficiente ou desajustada compactação. O processo de compactação de misturas betuminosas consiste na reorganização das partículas que compõem o seu esqueleto, de modo a reduzir o seu volume, expulsando uma significativa percentagem do ar. Consequentemente, o aumento da densidade da mistura durante o processo é diretamente proporcional ao decréscimo do seu volume de vazios. Apesar de constituir a última fase do processo de construção da camada rodoviária, a compactação, tem um papel, decisivo, ao conferir ao material qualidades estruturais, que permitem suportar as cargas a que é sujeito sem que sofra deformações elevadas (AASHTO, 2000; Scherocman e Walker, 2019).

Através de forças externas, as partículas de agregado revestidas de betume são pressionadas umas contra as outras. Este fenómeno aumenta não só a área de contacto entre os agregados, como também o atrito interno e a capacidade de impermeabilização. A resistência à passagem do ar e da água é importante, nomeadamente em casos de aplicação em camadas de desgaste, pois impede que esses elementos circulem no interior da mistura betuminosa, possibilitando a aceleração do envelhecimento do betume e o aumento do teor de humidade (AASHTO, 2000).

Apesar da relevância deste processo para o comportamento da mistura betuminosa em serviço, não é aconselhável que se proceda a uma compactação excessiva da mistura. Um volume de vazios demasiado baixo pode levar a que o material passe a exibir um comportamento instável, apresentando distorções e deformações elevadas (Micaelo, 2008).

Sintetizando, a finalidade do procedimento de compactação é reduzir a presença de ar existente na mistura, diminuindo assim o seu volume total. Para uma melhor compreensão deste fenómeno, é recomendado o estudo da composição de uma mistura betuminosa compactada. Em seguida, na Figura 2.2, são exibidos os diversos componentes que a constituem, bem como as grandezas elementares mais importantes para a sua análise (Branco *et al.*, 2016).

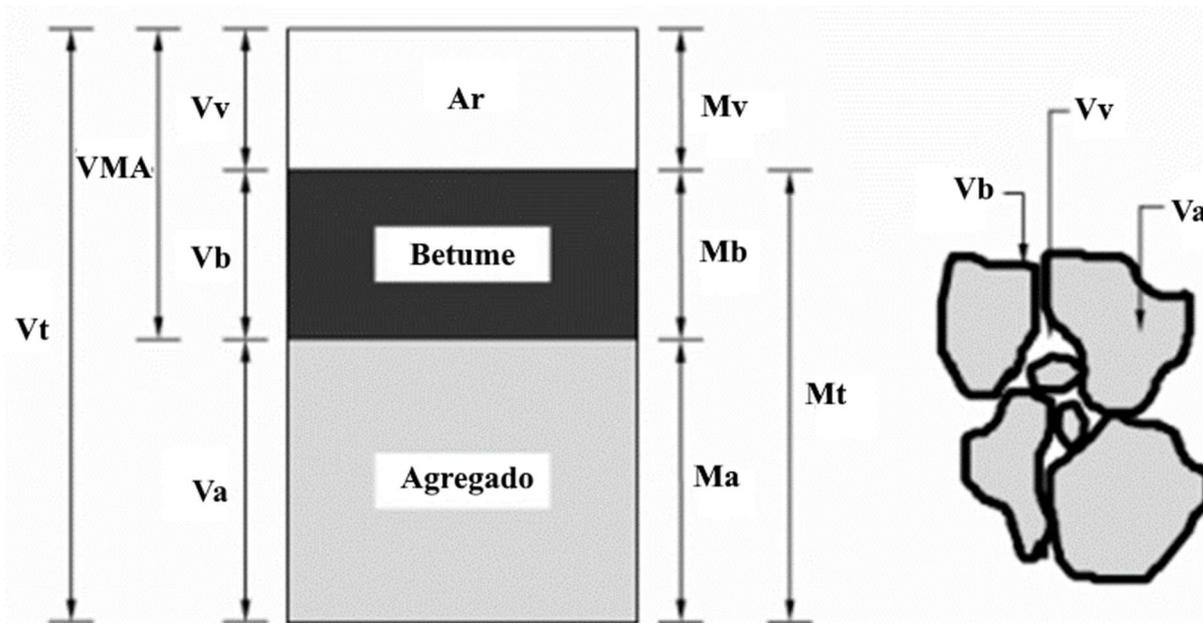


Figura 2.2 - Composição mássica e volumétrica de misturas betuminosas (Branco *et al.*, 2016)

Quadro 2.3 - Legenda das grandezas da Figura 2.2 (Branco *et al.*, 2016)

Sigla	Significado	Grandeza de medição
Ma	Massa de material agregado	(g)
Mb	Massa de betume	(g)
Mv	Massa de vazios	(g) desprezável
Mt	Massa total	(g)
Va	Volume de material agregado	(cm ³)
Vb	Volume de betume	(cm ³)
Vv	Volume de vazios	(cm ³)
Vt	Volume total	(cm ³)
VMA	Volume de vazios no agregado	(cm ³)

Através da relação destas grandezas elementares é possível determinar os diversos parâmetros que caracterizam a mistura betuminosa. Estes parâmetros são calculados com base na aplicação das normas europeias, apresentando-se de seguida e com carácter ilustrativo, as principais fórmulas que relacionam as massas e os volumes dos elementos constitutivos de uma mistura betuminosa (Branco *et al.*, 2016). Os que têm maior representatividade no fenómeno de compactação são a baridade, expressão ((2.1), volume de vazios no esqueleto do agregado (VMA), expressão (2.2), a porosidade, expressão (2.3), e o grau de compactação, expressão (2.4).

- a) **Baridade da mistura**, ρ_t , expresso em kg/m³, determinada pelo quociente da massa total da mistura pelo seu respetivo volume.

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} \quad (2.1)$$

- b) **Volume de vazios no esqueleto do agregado**, VMA, neste caso expresso em percentagem do volume total da mistura, representativo do volume de vazios e do betume, ou seja, o volume que o agregado não ocupa, em relação ao volume total da mistura.

$$VMA = \frac{V_b + V_v}{V_t} \times 100 \quad (2.2)$$

- c) **Porosidade**, n , expresso em percentagem, calculado pelo quociente do volume de vazios presente na mistura pelo seu volume total:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (2.3)$$

- d) **Grau de compactação**, G_c , expresso em percentagem, relaciona a baridade da mistura com a baridade máxima teórica da mistura em estudo:

$$G_c = \frac{\rho_t}{\rho_{tm}} \times 100 \quad (2.4)$$

Onde,

ρ_t – Baridade da mistura (kg/m³)

ρ_{tm} – Baridade teórica máxima da mistura (kg/m³)

Dos parâmetros representativos da compactação de misturas betuminosas, o mais referido na literatura e comumente aceite pelas normas europeias, como forma de controlo, é a porosidade. O método de formulação SUPERPAVE (“*Superior Performing Asphalt Pavement System*”) é um método volumétrico que define três métodos de formulação consoante o volume de tráfego previsto. Nesta metodologia é frequente a utilização do compactador giratório e como principal objetivo procura-se determinar percentagem ótima de betume, correspondente a um valor de porosidade da mistura betuminosa de 4%. Também em Portugal, o “*Manual de Pavimentação CEPSA*” (Jiménez, 2014) apresenta especificações relativas à compactação e acabamento das camadas de misturas betuminosas a quente em função da porosidade média da mistura.

2.3.2 Compactabilidade de misturas betuminosas

Hunter (2000) descreve a compactabilidade como “a facilidade que um determinado tipo de material apresenta para ser compactado”. Já a norma EN 12697-10 (CEN, 2001) define o conceito como “a relação entre a baridade ou porosidade e a energia de compactação aplicada”. De facto, a compactabilidade é, conjuntamente com a espalhabilidade, um dos componentes que definem a trabalhabilidade de uma mistura betuminosa (Gardete *et al.*, 2016). A espalhabilidade é a capacidade de a mistura solta ser distribuída na superfície da estrada com homogeneidade. Por sua vez, a trabalhabilidade relaciona-se com os dois conceitos anteriores e define-se como uma propriedade que permite produzir, transportar, dispersar e compactar uma mistura betuminosa em obra despendendo o mínimo de energia (Gardete *et al.*, 2016). A norma

EN 12697-10 (CEN, 2001) define a determinação da compactabilidade em laboratório através da relação de parâmetros como a baridade, porosidade ou espessura do provete e a energia de compactação.

Vários elementos influenciam a compactação das misturas betuminosas e consequentemente a sua compactabilidade. Segundo a literatura, os fatores que se destacam como mais influentes durante esse processo são a granulometria e propriedades dos agregados, o tipo e quantidade de betume utilizado, o tipo de compactação empregue e a temperatura (AASHTO, 2000; Huerne, 2004; Micaelo, 2008; Renken, 2004).

A temperatura considera-se como o principal fator da compactabilidade de uma mistura betuminosa (Bijleveld *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2016). Para uma energia de compactação constante, temperaturas mais elevadas proporcionam misturas compactadas com valores de baridade e grau de compactação superiores (Delgadillo e Bahia, 2008; Lehnen, 2015; Grave, 2016; Ying *et al.*, 2014). Estes resultados podem ser explicados pela variação de temperatura resultar num comportamento distinto do betume, nomeadamente na diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura. A compactação a temperaturas mais baixas necessita de uma maior energia induzida de modo a chegar à baridade ou grau de compactação prevista. No entanto, uma temperatura excessivamente alta pode trazer dificuldades de compactação devido à viscosidade extremamente baixa do betume. A resistência a conferir à mistura betuminosa deve ser a suficiente para suportar inicialmente as operações de compactação e posteriormente as condições de serviço (Polaczyk *et al.*, 2018, Zhang *et al.*, 2016).

Ying *et al.* (2014) procederam à avaliação da compactação de seis diferentes misturas betuminosas a diversas temperaturas. Os autores verificaram através da análise da percentagem de volume de vazios, altura dos provetes compactados e estabilidade de Marshall, que um aumento de temperatura beneficia o processo de compactação bem como a estabilidade do material. A maior variação desses parâmetros surgiu entre os 60 e 85°C, devido à maior viscosidade do betume a essas temperaturas. Foi possível concluir que a compactação a temperaturas mais elevadas permite obter as baridades desejadas com maior eficiência, bem como beneficia a estabilidade da camada betuminosa.

Como cada tipo de betume apresenta propriedades químicas e físicas diferentes, importa estudá-las, com recurso a métodos de ensaio, de modo a prever o seu variado desempenho em termos de compactabilidade e comportamento funcional. Os ensaios para determinar as propriedades do betume incluem, entre outros, o de penetração a 25°C, temperatura de amolecimento, viscosidade cinemática, resistência ao endurecimento, resiliência e de corte com varrimento de frequências (Branco *et al.*, 2016; Gameiro, 2013).

A temperatura do processo de mistura é igualmente importante ao de compactação pois permite um correto comportamento reológico do betume e possibilita que ambos os procedimentos sejam efetuados com eficiência. Em casos de obra, após a produção da mistura e até a sua colocação e compactação, esta irá inevitavelmente perder temperatura e, portanto, este fator deve ser tido em conta, de modo a que a temperatura durante a compactação seja suficiente para permitir ao betume ter um comportamento lubrificante e simultaneamente coesivo. Para um tipo de betume mais suscetível a alterações de temperatura, o tempo disponível para efetuar essa transição diminui, enaltecendo a importância do estudo prévio das características desse ligante (AASHTO, 2000; Delgadillo e Bahia, 2008; Gameiro, 2013).

2.3.3 Compactação em obra e em laboratório

Em situações de obra, após a produção da mistura betuminosa na central própria para o efeito, esta é transportada em camiões com isolamento térmico, seguindo-se o espalhamento e pré-compactação da camada através de uma pavimentadora com dimensões definidas. Por fim procede-se à sua compactação, utilizando equipamentos variados (AASHTO, 2000; Branco *et al.*, 2016). A superfície acabada deve ficar bem desempenada com um perfil transversal correto e livre de depressões, alteamentos e vincos (Jiménez, 2014).

A compactação efetuada em laboratório, quando comparada com as condições normalmente disponíveis em obra, garante um ambiente de melhor controlo nomeadamente em termos de temperatura, humidade e energia de compactação. O seu objetivo principal é o de obter uma boa correlação com a compactação efetuada em obra, tanto a um nível volumétrico como mecânico, de modo a produzir provetes com intuito de estudar o seu comportamento com uma maior fiabilidade (Beainy *et al.*, 2014; Partl *et al.*, 2011; Ying *et al.*, 2014).

Existem variados equipamentos laboratoriais de compactação disponíveis. Apesar de não existir um consenso acerca de que equipamento consegue simular com maior fiabilidade as condições de compactação em obra, existe concordância no facto de diferentes métodos de compactação laboratorial promoverem um rearranjo distinto dos materiais que compõem a mistura betuminosa, e, apesar de exibirem características volumétricas semelhantes, as suas características mecânicas variarem (Georgiou *et al.*, 2016; Hassan *et al.*, 2012; Hofko *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2018; Ying *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016). Os equipamentos de compactação mais frequentemente utilizados incluem:

- Compactador de impacto (Marshall) (EN 12697-30 (CEN, 2007a));
- Compactador vibratório (EN 12697-32 (CEN, 2007b));
- Compactador de rolos (EN 12697-33 (CEN, 2007c));
- Compactador giratório (EN 12697-31 (CEN, 2004));
- Compactador “*kneading*”.

Nos últimos anos, diversos estudos foram levados a cabo com o intuito de investigar as razões da variação das características mecânicas em diferentes métodos de compactação laboratorial. A distinta organização e orientação dos agregados promovida por cada tipo de equipamento altera a interação entre as partículas, e consequentemente o atrito interno da mistura betuminosa. A variação da distribuição do volume de vazios também é diferenciada para cada método de compactação utilizado. Deste modo, a coesão da mistura pode ser superior ou inferior, resultando num comportamento distinto (Liu, 2017; Plati *et al.*, 2015; Zou *et al.*, 2017).

Os métodos que utilizam moldes, como é o caso do compactador de impacto, compactador giratório e compactador vibratório resultam, geralmente, em misturas betuminosas compactadas cujas características mecânicas são mais elevadas comparativamente com misturas betuminosas compactadas através de outros métodos, e, inclusive, a misturas betuminosas compactadas em obra (Hassan *et al.*, 2012; Hunter *et al.*, 2004; Kok *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2018; Mollenhauer e Wistuba, 2015).

Vouskuilen e Van de Ven (2004) consideraram um rácio entre a área das paredes do provete com efeito de superfície e o volume do mesmo. Este efeito consiste no condicionamento do movimento das partículas nas zonas próximas da superfície da amostra. Os provetes produzidos em laboratório com utilização de molde apresentam esse efeito em todas as suas superfícies

devido ao molde ou placas onde se induz a energia de compactação. Iwama (2009) concluiu, após análise a amostras produzidas por compactação giratória e vibratória, que a distribuição e orientação das partículas nas zonas exteriores dos provetes são diferentes das zonas nucleares. Comparando provetes com diâmetros de 150 mm e 100 mm verificou que os primeiros apresentaram um maior rácio de segregação de partículas, com partículas de maiores dimensões a encontrarem-se nas zonas periféricas, junto à zona onde o molde é colocado.

O compactador de rolos é indicado por vários autores como aquele que se aproxima mais do processo de compactação de obra pelo facto de o equipamento empregue ser bastante semelhante ao utilizado “*in situ*”, ainda que de dimensões mais reduzidas. Juntamente com o compactador “*kneading*”, é o único capaz de gerar provetes com forma prismática de várias dimensões, dependendo do tamanho do rolo. (Hofko *et al.*, 2014; Micaelo, 2008).

O estudo levado a cabo por Plati *et al.* (2015) confirmou a proximidade da compactação de rolos efetuada em laboratório com a efetuada em obra, para misturas betuminosas. Através da variação de alguns parâmetros durante o processo de compactação laboratorial (temperatura, vibração, orientação de compactação) concluiu-se que este promove uma mistura compactada com valores de volumes de vazios semelhantes às compactadas em obra. Adicionalmente, Hofko *et al.* (2014) verificaram que o mesmo método de compactação se aproxima à compactação feita em obra, em termos de estrutura integral e características mecânicas como a rigidez, fadiga e deformação permanente.

Wistuba (2014) afirmou, pelo estudo do compactador cilíndrico de rasto liso, que a utilização deste compactador aproximava com maior qualidade a distribuição de volume de vazios, distribuição de partículas, orientação das mesmas e as propriedades mecânicas das misturas betuminosas compactadas com este equipamento com as compactadas em obra. Definiu ainda o compactador de impacto (Marshall) como o equipamento que apresentava uma correlação mais pobre com os parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas betuminosas compactadas em obra.

O método de compactação giratório tem sido desenvolvido nos últimos 50 anos, e apresenta uma grande taxa de utilização em países como E.U.A., França e Austrália. O equipamento foi introduzido de modo a simular com maior eficácia as cargas e pressões de veículos incidentes no pavimento. Vários outros países têm iniciado o processo de transição do método de compactação de impacto (Marshall) para o método de compactação giratório, nomeadamente devido à implementação do procedimento de formulação SUPERPAVE, onde o equipamento “*SUPERPAVE Gyratory Compactor*” (SGC) tem um papel fulcral. Este equipamento permite a variação de diversos parâmetros de compactação, como é o caso do ângulo de rotação interno, resultando num maior controlo sobre o processo de compactação (Georgiou *et al.*, 2016; Peterson *et al.*, 2004).

O compactador giratório apresenta uma maior facilidade de execução e controlo de parâmetros do que a compactação de rolos e obtém resultados que se encontram em maior concordância com os verificados em obra relativamente a métodos de compactação mais comuns, como o compactador de impacto empregue no método de Marshall. No entanto, existe uma maior divergência em relação à distribuição dos volumes de vazios e ao desempenho mecânico das amostras produzidas pelo compactador giratório.

A realização de estudos por parte de Walubita *et al.* (2012), que utilizaram tomografia assistida por computador, indicaram que embora o volume de vazios obtido por compactação giratório

ser semelhante ao de obra, o provete não apresenta uma distribuição uniforme desses vazios, pelo que não existe uma reprodução exata da compactação em obra. A percentagem do volume de vazios é mais elevada nas zonas periféricas do provete do que no centro, o que pode levar a que apresente uma maior resistência à deformação permanente em comparação com espécimes com uma distribuição homogénea desse parâmetro (Gardete *et al.*, 2018; Hunter *et al.*, 2004; Partl *et al.*, 2011; Walubita *et al.*, 2012). Segundo Leandro *et al.* (2017) um aumento da altura e diâmetro do provete produzido aumenta a heterogeneidade da distribuição de volumes de vazios presentes na amostra produzida pelo SGC.

Georgiou *et al.* (2016) investigaram o efeito da compactação giratória e da compactação efetuada em obra na estrutura interna de misturas betuminosas a quente. Foram utilizadas três misturas betuminosas distintas e procedeu-se a uma variância no ângulo interno de rotação do equipamento (0.82° ; 1.16° e 1.45°) Através de uma análise gráfica 2-D dos provetes, foi possível quantificar os pontos de contacto entre agregados, sua orientação e segregação. Apesar dos resultados de orientação e segregação de agregados serem inconclusivos, foi verificado que os provetes compactados por processo giratório apresentaram um maior número de pontos de contactos dos seus agregados, independentemente do ângulo, o que pode resultar numa maior resistência do material.

O compactador giratório permite uma ação de compressão aliada a uma ação de “*kneading*” que normalmente se verifica em obra (Wang *et al.*, 2019). Segundo Pérez-Jiménez *et al.* (2014) a variação de parâmetros como a tensão induzida e o ângulo de rotação interno permitem obter amostras com diferentes níveis de compactação. Os autores verificaram que para um valor superior da tensão induzida e do ângulo interno (750 kPa e $1,25^\circ$ respetivamente) o equipamento produzia na mistura uma ação mais elevada de tensão de corte. O aumento do ângulo de rotação interno tende a produzir misturas com valores mais elevados de densidade a temperatura constante (Swami *et al.*, 2004).

Diversos autores consideram o valor de $1,25^\circ$ como o ângulo que mais aproxima a compactação à verificada em obra (Ribas e Thives, 2019; Peterson *et al.*, 2004). No entanto, em alguns casos podem verificar-se diferenças entre o ângulo interno e o ângulo externo de alguns equipamentos. Deste modo, definiu-se que o ângulo interno é o que se deve controlar na compactação giratória, correspondente a um ângulo externo de $1,25^\circ$ no SGC (Buchanan *et al.*, 2004).

O compactador giratório revela-se como um equipamento muito importante na análise da compactação de misturas betuminosas e é inclusive referido na norma EN 13108-20 (IPQ, 2008b) para análise de compactabilidade. A utilização do compactador giratório, apesar de gerar, em algumas circunstâncias, misturas compactadas que apresentam parâmetros mecânicos superiores aos verificados em obra, é um processo que apresenta grande flexibilidade e controlo da energia de compactação induzida. Deste modo, a produção de amostras com certas propriedades volumétricas, como o volume de vazios, é facilitada. Assim, a utilização deste equipamento é adequada para uma maior variedade de misturas que simplificam e homogeneizam os processos de formulação com relativa simplicidade e menor custo económico (Gardete *et al.*, 2018).

2.4 Deformação Permanente em Misturas Betuminosas

2.4.1 Deformação permanente e formação de rodeiras

As ações externas que atuam sobre a estrutura de um pavimento, logo após a sua construção e durante o seu tempo útil de vida, provocam estados de tensão e deformação em todos os seus pontos que vão progressivamente promover alterações nos materiais constituintes e como consequência, reduzem a sua qualidade, o que pode levar ao aparecimento de certas degradações (Morea *et al.*, 2011; NCHRP, 2002; Zou *et al.*, 2017).

Os critérios de dimensionamento habitualmente adotados para os pavimentos rodoviários têm como objetivo limitar essas deteriorações. São denominados critérios de ruína e são definidos por expressões que relacionam o valor da extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação, ϵ_v , para o caso do critério de deformação permanente (expressão (2.5)), ou o valor da extensão radial de tração na base das camadas ligadas, ϵ_t , para o caso do critério de fadiga, com o número máximo de passagens do eixo-padrão que a estrutura tem capacidade de suportar durante a sua vida útil (Figura 2.3) (Branco *et al.*, 2016).

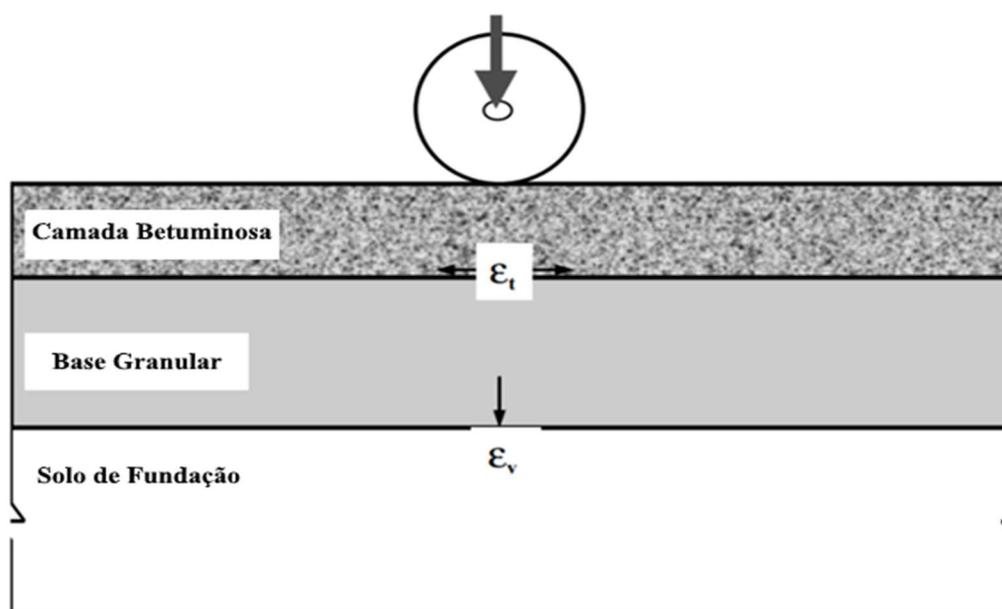


Figura 2.3 - Extensão vertical de compressão e extensão radial de tração num pavimento rodoviário flexível (NCHRP, 2002)

Expressão de Shell para o critério de deformação permanente:

$$\epsilon_v = K_s \times N_{80}^{-0,25} \quad (2.5)$$

Em que,

ϵ_v – Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional);

N_{80} – Número de eixos padrão de 80 kN;

K_s – Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuído ao dimensionamento do pavimento ($2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade; $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% de probabilidade; $1,8 \times 10^{-2}$ para 95% de probabilidade).

O processo de desenvolvimento de degradações do pavimento evolui ciclicamente e em cadeia, dando origens a novas patologias, as quais interferem com as características das primeiras. Deste modo, é possível compreender que as degradações de pavimentos aumentam com o tempo (NCHRP, 2002). Os tipos de degradação com maior relevância para os pavimentos do tipo flexível são o aparecimento de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas (NCHRP, 2002; Pereira e Miranda, 1999). No entanto, a diversidade de degradações pode ser mais vasta, podendo verificar-se o desenvolvimento de outro tipo de patologias.

As rodeiras são as degradações mais significativas da família da deformação permanente, apresentando-se como assentamentos do pavimento na área de passagem dos pneus dos veículos circulantes. Formam-se, principalmente, devido à carga cíclica aplicada pelos veículos e tendem a piorar com a repetição dessas solicitações. A deformação pode ocorrer em qualquer camada, dependendo da intensidade das ações aplicadas e das espessuras dos estratos constituintes do pavimento. Consequentemente, as rodeiras podem ser resultado da contribuição dessas deformações em variadas camadas, apesar de geralmente serem visíveis apenas nas camadas betuminosas superficiais (Branco *et al.*, 2016; Morea *et al.*, 2011; NCHRP, 2002; Wang *et al.*, 2017). A Figura 2.4 representa os três modos de formação de uma rodeira.

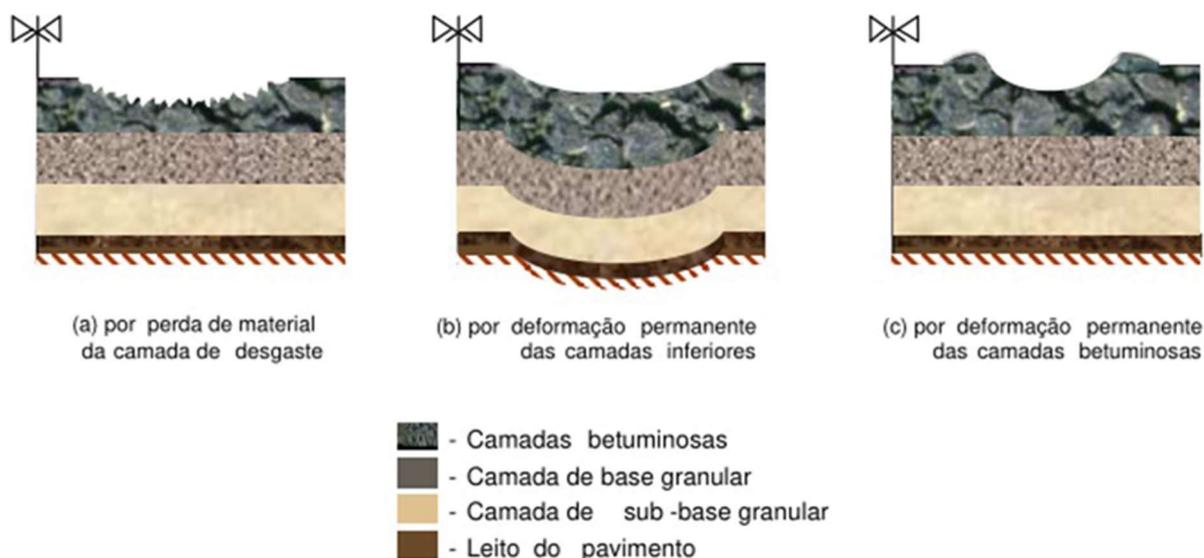


Figura 2.4 - Diferentes processos de formação de rodeiras (Freire, 2002)

- Por perda de material da camada de desgaste – As rodeiras formam-se devido à desagregação da camada de desgaste do pavimento, sendo esta a única camada contribuinte para esta degradação. Este desgaste ocorre geralmente em países de clima frio, devido à utilização de utensílios de proteção contra a ação da neve e do gelo, como é o caso de correntes de neve (Gardete, 2006; NCHRP, 2002).
- Por deformação permanente das camadas inferiores – As rodeiras formam-se devido à deformação do solo de fundação e das outras camadas granulares. A deformação do solo de fundação tem uma maior contribuição, no entanto, as restantes camadas acompanham o movimento de deformação de modo a manterem a mesma espessura. Estas rodeiras caracterizam-se por terem um raio grande (Gardete, 2006; NCHRP, 2002).
- Por deformação permanente das camadas betuminosas – As rodeiras formam-se por deformação das camadas superficiais betuminosas, principalmente a de desgaste, devido

à ação das cargas dos veículos e de ações climáticas desfavoráveis, como temperaturas elevadas, que incidem sobre elas. Apresentam geralmente um raio estreito e formam pequenas elevações laterais. Este tipo de rodeiras é a mais predominante em Portugal (Gardete, 2006; NCHRP, 2002; Wang *et al.*, 2017).

Nas camadas granulares ou no leito do pavimento, a deformação surge devido à aplicação de tensões superiores às expectáveis. Esta diferença de valores pode surgir devido a um mau dimensionamento do pavimento ou fraca qualidade dos materiais que o integram. No caso das camadas betuminosas, a deformação pode ocorrer pelas mesmas razões, bem como condições de serviço excessivamente altas, incluindo temperaturas elevadas, cargas de tráfego altas e velocidades de circulação reduzidas (Morea *et al.*, 2011; NCHRP, 2002; Wang *et al.*, 2017). Branco *et al.* (2016) indicam que o efeito de formação destas degradações é mais expressivo em pavimentos com condições de drenagens deficientes, fraca capacidade de suporte da fundação e reduzida compactação das camadas estruturais.

O aparecimento de rodeiras por deformação permanente tem severas consequências para o nível de segurança dos utentes do pavimento. A drenagem transversal do pavimento é reduzida em situações de chuva intensa, possibilitando acumulação de água nas rodeiras, o que agrava os fenómenos de hidroplanagem. Em países de clima mais seco, as rodeiras apresentam também efeitos negativos pelo facto de dificultarem a condução dos veículos, consequentemente diminuindo a sua segurança e comodidade (Morea *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017).

Visto que a maior parte dos pavimentos existentes em Portugal são do tipo flexíveis (EAPA, 2017), e, apesar da formação de rodeiras ser provocada pela deformação de várias camadas que compõem o pavimento, a contribuição das camadas betuminosas é responsável pela maior quota parte da deformação e consequentemente gravidade da mesma. Por esta razão a caracterização mecânica das misturas betuminosas nomeadamente à deformação permanente é de extrema importância (Abed e Al-Alazzawi, 2012; Ali *et al.*, 2017).

Como mencionado anteriormente, o comportamento das misturas betuminosas depende da sua composição e características dos materiais bem como das ações externas a que é sujeito. A deformação permanente verificada numa camada betuminosa ocorre por ação de duas componentes, como é possível observar na Figura 2.5. Nos primeiros anos de serviço do pavimento ocorre a densificação da camada, que diminui o seu volume e provoca um assentamento à superfície. Por outro lado, as deformações provocadas por tensões de corte, sem alterações volumétricas consideráveis, são originadas, essencialmente, pelas cargas de tráfego, que se vão acumulando durante toda a vida útil do pavimento. Deste modo, é natural que a deformação permanente ocorra com maior frequência nas zonas do pavimento onde se verifiquem maiores tensões de corte e temperaturas elevadas, ou seja, nas camadas superficiais (Ali *et al.*, 2017; Bastos *et al.*, 2017; Freire, 2002).

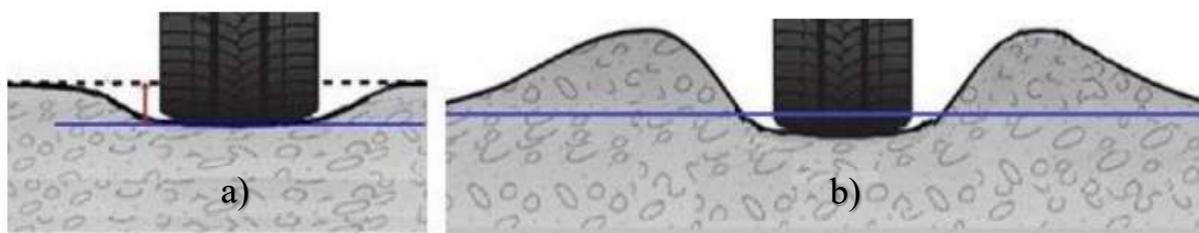


Figura 2.5 - Componentes da deformação permanente: a) Densificação; b) Tensões de corte

2.4.2 Métodos de caracterização da deformação permanente

Devido ao elevado número de fatores que influenciam diretamente a deformação permanente, subsistem dificuldades de modelá-la de um modo que reproduza as verdadeiras condições “*in situ*”. A complexidade das misturas betuminosas leva a que a deformação permanente seja avaliada em laboratório através de diferentes procedimentos (Wang *et al.*, 2017).

Os métodos empíricos englobam o método de Marshall, já referenciado pela sua utilidade na formulação de misturas, e o método de Hveem. Estes métodos assentam numa longa experiência adquirida com o passar dos anos. Apesar da sua simplicidade, estes procedimentos apresentam limitações, pois não traduzem com fiabilidade as ações que a mistura sofre em condições de serviço nem determinam nenhuma característica fundamental (Gardete, 2006).

Os métodos de ensaio laboratoriais consistem dos ensaios de compressão uniaxial e triaxial (EN 12697-25 (CEN, 2005)), cíclicos ou estáticos, ensaio de compressão diametral, ensaios de corte e ensaio de cilindro oco. Com o intuito de simular com maior proximidade a deformação permanente sofrida em obra, criaram-se adicionalmente os ensaios de simulação: ensaio de “*wheel tracking*” (EN 12697-22 (CEN, 2007d)) e ensaio de pista à escala real (Freire, 2002; Javilla *et al.*, 2017).

Durante o teste de compressão uniaxial cíclico, o provete, de forma cilíndrica é sujeito a cargas de compressões cíclicas. A variação de altura é medida em função do número de ciclos de aplicação da carga. Desta forma, a deformação medida no final do teste representa o parâmetro de caracterização da mistura betuminosa à deformação permanente. A deformação permanente acumulada é representada graficamente em função do número de ciclos aplicados. Adicionalmente, pode ser calculada a velocidade de deformação, que corresponde à variação de deformação verificada entre dois ciclos de carregamento específicos (Barros *et al.*, 2015; CEN, 2005; Sullivan *et al.*, 2003)

O desenvolvimento genérico da deformação permanente durante o ensaio de compressão uniaxial cíclico, bem como as três regiões distintas do progresso da curva é representado na Figura 2.6. É importante referir que, dependendo das condições do ensaio, é possível não se verificar uma ou mais das regiões representadas (Motevalizadeh *et al.*, 2018).

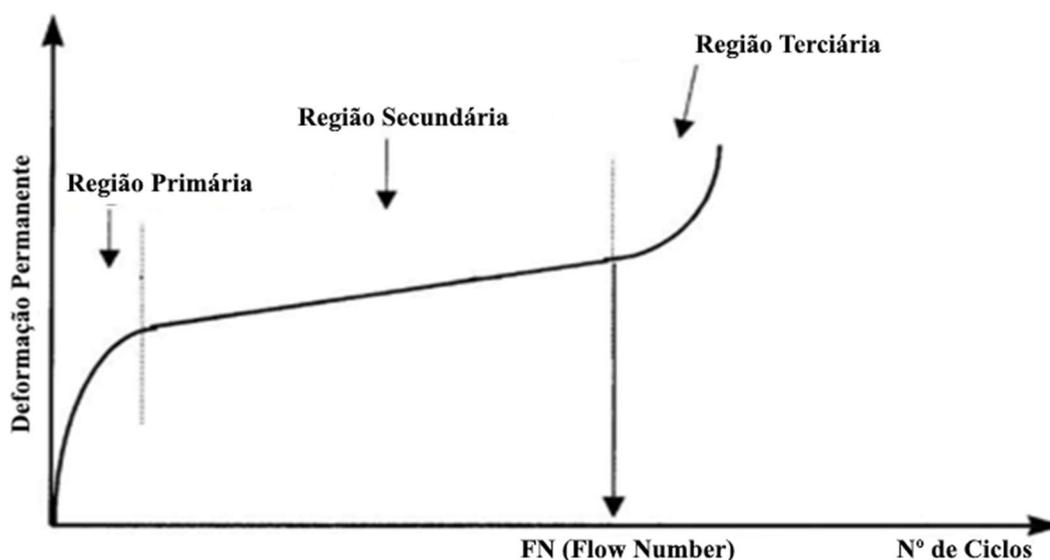


Figura 2.6 - Evolução genérica da deformação permanente de um provete sujeito ao ensaio de compressão uniaxial cíclico (Onofre *et al.*, 2011)

- Numa primeira fase é possível observar que a inclinação da curva vai diminuindo rapidamente com o número de ciclos de carga aplicados. Isto deve-se ao facto da mistura sofrer densificação, reorganizando as partículas de agregados que a integram, de modo a conferir uma maior resistência à deformação (Bastos *et al.*, 2017; Onofre *et al.*, 2011; Yinfei *et al.*, 2018).
- Na região secundária verifica-se que a inclinação da curva é aproximadamente constante com a aplicação das cargas. Nesta fase, a deformação permanente ocorre predominantemente devido a deformações por corte (Bastos *et al.*, 2017; Onofre *et al.*, 2011; Yinfei *et al.*, 2018).
- A sigla FN indica o valor do “*flow number*”. Número de ciclo para o qual o a terceira região de desenvolvimento da curva se inicia, ponto em que a taxa de deformação plástica é mínima e ocorre a rotura do provete (Bastos *et al.*, 2017).
- Por último, na região terciária, a inclinação da curva aumenta rapidamente com o número de ciclos de carga aplicados. Esta fase corresponde à rotura do provete, onde se observam as maiores deformações do provete devido a fatores como a fadiga ou falta de homogeneidade da mistura (Bastos *et al.*, 2017; Onofre *et al.*, 2011; Yinfei *et al.*, 2018).

O valor de FN é importante na medida que pode ser considerado como parâmetro de classificação de várias misturas relativamente à sua suscetibilidade à deformação permanente. Willis *et al.* (2010) citados por Bastos *et al.* (2017), compararam os resultados de 16 misturas betuminosas avaliadas em laboratório com resultados dessas misturas em obra através de ensaios acelerados em pistas à escala real. Esta comparação concluiu que o FN apresenta uma correlação com os valores médios de profundidade das rodeiras associados a um número de 5 e 10 milhões de passagens de eixos padrão. Adicionalmente foi encontrada uma correlação entre a taxa de deformação e o FN. Deste modo, estas relações podem ser utilizadas para determinar critérios de FN no dimensionamento dos pavimentos perante diversos níveis de tráfego.

O ensaio de compressão uniaxial cíclica apresenta a vantagem, sobre o ensaio de compressão uniaxial estático, de permitir simular com maior fiabilidade as ações a que uma mistura betuminosa está sujeita num pavimento, devido ao facto dos carregamentos serem sucessivamente aplicados com uma frequência elevada (Gardete, 2006). Irfan *et al.* (2018) verificaram, por comparação entre os ensaios de compressão uniaxial estático e cíclico à mesma temperatura e condições de pressão, que os provetes sujeitos ao primeiro revelaram sofrer menos deformações devido à aplicação das cargas ser estática.

Mohammad *et al.* (2006) procederam à caracterização da deformação permanente de seis misturas betuminosas a quente através de quatro ensaios distintos (compressão uniaxial cíclico, “*wheel-tracking*”, compressão triaxial cíclico e ensaio de corte a altura constante). Os resultados permitiram concluir que o ensaio de compressão uniaxial cíclico e o “*wheel-tracking*” se correlacionavam bem com a resistência à deformação permanente dos provetes com os analisados em obra.

Em 2008, Gardete *et al.* obtiveram resultados semelhantes. Estudaram uma mistura betuminosa, do tipo macadame com bastante utilização em Portugal, através de provetes executados em laboratório e retirados de trechos experimentais. De modo a verificar a suscetibilidade dos provetes à resistência à deformação permanente, bem como a sensibilidade dos ensaios, variou-

se a percentagem de betume utilizado na mistura (3,7%; 4,2%; 4,7%). Os ensaios de caracterização utilizados foram o ensaio de compressão uniaxial cíclico, ensaio de compressão triaxial cíclico, ensaio de corte a altura constante e o ensaio de “*wheel-tracking*”. Perante os resultados obtidos, foram retiradas as seguintes conclusões:

- Todos os ensaios utilizados demonstraram uma capacidade satisfatória de caracterizar o comportamento da mistura à deformação permanente;
- O processo de compactação influenciou os resultados obtidos significativamente. A caracterização relativa apenas foi semelhante no ensaio de corte a altura constante;
- Os resultados dos diferentes ensaios verificaram ter uma boa correlação, nomeadamente na análise de parâmetros como a deformação permanente acumulada e a velocidade de deformação. Estes resultados permitem concluir que é vantajoso utilizar métodos de ensaio mais simples, pois resultam em resultados semelhantes aos processos mais complicados;
- A velocidade de deformação foi definida como o parâmetro mais interessante para caracterizar a deformação permanente, devido à sua simples compreensão e cálculo, oferecendo resultados com fiabilidade;
- Em termos de análise e controlo de qualidade, o ensaio de “*wheel-tracking*” revelou-se como o mais indicado, seguido do ensaio de compressão uniaxial cíclico. O primeiro apresenta a vantagem de poder ensaiar um maior leque de misturas betuminosas.

2.4.3 Fatores que influenciam a deformação permanente

O aparecimento e agravamento de deformações permanentes em pavimentos do tipo flexível podem ser influenciados por diversas condicionantes, desde propriedades da própria camada betuminosa a fatores externos. Na revisão bibliográfica, os agentes considerados mais condicionantes incluem a temperatura, intensidade de tráfego, características granulométricas da mistura betuminosa, quantidade de tipo de betume inserido nela e compactação da mesma. Em seguida são analisados com maior detalhe esses fatores, bem como a sua relação com o comportamento da camada betuminosa à deformação permanente.

a) Temperatura

As misturas betuminosas alteram o seu comportamento perante temperaturas diferentes em grande parte devido à incorporação de betume na sua constituição. Este material apresenta viscosidades variáveis consoante a temperatura presente na mistura, alterando não só o seu comportamento mecânico, bem como o de toda a mistura. (Gardete, 2006; Zou *et al.*, 2017).

A temperaturas elevadas, o betume torna-se menos viscoso, apresentando-se com um comportamento lubrificante, permitindo um maior movimento das partículas de agregados que integram a mistura betuminosa. O módulo de rigidez da mistura betuminosa diminui com o aumento da temperatura, fruto da menor viscosidade apresentada pelo betume, agravando as deformações permanentes de origem viscosa, e proporcionando o aparecimento de deformações na zona do pavimento que se encontra em contacto com os rodados dos veículos. Pelo contrário, a temperaturas mais baixas, para uma viscosidade de betume superior, os movimentos das partículas sólidas tendem a ser mais reduzidos, verificando-se um maior módulo de rigidez da mistura e uma maior resistência à deformação permanente (Morea *et al.*, 2011; Narayan *et al.*, 2017; Nascimento *et al.*, 2015; SHRP, 1991)

A temperatura afeta as duas componentes da deformação permanente. A sua densificação aumenta, pois, como já mencionado, as temperaturas elevadas facilitam a compactação das misturas betuminosas. As deformações por corte são também superiores, nomeadamente as deformações de origem viscosa irreversíveis, o que piora o comportamento à deformação permanente (Narayan *et al.*, 2017; Nascimento *et al.*, 2015).

Alkaissi (2018) analisou o efeito de cargas de tráfego e da sua ação combinada com temperaturas elevadas de modo a caracterizar o comportamento à deformação permanente de pavimentos flexíveis, através de um modelo 3D de elementos finitos. As cargas de tráfego foram simuladas por cargas de 80 kN por eixo e a temperatura induzida no pavimento foi de 45°C. A profundidade da rodadura observada foi claramente superior, para qualquer camada, quando a ação da temperatura era um fator influente.

Em Portugal, a temperatura tem um grande peso no aparecimento de deformações permanentes nos pavimentos flexíveis, devido ao clima cada vez mais quente, especialmente no Verão. As camadas betuminosas que integram os pavimentos ficam então sujeitas a alterações no seu comportamento estrutural devido às temperaturas elevadas que se fazem sentir. Torna-se fulcral, para avaliar o comportamento das misturas betuminosas em laboratório, utilizar temperaturas que representam as condições que a mistura estará sujeita durante o seu período de utilização, nomeadamente temperaturas na gama de valores mais elevados que se esperam verificar em condições climáticas mais extremas (Freire, 2002; Gardete, 2006).

Certas normas referem como temperatura de ensaios de caracterização de deformação permanente valores que atingem os 60°C (IPQ, 2008b; CEN, 2007; EP, 2014). No entanto, e com o objetivo de estabelecer um maior rigor na escolha de temperaturas de ensaio a aplicar em camadas de desgaste, Freire (2002) procedeu à elaboração de um mapa de zonamento climático para Portugal Continental. Para as zonas quentes do país, a autora recomendou uma temperatura de ensaio de 50°C. A utilização de valores mais elevados, como o caso de 60°C pode levar a uma maior dispersão de resultados dificultando a reprodutibilidade dos ensaios laboratoriais. Apesar desse valor superior simular condições mais desfavoráveis a que as camadas de desgaste poderão ser sujeitas e levar à realização de ensaios mais acelerados, poderá conduzir a resultados enganadores devido ao facto da temperatura de amolecimento de muitos tipos de betume serem dessa ordem de grandeza.

b) Quantidade e tipo de betume

Uma mistura betuminosa convenientemente formulada para resistir às deformações não deve apresentar valores de teor de betume demasiado baixos nem excessivamente altos. A falta de ligante pode provocar desagregações quando solicitada, devido à falta de coesão das partículas de agregado. Por outro lado, uma percentagem de teor de betume em excesso considera-se um dos maiores contribuidores para a formação de patologias ligadas à deformação permanente em pavimentos (Freire, 2002; Abed e Allazawi, 2012). Gardete *et al.* (2008), na sua análise do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas, com três teores de betume distintos (3.7%; 4.2% e 4.7%), verificaram que a extensão axial e a velocidade de deformação dos provetes, analisados através do ensaio uniaxial cíclico, aumentava com o aumento da percentagem de betume da mistura betuminosa.

Como referido anteriormente, as misturas betuminosas herdaram várias características dos seus ligantes, que dependendo do seu tipo apresentam-se mais ou menos suscetíveis às variações de temperatura. Dada a importância dada à temperatura no fenómeno de deformação permanente,

e a sua relação existente com o betume, é possível inferir que o tipo de betume utilizado, e, portanto, as suas características, tornam a mistura betuminosa mais ou menos resistente a deformações permanentes quando solicitadas a elevadas temperaturas (Abed e Allazawi, 2012; Almeida Jr. *et al.*, 2018; Narayan *et al.*, 2017; Remišová e Zatkalíková, 2016).

A utilização de ligantes convencionais, não modificados, geralmente resultam em misturas betuminosas menos rígidas, e, portanto, mais propícias a sofrer deformações permanentes a dadas temperaturas. De modo a evitar estas situações, foram-se desenvolvendo estudos de modo a melhorar as características reológicas do material, e consequentemente melhorar o comportamento da mistura à deformação permanente, através da sua modificação por inserção de materiais como os polímeros, tornando-os mais viscosos a certas temperaturas (Almeida Jr., *et al.*, 2018; Juceline Bastos *et al.*, 2017). Este tema será desenvolvido com maior detalhe na secção seguinte.

Adicionalmente, o betume, com o passar do tempo, vai envelhecendo devido à exposição a fatores climáticos e ao oxigénio. Este processo torna o betume mais viscoso, e, apesar de prejudicar certas propriedades da mistura betuminosa, torna-a menos suscetível às deformações permanentes. Por esta razão, verifica-se que no início da vida útil do pavimento, as camadas betuminosas são mais suscetíveis às deformações permanentes, e, com o eventual envelhecimento do betume vão se tornando mais resistentes a esse fenómeno (Bandeira, 2019; Gardete, 2006).

c) Granulometria e características dos agregados

Para além da coesão fornecida pelo ligante, o atrito interno dos agregados é outra componente que fornece resistência às misturas betuminosas. De modo a obter uma mistura coesa e com elevado grau de atrito entre partículas de agregado é fundamental que a curva granulométrica da mistura apresente uma boa granulometria. Assim sendo, para misturas que apresentam granulometria contínua, a área de contacto entre partículas de agregado é mais elevada, o que promove uma maior resistência ao corte e melhora o comportamento à deformação permanente (Ali *et al.*, 2017; Freire, 2002; Gardete, 2006).

Estudos efetuados concluem a importância da relação entre os tipos de agregados utilizados com a estabilidade verificada no esqueleto sólido da mistura. Nestas investigações, verificou-se que misturas betuminosas cujos agregados apresentam formas angulares apresentavam uma maior estabilidade no esqueleto sólido da mistura, melhorando o seu comportamento à deformação permanente (Ferreira *et al.*, 2016; Leon e Gay, 2019).

Complementando o estudo, verificou-se que a utilização de agregados de forma cúbica produz misturas com comportamento à deformação permanente mais resistente do que misturas com agregados de outras formas. Para além disso, uma grande utilização de agregados cujas formas são alongadas não é aconselhada. A sua fragilidade perante solicitações externas reduz a resistência do esqueleto sólido, e, consequentemente empobrece o comportamento à deformação permanente da mistura betuminosa (Ferreira *et al.*, 2016; Leon e Charles, 2015; Leon e Gay, 2019; Liu, 2017).

A utilização de agregados com uma textura mais rugosa permite aumentar a resistência das misturas betuminosas à deformação permanente, em comparação de misturas betuminosas que utilizam agregados com textura superficial menos rugosa. A textura mais áspera aumenta o atrito entre partículas sólidas, melhorando a sua resistência (Liu, 2017; Masad *et al.*, 1999).

Uma outra característica da granulometria dos agregados que afeta o comportamento à deformação permanente de uma mistura betuminosa é a dimensão máxima do agregado. A introdução de agregados de maiores dimensões aumenta o volume de concentração do agregado na mistura, que, por sua vez, melhora o comportamento à deformação permanente, alterando a estrutura base da mistura e permitindo que as cargas solicitadas sejam suportadas diretamente pelo atrito existente entre os agregados (Gardete, 2006; Leon e Charles, 2015; Liu, 2017).

d) Tráfego

Como as patologias por deformação permanente resultam de uma acumulação de várias aplicações de ações externas sobre o pavimento, é possível inferir que quanto mais intensas forem essas ações mais drásticas serão as deformações produzidas no pavimento. Para além da temperatura elevada, já referida anteriormente, o volume de tráfego, as cargas elevadas impostas pelos veículos, principalmente os pesados, e as velocidades reduzidas de circulação são os principais fatores que contribuem para o processo de degradação por deformação permanente (Chen *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017).

Resultados analisados por Chen *et al.* (2004) comprovam que o aumento das cargas nos eixos de veículos pesados provocam uma maior deformação permanente nas camadas constituintes de um pavimento flexível, com uma consequência mais drástica nas camadas superficiais. A profundidade de uma rodadeira registada após um definido número de passagens de um eixo de 80 kN comparativamente com o mesmo número de passagens de um eixo de 100 kN foi substancialmente inferior.

Wang *et al.* (2017) procederam ao desenvolvimento de um modelo 3D de previsão de deformação permanente em camadas betuminosas, atendendo à influência de parâmetros relacionados com veículos pesados (tipo de eixo, velocidade de circulação, pressão do pneu). O ensaio de referência efetuado para comparar a variância desses parâmetros consistiu de um veículo pesado de eixo simples com rodado duplo, cuja carga de cada pneu aplicada na superfície era de 25 kN, a tensão de contacto de cada pneu 0,7 MPa e a velocidade de circulação de 80 km/h.

Ao reduzir a velocidade para 60 km/h verificou-se que a deformação permanente induzida no pavimento acrescia em 60%. As velocidades mais reduzidas são predominantes em zonas de intersecções, aumentando a probabilidade de ocorrência de deformação permanente nessas áreas. Adicionalmente, um aumento na pressão do pneu, que resultou numa tensão de contacto aplicada no pavimento de 0,9 MPa, conduziu a um acréscimo de deformação permanente do pavimento em 7%. Por fim, a utilização de rodados de duplo eixo em detrimento de rodados com eixo simples resultou também numa maior contribuição para a deformação permanente. Comparativamente ao ensaio de referência, a utilização de um eixo duplo aumentou o efeito da deformação permanente em 33%.

A importância do número de pneus integrantes no eixo de veículos pesados também não pode ser ignorada. Gardete (2006) refere que a utilização de rodados simples de base mais larga em detrimento de rodados duplos agrava as deformações permanentes no pavimento. A área de contacto entre o pneu e a camada superficial é inferior, no entanto, a pressão do pneu é mais elevada, conduzindo a uma maior tensão aplicada.

A concentração da solicitação das cargas também se apresenta como um fator que acelera a deformação permanente. Em locais com uma reduzida distribuição lateral, onde o tráfego é

canalizado, a área do pavimento sujeita às tensões aplicadas pelos rodados é sempre a mesma, o que provoca um maior acumular de deformações permanentes (Hossain *et al.*, 2016).

e) Compactação

A importância de uma boa correlação entre a compactação obtida em laboratório e em obra foi já referida. Os diferentes métodos de compactação reorganizam os componentes de uma mistura betuminosa de modos distintos, e, apesar de resultarem em misturas compactadas com propriedades volumétricas semelhantes, os comportamentos mecânicos, nomeadamente o desempenho à deformação permanente variam (Bijleveld *et al.*, 2016; Zou *et al.*, 2017).

Ao proceder-se a uma boa compactação, o volume de vazios na mistura é diminuído, permitindo uma maior resistência à deformação, devido ao maior contacto entre as partículas de agregado. No entanto, o volume de vazios presente na mistura betuminosa após a compactação não deve ser muito reduzido, pois instabiliza o comportamento da mistura à deformação permanente, fragilizando-a. Gibb (1996) observou uma pobre resposta de misturas betuminosas extraídas do campo e compactadas através do método de vibração cujos volumes de vazios se encontravam abaixo de 3%. Concluiu que este valor reduzido resultava num espaço de vazios insuficiente para acomodar o betume e os agregados, resultando numa perda de fricção entre as partículas sólidas quando solicitadas. Capitão (2003) denominou esse valor limite como “volume de vazios crítico”.

Airey e Collop (2015) apresentaram valores de deformação permanente de uma mistura betuminosa densa compactada através de diferentes métodos que indicaram uma amplitude de valores ótimos de volume de vazios entre os 3 e 8%, na qual a variação da deformação permanente se mantém aproximadamente constante. Para além disso, foi possível aferir que os provetes compactados em obra apresentam uma resistência à deformação inferior aos provetes compactados em laboratório, tal como já mencionado. Os autores alegaram que estas variações resultaram do facto da compactação giratória e vibratória induzirem a uma orientação dos agregados que promove uma maior fricção entre eles, aumentando a resistência da mistura.

Mollenhauer e Wistuba (2015) analisaram uma mistura betuminosa AC 14 submetida a diferentes compactações e testada com recurso ao ensaio de compressão triaxial. Concluíram que as propriedades resistentes dos provetes compactados através de compactação de impacto e compactação giratória resultavam de uma segregação dos agregados maioritariamente vertical, pois os moldes utilizados nesses métodos impedem a segregação horizontal. Adicionalmente, corroboraram a proximidade no comportamento entre as misturas betuminosas compactadas em obra e as compactadas em laboratório por ação de rolos.

Liu *et al.* (2018) na análise de um novo compactador, Aachen, baseado no compactador “*kneading*”, verificaram que este produzia misturas betuminosas compactadas cujas características mecânicas (deformação permanente e fadiga) e orientação dos agregados se aproximavam melhor a misturas compactadas em obra, comparativamente a misturas compactadas através do compactador de impacto. O compactador de impacto induz a energia de compactação na mistura de um modo bastante uniforme, não permitindo uma organização homogénea dos seus componentes. Por outro lado, o efeito “*kneading*” do compactador de Aachen permite simular a compactação verificada “*in situ*” com mais eficácia.

2.5 Misturas Betuminosas Modificadas Com Polímeros

Devido ao aumento da exigência em relação ao desempenho dos pavimentos rodoviários, foram investigados e desenvolvidos processos de modificação das misturas betuminosas, nomeadamente com o intuito de alterar as propriedades do betume e, conseqüentemente da mistura, através da inserção de materiais variados, incluindo polímeros. A utilização de polímeros sintéticos e naturais como agentes de modificação das características do betume data aos finais do século XIX. Os resultados desses estudos indicam que a adição de materiais poliméricos concedem melhorias a características mecânicas da mistura betuminosa a variadas temperaturas, permitindo a prevenção de duas das principais causas de deterioração de pavimentos: a deformação permanente e o fendilhamento por fadiga (Ahmad, 2014; Dalhat e Wahhab 2017; Kalantar *et al.*, 2012; Mishra e Gupta, 2017).

Vários tipos de polímeros foram estudados com o propósito mencionado, desde o PEBD (Polietileno de Baixa Densidade), PEAD (Polietileno de Alta Densidade), PET (Polietileno Tereftalato), PP (Polipropileno), ABS (Estireno-Acrilonitrila), PVC (Policloreto de Vinila) e EVA (Acetato-Vinilo de Etileno). No geral, as conclusões retiradas das investigações foram satisfatórias, com aumentos da resistência à deformação permanente, resistência à fadiga, estabilidade de Marshall, módulo resistente e menor suscetibilidade à água das misturas modificadas (Almeida *et al.*, 2020).

O plástico é um material que tem uma presença relevante na vida quotidiana, permitindo uma variada gama de utilizações devido à sua versatilidade e reduzido custo. No entanto os processos de produção, utilização e eliminação deste material não só prejudicam o ambiente como muitas vezes não captam os benefícios económicos de uma abordagem circular. A sua decomposição pode levar centenas de anos, e como consequência da sua crescente produção, os resíduos plásticos têm também aumentado (Comissão Europeia, 2018; Costa, 2015).

Ao longo dos últimos anos, a importância do plástico na economia mundial sofreu um crescimento sistemático. Em 2015, a produção mundial de plástico atingiu os 322 milhões de toneladas, um valor vinte vezes superior ao registado na década de 1960, e que é previsto duplicar nas próximas décadas. Contudo, estima-se que menos de 30% dos resíduos de plástico produzidos na Europa anualmente são recolhidos para reciclagem, enquanto que 39% são incinerados e 31% depositados em aterros. A elevada dependência nestes últimos processos de eliminação de resíduos plásticos é preocupante pois leva a impactos ambientais severos através de emissões de dióxido de carbono e contaminação de solos e corpos de água. Para além das questões ambientais, a necessidade de melhor rentabilizar o ciclo de vida do plástico torna o foco no processo da reciclagem fundamental. Este permite a recuperação de resíduos e reprocessamento do material em produtos úteis, muitas vezes diferentes da sua forma original (Comissão Europeia, 2018).

O plástico é maioritariamente constituído por polímeros fabricados sinteticamente. Estes podem ser caracterizados consoante as suas propriedades físicas e químicas. Os mais utilizados são os termoplásticos devido à sua maior versatilidade de utilização. Em relação às suas propriedades físicas estes assemelham-se à borracha, nomeadamente em termos de flexibilidade e resistência. A sua grande vantagem é a possibilidade de reverter o seu estado físico rapidamente através da imposição de valores de temperatura diferentes. Amolecem e fundem quando solicitados a elevadas temperaturas e regressam ao estado sólido quando a temperatura é suficientemente reduzida (Bandeira, 2019; Costa, 2015).

Em virtude dos bons resultados adquiridos no desenvolvimento de investigações acerca da adição de materiais poliméricos virgens nas misturas betuminosas, e perante um panorama sustentável e económico, reconheceu-se que a investigação sobre a inserção de polímeros reciclados deveria ser devidamente desenvolvida para o ramo da pavimentação como solução alternativa. As conclusões retiradas desses estudos indicaram que as modificações de misturas betuminosas por ação de polímeros reciclados demonstram resultados semelhantes às misturas betuminosas modificadas por ação de polímeros virgens, com o benefício adicional ambiental e económico (Ahmad e Jaya, 2016; Costa *et al.*, 2017; Kalantar *et al.*, 2012; Sarang *et al.*, 2016).

O processo de modificação do betume por inserção de resíduos plásticos denomina-se método húmido (Kalantar *et al.*, 2012; Mishra, 2016). O material plástico aumenta o ponto de amolecimento do betume e diminui a sua suscetibilidade térmica, o que permite ao pavimento manter a sua flexibilidade perante a solicitação de diversas temperaturas. Adicionalmente, promove uma maior rigidez, aderência e coesão ao ligante, o que resulta numa maior estabilidade e longevidade do pavimento (Kalantar *et al.*, 2012; Trimbakwala, 2017).

A adição direta de polímeros sólidos na mistura ou nos agregados aquecidos denomina-se método seco (Manju *et al.*, 2017; Mishra, 2016). Quando os resíduos plásticos são introduzidos juntamente com os agregados a elevadas temperaturas, fundem e revestem-nos, formando uma camada de textura oleosa que aumenta a resistência das partículas sólidas e facilita a ligação ao betume devido a uma maior área de contacto entre os polímeros e o ligante. Essa camada resulta, adicionalmente, numa redução do volume de vazios, o que previne a absorção de água e a oxidação do betume resultando num pavimento mais resistente e duradouro (Ahmad e Jaya, 2016; Mishra 2016).

Ambos os métodos levam a melhorias no comportamento das misturas betuminosas em serviço. Ainda assim, a diferença entre cada processo levou, inevitavelmente, a estudos com o intuito de comparar os comportamentos de misturas betuminosas sujeitas à adição de polímeros através dos dois procedimentos.

Manju *et al.* (2017) analisaram o uso de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) pelos dois processos, demonstrando que o uso do método seco produzia amostras com volumes de vazios inferiores e maior capacidade resistente à deformação permanente. Na avaliação do betume modificado por via húmida, este apresentou uma maior viscosidade e estabilidade, em comparação com o betume de referência.

Mishra (2016) procedeu à avaliação de características da mistura betuminosa quando sujeita à adição de resíduos plásticos reciclados, do mesmo tipo, pelo método húmido e pelo método seco. A mistura de referência, sem aditivos, continha uma percentagem ótima de betume de 5% da massa da mistura. Duas outras misturas foram produzidas com adição de PEBD em percentagens de betume, com incrementos de 2% (5%, 7%, 9% e 11% da massa de betume), uma através do método seco e outra através do método húmido. Foram avaliados os parâmetros de estabilidade, índice de sensibilidade à água e deformação através da realização de ensaios devidamente normalizados, com a conclusão de que a percentagem ótima de PEBD seria de 9% da massa de betume. Posteriormente foi executada uma comparação dos parâmetros obtidos nas três misturas (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 - Parâmetros de análise de misturas betuminosas via método húmido e seco
(Mishra, 2016)

Propriedade	Mistura de Referência	Mistura Método Húmido	Mistura Método Seco
PEBD em Massa de Betume (%)	-	9	9
Valor de Estabilidade de Marshall (kg)	2012	2452	2786
Resistência à Tração Indirecta (N/mm ²)	0,76	0,796	0,889
Deformação de Marshall (mm)	3,28	2,54	2,34

Os resultados evidenciam o benefício da utilização de resíduos plásticos reciclados como agente modificador das misturas betuminosas. Ambos os métodos, húmido e seco apresentam relativas melhorias em vários parâmetros de avaliação da mistura betuminosa. No entanto, o método seco revelou-se um processo com resultados mais benéficos ao comportamento da mistura, com um aumento da estabilidade na ordem dos 38,47%, sensibilidade à água na ordem dos 16,97% e uma diminuição na deformação em cerca de 28,65% em relação aos parâmetros da mistura de referência.

A adição de resíduos de plástico à mistura, por substituição de ligante ou de agregados pode resultar numa diminuição da sua baridade, devido à baixa densidade do material. Adicionalmente, os resíduos plásticos apresentam uma menor suscetibilidade à temperatura do que o betume, e, conseqüentemente, quando inseridas na mistura, permitem que o ligante mantenha a sua rigidez a temperaturas mais elevadas. Isto permite um melhor desempenho face a deformações plásticas, resultando numa maior resistência perante a deformação permanente (Mishra e Gupta, 2017; Nouali *et al.*, 2019). Esta ação é considerada por Ziari *et al.* (2016) como que uma “absorção” das tensões induzidas pelas cargas e temperaturas no pavimento, reduzindo a suscetibilidade de formação de rodeiras em serviço.

Ziari *et al.* (2016) inseriram resíduos de Polietileno Tereftalato (PET), como aditivo a uma mistura betuminosa, através do método seco, com o intuito de observar o seu comportamento à deformação permanente. O material residual foi introduzido na mistura em dimensões de 10×2.5, 20×2.5 e 30×2.5 mm e em diversas percentagens (0.25%, 0.5%, 0.75% e 1% da massa total da mistura). Após compactação os provetes foram sujeitos a ensaios de “wheel-tracking” e de compressão uniaxial cíclica. Os resultados verificados indicavam uma redução da deformação permanente com o aumento da percentagem de PET inserida. No entanto, o desempenho era inferior para resíduos cujas dimensões eram superiores. Por outras palavras, a mistura com 1% de PET cujas dimensões dos resíduos eram 10×2.5mm comprovou ter melhor desempenho.

Ahmad e Jaya (2016) investigaram as propriedades de betumes alterados com várias percentagens de resíduos plásticos provenientes de sacos de plástico reciclados (0%; 1.5%; 3%; 4.5%; 6%). Os betumes foram sujeitos a diversos ensaios de caracterização. Um deles, o ensaio de corte direto, permitiu obter parâmetros relacionados com a resistência à deformação permanente. Com o aumento da percentagem de resíduo plástico inserida, verificou-se que a resistência à deformação permanente sofria também um acréscimo. Além disso, o ligante

apresentou valores mais elevados de viscosidade a altas temperaturas, o que permite dotar, também, a mistura em estudo de maior resistência perante deformações.

Abdo e Khater (2018) aditaram três tipos de betumes com resíduos plásticos provenientes de reciclagem de garrafas de plástico com o intuito de verificar a alteração das propriedades do ligante, nomeadamente a viscosidade, módulo Complexo de corte e ângulo de fase. Os parâmetros necessários para tal avaliação foram obtidos através de ensaios de viscosidade cinemática e com um reómetro de corte. A viscosidade dos betumes aumentou com a inserção de percentagens incrementais de resíduos plásticos, mesmo a temperaturas elevadas (135°C). Deste modo é expectável um aumento do seu módulo de rigidez, que permite um melhor desempenho à deformação permanente.

Fonseca *et al.* (2018) procederam ao teste de variadas percentagens de PEBD reciclados incorporadas numa mistura betuminosa AC14 surf 35/50, comparativamente com a mesma mistura sem adição desse material plástico. A percentagem de 6% de PEBD face à massa total de betume foi determinada como a melhor solução, atendendo aos resultados obtidos no ensaio de compressão de Marshall (melhor desempenho em relação à estabilidade e deformabilidade). Na avaliação à deformação permanente, através do ensaio de “*wheel-tracking*”, observou-se que a mistura com 6% de PEBD tinha um comportamento superior ao da mistura de referência, sem comprometer outros parâmetros observados (sensibilidade à água e comportamento à fadiga). Os resultados do ensaio revelaram que o PEBD inserido na mistura permitiu um decréscimo de 66% na profundidade da rodeira, comparativamente à profundidade de deformação observada para a mistura sem adição de resíduos (Figura 2.7).

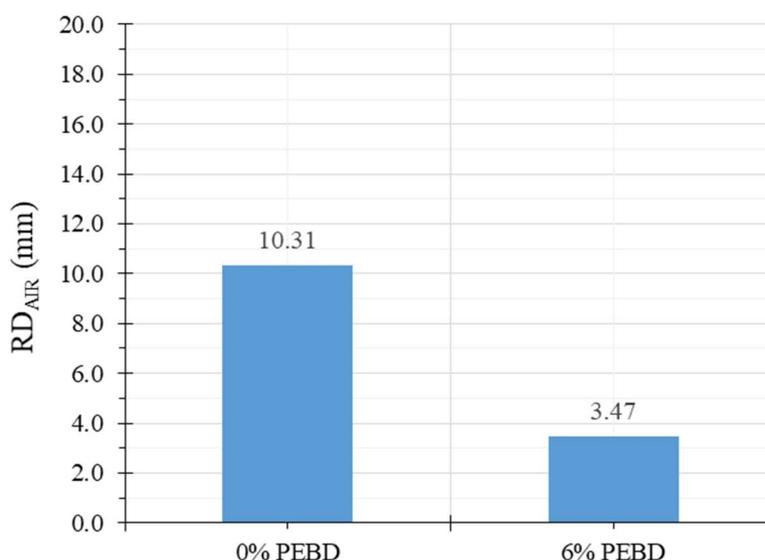


Figura 2.7 - Profundidade de rodeira de mistura betuminosa com 0% PEBD e 6% PEBD
(Fonseca *et al.*, 2018)

Costa *et al.* (2017) incorporaram Polietileno Reticulado (PEX), como substituto de agregado (5% da massa de agregado), proveniente de tubos e cabos elétricos numa mistura betuminosa utilizada em camadas de superfície, comparando-a com uma mistura semelhante sem adição de PEX e várias outras misturas com a mesma composição e adição de PEX na qual a quantidade de betume variava. A utilização do resíduo plástico permitiu obter resultados durante o ensaio “*wheel-tracking*” claramente superiores, mesmo para misturas com mais quantidade de betume. No ciclo 10000 do ensaio, a mistura de referência apresentou uma profundidade de rodeira de cerca de 10 mm enquanto que as misturas modificadas deformaram em média 2 mm. Os

resultados apoiam-se na maior rigidez apresentada pelas misturas com PEX, propriedade também avaliada pelos autores.

Sintetizando, a adição de resíduos plásticos reciclados, independentemente da via, aprimora certas características das misturas betuminosas, que, juntamente com a faceta sustentável e económica, levam a que seja uma boa alternativa para implementação em pavimentação. O efeito de aumento da resistência à deformação permanente permite que a inserção destes materiais em misturas betuminosas possibilite a construção de pavimentos cuja durabilidade seja mais elevada.

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

Este capítulo trata de descrever o trabalho laboratorial realizado durante a execução da presente dissertação. O processo foi efetuado em dois laboratórios: O Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra e o Laboratório de Pavimentos do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

O trabalho desenvolvido encontra-se no seguimento de estudos efetuados por duas autoras: Fonseca (2018) e Bandeira (2019). Na Figura 3.1 ilustra-se um diagrama esquemático do trabalho realizado. Foram fabricadas duas misturas betuminosas do tipo AC 14 surf 35/50, utilizadas em camadas de desgaste, uma com 0% de PEBD (Polietileno de Baixa Densidade), de modo a ser utilizada como referência e outra com 6% de PEBD. As misturas foram compactadas por compactação de rolos e compactação giratória. Dentro da compactação giratória procedeu-se à variação de alguns parâmetros, nomeadamente a energia de compactação induzida e a altura dos provetes produzidos.

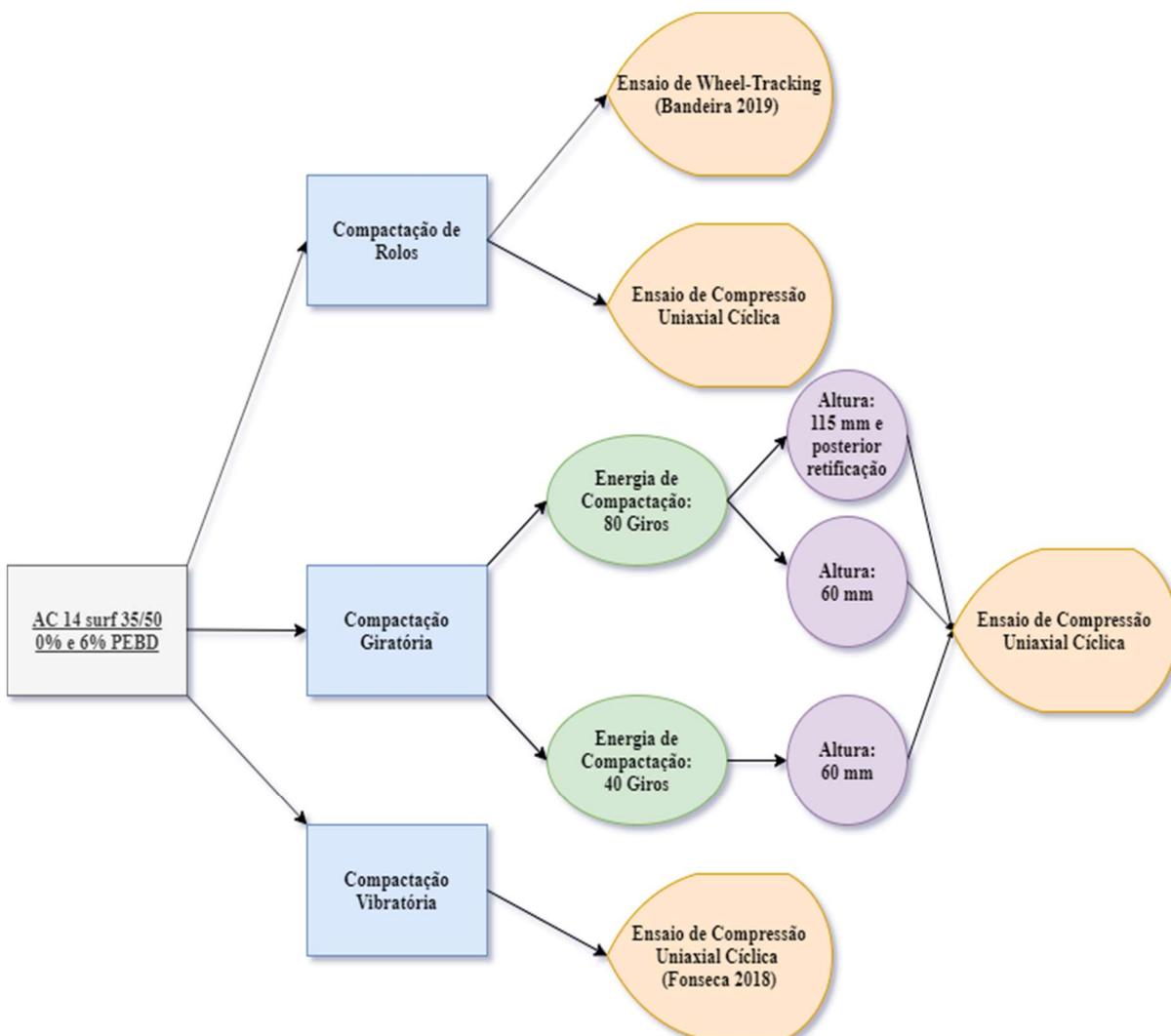


Figura 3.1 - Gráfico esquemático do trabalho desenvolvido na presente dissertação

Posteriormente foram analisadas as propriedades volumétricas consideradas relevantes para o presente estudo (baridade e porosidade). Seguidamente procedeu-se à caracterização da resistência à deformação permanente através do ensaio de compressão uniaxial cíclico. Há que

referir que certos provetes produzidos sofreram correção das suas alturas de modo a poderem ser caracterizados através do ensaio mencionado.

Os métodos aplicados foram escolhidos de modo a comparar os resultados obtidos com os dos autores anteriores, com o intuito de avaliar as diferenças de comportamento das misturas através de compactação e equipamentos de ensaios distintos.

O capítulo é dividido em quatro secções. Numa primeira fase são detalhados e caracterizados os materiais utilizados no trabalho experimental. Em seguida, são explicados os procedimentos de fabrico das amostras produzidas, desde a produção das misturas betuminosas à sua compactação. Posteriormente, são apresentadas diversas propriedades volumétricas das amostras obtidas que incluem as suas dimensões, baridades e porosidade. Subsequentemente é descrito o procedimento de ensaio de compressão uniaxial cíclico efetuado e apresentados e analisados os resultados obtidos. Alguns dos parâmetros obtidos foram ainda alvo de uma análise estatística de modo a enriquecer a interpretação dos resultados.

3.1 Caracterização de Materiais

3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados foram extraídos de uma pedreira localizada em Pombal. Estes foram fornecidos pela empresa “Contec – Construção e Engenharia, S.A.”. Os tipos de agregados utilizados nas misturas betuminosas são designados consoante a sua granulometria e tipo de pedra, consistindo de Filler, Pó 0/4, Gnaisse 4/12 e Gnaisse 8/20. A sua proporção na mistura estudada é de 3,0%, 45,6%, 36,4 e 15,0% respetivamente.

A análise granulométrica dos agregados foi efetuada por Fonseca (2018). Deste modo, a autora definiu a percentagem de agregados da mistura a utilizar no fabrico da mistura. Os valores dessas percentagens devem respeitar os limites impostos para fusos granulométricos de misturas betuminosas a utilizar em camadas de desgaste, definidos no documento “Caderno de Encargos Tipo Obra: Pavimentação – Métodos Construtivos” (EP, 2014) das Estradas de Portugal (atualmente Infraestruturas de Portugal). No Quadro 3.1 são ilustradas as percentagens de material passado referentes à mistura estudada, confirmando que esta se encontra nos limites estabelecidos pelo documento referido anteriormente. Posteriormente, na Figura 3.2 encontra-se representado o fuso granulométrico da mistura, bem como os limites impostos.

Quadro 3.1 - Fuso granulométrico da mistura e limites impostos pelo Caderno de Encargos (EP, 2014)

AC 14 surf (BB)	%	Abertura dos Peneiros (mm)							
		20	14	10	4	2	0,5	0,125	0,063
Gnaisse 8/20	15,0%	100,0%	66,9%	5,9%	0,8%	0,5%	0,3%	0,1%	0,0%
Gnaisse 4/12	36,4%	100,0%	98,6%	61,0%	1,0%	1,0%	0,2%	0,1%	0,1%
Pó 0/4	45,6%	100,0%	100,0%	100,0%	95,0%	60,0%	22,5%	12,0%	9,0%
Filler	3,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	98,0%	82,0%
Curva Final	100%	100,0%	94,5%	71,7%	46,8%	30,8%	13,4%	8,5%	6,6%
Caderno de Encargos	Mín.	100,0%	90,0%	67,0%	40,0%	25,0%	11,0%	6,0%	5,0%
	Máx.	100,0%	100,0%	77,0%	52,0%	40,0%	19,0%	10,0%	8,0%

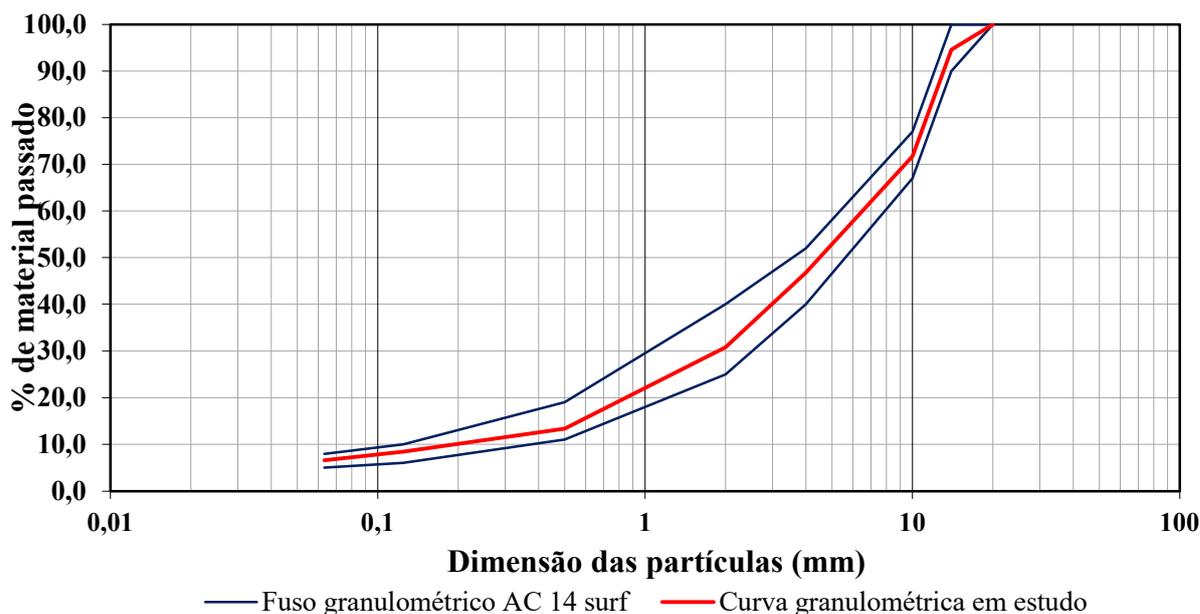


Figura 3.2 - Fuso granulométrico da mistura AC 14 surf

3.1.2 Betume

O ligante utilizado nas misturas betuminosas produzidas consiste de um betume do tipo 35/50, fornecido pela empresa “Cepsa”. Devido às condições climáticas existentes em Portugal, as categorias de betumes mais utilizadas são de 35/50 e 50/70 (Baptista, 2006).

Em relação à percentagem de betume inserida nas misturas betuminosas, esta foi definida como 5% da massa total da mistura, de um modo semelhante a Fonseca (2018) e Bandeira (2019).

De modo a efetuar uma caracterização do betume mencionado, Bandeira (2019) procedeu ao ensaio de penetração a 25°C (EN 1426 (CEN, 2007e)) e ao ensaio de amolecimento pelo método do anel e bola (EN 1427 (CEN, 2007f)).

Os ensaios referidos permitem verificar a classe do ligante. O primeiro consiste na determinação da rigidez do betume, de forma indireta, através da verificação da profundidade de penetração de uma agulha numa amostra de ligante que se encontra a 25°C. Segundo a norma EN 1426 são efetuadas cinco medidas em cada tentativa do processo. No Quadro 3.2 são apresentados os resultados obtidos pela autora. O segundo ensaio permite determinar a temperatura máxima à qual o ligante consegue suportar deformações significativas e é realizado segundo a norma EN 1427. Os resultados referentes a este ensaio são apresentados no Quadro 3.3.

A norma EN 12591 (CEN, 2009) especifica as características de betumes utilizados na pavimentação. Analisando os resultados dos dois ensaios efetuados, foi possível comparar os valores obtidos com os limites definidos para as propriedades estudadas (Quadro 3.4), confirmando a classe de betume como sendo 35/50, tal como estabelecido pelo fornecedor.

Quadro 3.2 - Resultados do ensaio de penetração a 25°C (Bandeira, 2019)

Medição	Tentativa 1 (0,1 x mm)	Tentativa 2 (0,1x mm)
1	39	37
2	36	36
3	37	34
4	36	35
5	35	32
Média	37	35

Quadro 3.3 - Resultados do ensaio de temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola (Bandeira, 2019)

Temperatura de Amolecimento		
Tentativa 1 (°C)	Tentativa 2 (°C)	Média (°C)
52	53	53

Quadro 3.4 -Especificações para betumes de pavimentação com penetrações entre 20x0,1 mm e 330x0,1 mm (Adaptado de CEN (2009))

Propriedade	Unidade	Método de Ensaio	Tipos de Betume				
			20/30	30/45	35/50	40/60	(...)
Penetração a 25°C	x 0,1 mm	EN 1426	20-30	30-45	35-50	40-60	(...)
Temperatura de Amolecimento	°C	EN 1427	55-63	52-60	50-58	48-56	(...)

3.1.3 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)

O PEBD é um polímero termoplástico que funde quando submetido a temperaturas elevadas. O seu ponto de fusão encontra-se entre os 110 e os 115°C. Este material é constituído por cadeias de polímeros e caracteriza-se por ter uma densidade entre 0,910 e 0,930 g/cm³ (Barbosa *et al.*, 2017).

O material reciclado, utilizado como aditivo na mistura betuminosa estudada (Figura 3.3) foi fornecido pela empresa “Ambiente”, com sede em Leiria, e consiste de fragmentos de plástico do tipo PEBD que sofreram um tratamento de resíduos sólidos urbanos, após um processo de recolha diferenciado.

A percentagem de PEBD aditivada à mistura estudada foi de 6% da massa de betume total. O valor foi estimado após estudos efetuados por Fonseca (2018). A autora testou cinco percentagens diferentes de PEBD (0%, 2%, 4%, 6% e 8% face à massa total de betume) incorporados numa mistura betuminosa AC 14 surf 35/50. A utilização de fragmentos de plástico em detrimento do uso de grãos de plástico (“*pellets*”) foi estipulada por ser uma solução mais simples no processo de reciclagem, bem como mais económica. Fonseca (2018) produziu provetes cilíndricos compactados pelo compactador de impacto (Marshall) e caracterizou-os face a propriedades volumétricas e parâmetros calculados no ensaio de compressão de Marshall. Os valores ótimos para a estabilidade, deformação e quociente de Marshall surgiram para a

percentagem de 6% de PEBD face à massa total de betume. Deste modo, esse valor foi determinado como o ótimo para o seguimento da sua investigação e para o estudo desenvolvido na presente dissertação.



Figura 3.3 - Resíduos de PEBD reciclado utilizados na mistura

3.2 Fabrico dos Provetes

3.2.1 Produção das misturas betuminosas

A produção das misturas betuminosas fabricadas em laboratório seguiram os procedimentos descritos na norma EN 12697-35 (CEN, 2007). Foram preparadas duas misturas betuminosas distintas: uma mistura de referência, sem qualquer adição de material plástico reciclado, e outra com a incorporação de 6% de PEBD reciclado, face à massa total de betume.

De modo a preparar os agregados procedeu-se à sua secagem a 110°C, previamente à sua pesagem, de modo a evitar erros de medição em virtude da possível presença de humidade no material. Posteriormente, os agregados secos foram pesados nas proporções definidas e inseridos numa estufa, durante cerca de oito horas, à temperatura de 180°C.

O betume foi pesado na proporção definida e colocado numa estufa à temperatura de 165°C durante três horas, tal como estabelecido na norma referida. Em relação aos resíduos plásticos, para a mistura aditivada, estes foram pesados e adicionados diretamente durante o processo de mistura, ou seja, pelo método seco.

As misturas foram efetuadas com o auxílio de uma misturadora automática. A temperatura alvo das misturas foi de 165°C, tal como é definido na norma mencionada para um betume do tipo 35/50. Consequentemente, o recipiente onde se inseriram os materiais da mistura, bem como o gancho da misturadora foram igualmente inseridos na estufa à temperatura de 165°C, juntamente com os restantes materiais. O processo de mistura durou cerca de 4 minutos para a mistura de referência e cerca de 5 minutos para a mistura aditivada (CEN, 2007).

3.2.2 Compactação de rolos

Foram produzidas duas lajes distintas, uma com a mistura de referência e a outra com mistura aditivada com os resíduos plásticos reciclados. As dimensões pretendidas para cada laje foram

de 560x505x80 mm, o que correspondeu a uma massa de 55,2 kg. As misturas foram produzidas de modo a que, após compactadas, alcançassem uma baridade alvo de 2440 kg/m³.

Preparou-se um molde com as dimensões referidas, no qual se inseriu e distribuiu homogeneamente a mistura produzida à temperatura de compactação alvo (165°C). Posteriormente procedeu-se à sua compactação. Esta foi realizada com um compactador cilíndrico de rasto liso e todo o processo desenvolveu-se de acordo com a norma EN 12697-33 (CEN, 2007c). O equipamento foi operado manualmente de modo a que o cilindro compactasse a mistura num movimento longitudinal cíclico. Este processo teve uma duração de cerca de 5 minutos, ao fim dos quais a laje apresentou um aspeto desempenado e homogéneo.

Numa fase seguinte, procedeu-se à extração de provetes cilíndricos das lajes produzidas. Para tal utilizou-se uma caroteadora cuja broca apresentava um diâmetro de 150 mm. Por cada laje fabricada foi possível extrair nove provetes cilíndricos. Numa fase final, os provetes sofreram o corte, por serragem, da sua face superior e inferior e retificados na empresa “Almeida e Ferreira Lda.” sedada em Santa Luzia, de modo a que as suas alturas finais fossem de cerca de 60 mm. Na Figura 3.4 é ilustrado o processo de compactação e de extração por caroteamento.



Figura 3.4 - Produção de laje por compactação de rolos: a) Processo de compactação de rolos; b) Processo de extração por caroteamento

3.2.3 Compactação giratória

O compactador giratório utilizado consistiu de um equipamento de modelo SGC (SUPERPAVE Gyrotory Compactor) disponível no Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. A compactação produzida por este método resulta da atuação simultânea de uma força axial de compressão estática e uma tensão de corte consequente do movimento de rotação imposto ao molde, cuja inclinação é definida por um determinado ângulo. O molde sujeito ao movimento de giração descreve uma superfície cónica, como se ilustra na Figura 3.5 (CEN, 2004).

O equipamento permite a variação de diversos parâmetros que alteram a compactação da mistura betuminosa: o ângulo de inclinação e a força axial aplicada, já mencionados, bem como

a velocidade de rotação e o número de giros. Os valores aplicáveis a estes parâmetros, bem como a normalização de todo o processo de compactação giratória encontram-se descritos no documento EN 12697-31 (CEN, 2004). No caso da presente dissertação os valores definidos encontram-se de acordo com a norma referida e são expressos no Quadro 3.5.

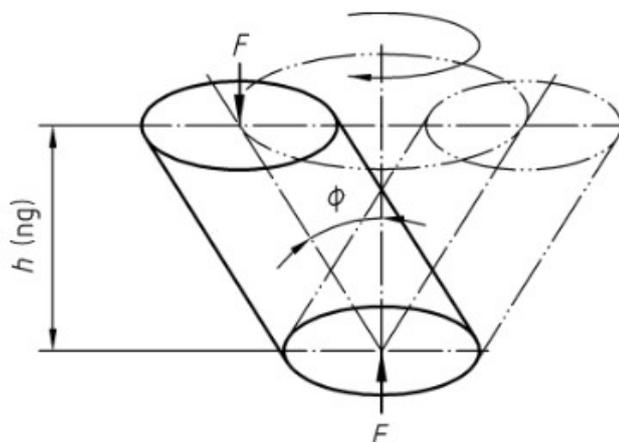


Figura 3.5 - Movimento giratório do compactador SGC (CEN, 2004)

Quadro 3.5 - Parâmetros do compactador giratório SGC

Ângulo de Inclinação (°)	Tensão Vertical (kPa)	Velocidade de Rotação (rpm)
1,25	600	30

Numa fase inicial procedeu-se à calibração da altura do equipamento. Este procedimento é executado com relativa facilidade e permite que o programa do SGC efetue leituras corretas da altura da mistura betuminosa inserida no molde do compactador, durante o processo de compactação. Para esta fase, utilizou-se um pequeno objeto metálico.

A calibração do ângulo interno do equipamento é um passo importante para a utilização do compactador SGC. No entanto, este já se encontrava calibrado (Gomes, 2018), e, portanto, este passo não foi efetuado. Em relação à pressão, velocidade de rotação e número de giros, não necessitam de calibração, pois os respetivos valores são inseridos diretamente no programa.

O molde utilizado na compactação giratória apresentou um diâmetro de 150 mm. Previamente à compactação, este foi colocado na estufa à temperatura alvo (165°C) durante cerca de três horas, de modo a que se reduzisse ao máximo as perdas de temperatura da mistura betuminosa a compactar. Com a mistura e o molde à temperatura requerida, procedeu-se ao início do processo. No fundo do molde inseriu-se um disco metálico e um papel de filtro com formato circular e diâmetro de dimensão igual ao do molde. Posteriormente, depositou-se cuidadosamente a mistura betuminosa dentro do molde e colocou-se novamente um papel de filtro e um disco metálico sobre o material. Com os parâmetros requeridos já calibrados e inseridos no programa, colocou-se o molde com a mistura na câmara do equipamento e iniciou-se a compactação. No final retirou-se o provete compactado do molde, removeram-se os papéis de filtro e o provete foi colocado a arrefecer à temperatura ambiente.

No total foram compactadas três conjuntos distintas de provetes. Cada conjunto consistiu de 12 provetes, seis compostos pela mistura de referência e seis compostos pela mistura aditivada com resíduos reciclados de PEBD. O primeiro constou de provetes com altura aproximada de 115 mm, compactados por 80 giros do equipamento. O segundo conjunto foi compactado pelo mesmo número giros, 80, no entanto a altura dos provetes foi reduzida para cerca de 60 mm. Na transição do primeiro para o segundo conjunto de provetes, foram adicionados espaçadores no fundo do molde e foi efetuada nova calibração de alturas do equipamento. O terceiro conjunto de provetes manteve a altura de 60 mm mas o número de giros foi reduzido para 40. Na Figura 3.6 ilustra-se o molde do compactador giratório, bem como os espaçadores utilizados na compactação dos últimos dois conjuntos de provetes.



Figura 3.6 - a) Molde do compactador giratório; b) Espaçadores utilizados no processo

As misturas betuminosas foram compactadas com o objetivo de alcançar uma baridade de 2440 kg/m³, de um modo semelhante às lajes produzidas pelo compactador de rolos. Deste modo, a massa de mistura compactada variou consoante a altura pretendida. A variação da altura dos provetes compactados foi efetuada de modo a verificar a influência da distribuição do volume de vazios na baridade dos provetes compactados por compactação giratória, mencionada por vários autores na literatura (Walubita *et al.*, 2012). Os provetes do primeiro conjunto foram, numa seguinte fase, cortados na face superior e inferior e retificados na/pela empresa “Almeida e Ferreira Lda.”, de modo a apresentarem alturas finais de 60 mm, para poderem ser ensaiados à deformação permanente. A diminuição para 40 giros no último conjunto de provetes foi, de modo semelhante, efetuada com o intuito de avaliar a variação da porosidade, e, conseqüentemente, da baridade dos provetes. O número de giros foi reduzido para o valor mencionado devido à baridade obtida nos provetes produzidos com 80 giros ter sido, por norma, superior à baridade alvo (2440 kg/m³).

3.3 Propriedades dos Provetes

De modo a facilitar a identificação de cada provete, estes foram designados com a utilização da letra “R” para os compostos pela mistura betuminosa de referência e a letra “P” para os compostos pela mistura betuminosa com resíduos plásticos. Desta forma, os provetes produzidos consistem dos seguintes:

- R1.1 a R1.9 e P1.1 a P1.9 – Provetes compactados pelo compactador de rolos (CR), posteriormente cortados e retificados a uma altura de cerca de 60 mm;
- R2.1 a R2.6 e P2.1 a P2.6 – Provetes compactados pelo compactador giratório (CG), com 80 giros e com uma altura de 115 mm, posteriormente cortados e retificados a uma altura de cerca de 60 mm;
- R3.1 a R3.6 e P3.1 a P3.6 – Provetes compactados pelo compactador giratório, com 80 giros e com uma altura de cerca de 60 mm;
- R4.1 a R4.6 e P4.1 a P4.6 – Provetes compactados pelo compactador giratório, com 40 giros e com uma altura de cerca de 60 mm.

3.3.1 Dimensões dos provetes

Todos os provetes produzidos apresentaram uma forma cilíndrica. De modo a medir as suas dimensões, seguiu-se a o processo descrito na norma EN 12697-29 (CEN, 2002). O utensílio de medição utilizado foi um pequeno paquímetro. Por cada provete obtiveram-se quatro medições da sua altura, em quatro pontos distintos, e seis medições do seu diâmetro. A altura do provete correspondeu à média das quatro medições, e, o diâmetro à média das seis medições efetuadas (CEN, 2002). Os valores das dimensões de cada provete encontram-se apresentadas no Anexo A.

3.3.2 Baridade geométrica e baridade SSD

A norma EN 12697-6 (CEN, 2007h) enumera e define os procedimentos de cálculo das baridades aparentes para misturas betuminosas. A baridade consiste na densidade ou massa por unidade de volume (incluindo o volume de vazios), a uma determinada temperatura, presente numa amostra.

As baridades calculadas foram a baridade geométrica (3.1) e a baridade SSD, “*Saturated Surface Dry*” (3.2). Estas correspondem, respetivamente, ao procedimento D e ao procedimento B descritos no referido documento. A norma aconselha o primeiro procedimento para qualquer tipo de provete produzido em laboratório e o segundo para materiais do tipo AC (“*Asphalt Concrete*”), como é o caso.

Baridade Geométrica (para provetes cilíndricos):

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad (3.1)$$

$\rho_{b,dim}$ – Massa volúmica geométrica do provete (kg/m³);

m_1 – Massa do provete seco (g);

h – Altura do provete (mm);

d – Diâmetro do provete (mm).

Neste caso, os valores de altura e diâmetro mencionados correspondem à altura média e diâmetro médio do provete, valores que foram recolhidos como descrito na secção anterior. O processo foi simples, após a medição das dimensões do provete seguiu-se a medição do peso da amostra, seca, utilizando uma balança própria para o efeito.

Baridade SSD:

$$\rho_{b,ssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (3.2)$$

$\rho_{b,ssd}$ – Massa volúmica SSD do provete (kg/m^3);

m_1 – Massa do provete seco (g);

m_2 – Massa do provete imerso em água (g);

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

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura do ensaio (kg/m^3).

O procedimento de cálculo da baridade SSD é efetuado através da medição de três massas distintas. Inicialmente mede-se a massa do provete seco. Posteriormente, é aferida a sua massa quando submerso em água. A temperatura da água é verificada com um termómetro, de modo a poder calcular a massa volúmica da mesma, com recurso à tabela disponível na norma EN 12697-6 (CEN, 2007h). Finalmente, a superfície da amostra é seca e pesada, possibilitando obter uma leitura da quantidade de água retida pelo provete.

Foi efetuada uma análise da variação da baridade SSD dos provetes que sofreram a remoção da face inferior e superior e posterior retificação. Estes são compostos pelos provetes do conjunto R1 e P1, produzidos por compactador de rolos, com alturas a rondar os 80 mm, e pelos provetes do conjunto R2 e P2, produzidos por 80 giros no compactador giratório e com alturas de cerca de 115 mm. Após retificação todos apresentaram alturas próximas de 60 mm, altura definida para a realização do ensaio de compressão uniaxial cíclica. Portanto, no caso dos primeiros, foi removido uma maior quantidade de material da face superior e inferior. Na Figura 3.7, ilustra-se a variação dos valores médios de cada conjunto de provetes.

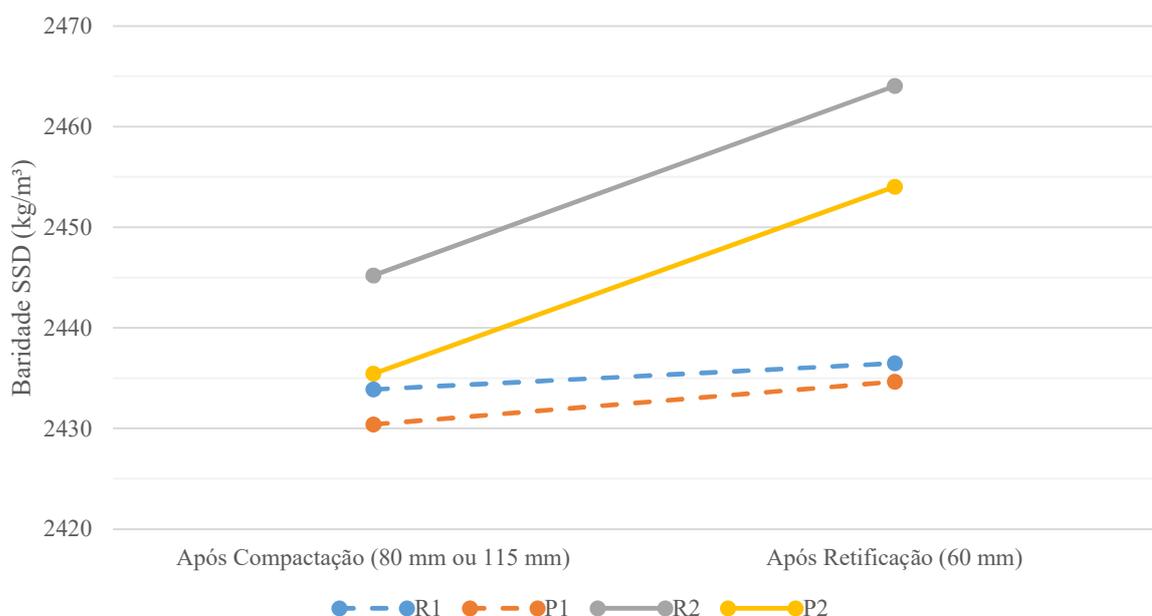


Figura 3.7 - Variação média da baridade SSD dos conjuntos de provetes retificados

No Anexo A encontram-se apresentados os valores de variação da baridade SSD para cada provete que sofreu retificação.

É possível verificar que os provetes produzidos pelo compactador giratório (R2 e P2) sofreram um maior aumento da sua baridade, comparativamente aos compactados por compactador de rolos (R1 e P1). Tanto os compostos pela mistura de referência como os compostos pela mistura aditivada sofreram um aumento de cerca de 0,76% da sua baridade original. Em relação aos provetes produzidos por compactação de rolos, o aumento da sua densidade foi menor, sendo que os compostos pela mistura de plástico sofreram um maior incremento (na ordem dos 0,18%) comparativamente aos compostos pela mistura de referência (na ordem dos 0,11%).

Posteriormente, foram também analisados e comparados os valores de baridade média dos conjuntos de provetes. Neste cálculo integrou-se o valor de baridade dos provetes já retificados. Na Figura 3.8 ilustra-se um gráfico que compara as densidades dos vários conjuntos de provetes produzidos. São também representados os valores médios obtidos nos trabalhos realizados por Fonseca (2018) e Bandeira (2019). Os valores das baridades individuais de cada provete produzido são ilustrados no Anexo A.

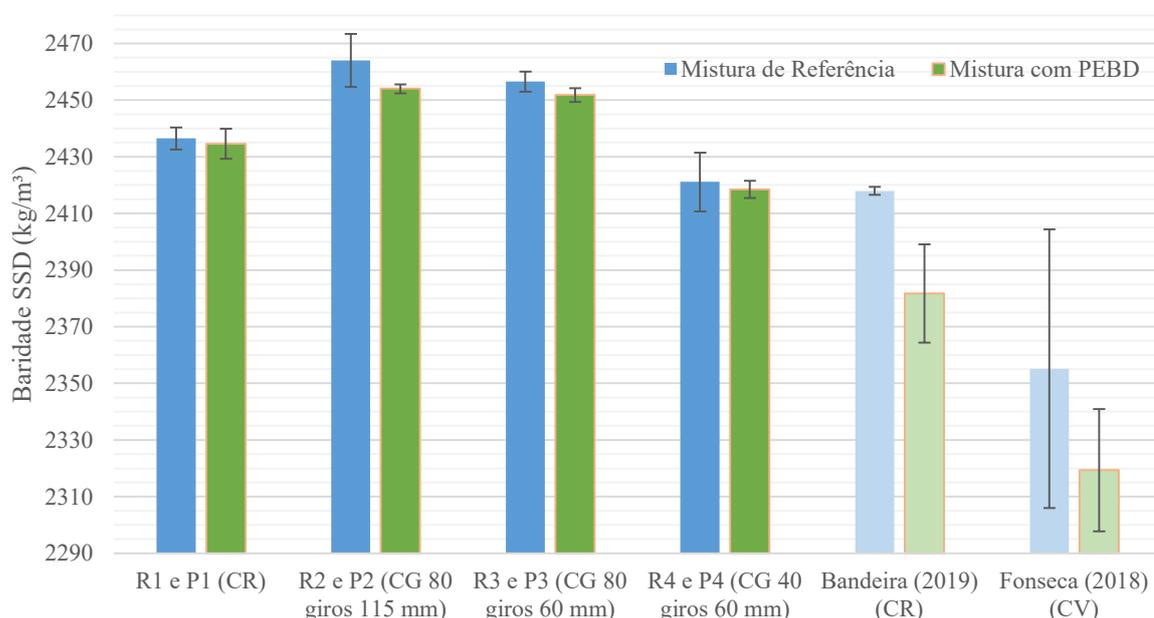


Figura 3.8 - Comparação da baridade SSD média do conjunto de provetes produzidos

Numa primeira análise é possível identificar que os provetes compostos pela mistura com PEBD apresentam, por norma, uma baridade inferior aos provetes compostos pela mistura de referência. Isto pode dever-se à substituição de massa de betume por resíduos plásticos, que apresentam um peso volúmico inferior ao ligante em questão. Relativamente às amostras produzidas por outros autores, estes apresentam valores de densidade inferiores aos produzidos no presente trabalho. Fonseca (2018) utilizou a compactação vibratória (CV), que levou aos resultados mais reduzidos de baridade, possivelmente devido à menor energia induzida por esse método. Bandeira (2019), produziu lajes por compactação de rolos, sem proceder à extração de provetes cilíndricos, o que pode explicar o valor mais reduzido de densidade relativamente ao conjunto de provetes R1 e P1.

Os valores de baridade mais elevados ocorrem para o conjunto de provetes R2 e P2, compactados com 80 giros e posteriormente retificados. Estes valores são superiores aos do conjunto R3 e P3, que não sofreram retificação das suas alturas, enaltecendo a validade da hipótese de que os volumes de vazios para amostras produzidas pelo compactador giratório se encontrem, em maior proporção, nas zonas inferiores e superiores do provete. A baridade dos

provetes R2 apresentou valores médios superiores em cerca de 0,30% dos da baridade média dos provetes R3, o que corresponde a 8 kg/m³. O acréscimo da baridade dos provetes P2 em relação à baridade dos provetes P3 foi inferior, na ordem dos 0,09%, o que corresponde a 3 kg/m³.

Como esperado, o conjunto de provetes R4 e P4, compactados com 40 giros, apresentaram a menor baridade das amostras produzidas para o presente estudo, devido à menor energia induzida. Em relação aos provetes R1 e P1, ainda que a baridade objetivo de compactação tenha sido de 2440 kg/m³, o valor médio para estes conjuntos ficou um pouco abaixo desse valor. Isto pode dever-se à menor energia de compactação induzida por este método, comparativamente ao compactador giratório.

Complementarmente foi realizada uma análise estatística dos resultados das baridades médias recorrendo ao software “*MatLab*”. Foi efetuada uma análise de variância de um fator (ANOVA) que possibilita a comparação da distribuição de vários grupos de amostras independentes. Avaliou-se a significância dos resultados, através da análise do “*p-value*”. Se o valor de “*p-value*” for inferior a 5%, os valores são significativos na amostra, podendo inferir-se que o tipo de compactação afeta significativamente os resultados de baridade SSD obtidos. É importante referir que para este estudo não foram inseridos os resultados obtidos por Bandeira (2019) por falta de outros parâmetros comparativos.

Inferiu-se que, para as misturas de referência, o conjunto de provetes compactado por compactação vibratória (Fonseca, 2018) é estatisticamente diferente de todos os restantes. Adicionalmente, verificou-se o mesmo entre o conjunto R2 (compactado por 80 giros no SGC com 115 mm e posteriormente retificado para 60 mm) e o conjunto R4 (compactado por 40 giros no SGC com altura de 60 mm). Relativamente à mistura aditivada, verificou-se novamente que as amostras compactadas por compactação vibratória são estatisticamente diferentes das restantes. Foi possível concluir ainda, diferenças estatísticas entre alguns dos outros conjuntos analisados (P1 e P2, P1 e P3, P2 e P4, P2 e P5, P3 e P4). Os valores obtidos na análise mencionada encontram-se representados no Anexo B.

3.3.3 Baridade teórica máxima e porosidade

A baridade teórica máxima da mistura betuminosa (ρ_m) consiste em considerar que a mistura não apresenta quaisquer vazios entre as suas partículas, traduzindo, portanto, um valor de massa por unidade de volume cujo valor é máximo para as proporções de materiais usados (Branco *et al.*, 2016). Este parâmetro permite o cálculo de várias outras propriedades volumétricas da mistura estudada, como é o caso da porosidade.

Os procedimentos de determinação da baridade máxima teórica são normalizados pelo documento EN 12697-5 (CEN, 2007i). A norma descreve três metodologias para a determinação desta propriedade: processo volumétrico, processo hidrostático e processo matemático. Para as duas misturas em estudo nesta dissertação os valores deste parâmetro já se encontravam calculados, através do processo volumétrico. O Quadro 3.6 apresenta os valores mencionados.

Quadro 3.6 - Valores da baridade máxima teórica, ρ_m , para as misturas em estudo

Mistura de Referência	Mistura com 6% PEBD
2479,0 kg/m ³	2480,5 kg/m ³

A porosidade reflete a percentagem de vazios de ar presentes na mistura betuminosa. A norma EN 12697-8 (CEN, 2003) indica procedimentos de cálculo de propriedades volumétricas das misturas, incluindo do parâmetro referido:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (3.3)$$

V_m – Porosidade da mistura betuminosa (%);

ρ_m – Baridade máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m³);

ρ_b – Baridade do provete (kg/m³).

De forma análoga à verificação da variação da baridade para os provetes, procedeu-se à mesma análise para a porosidade das misturas. Na Figura 3.9 ilustra-se essa variação, para os valores médios dos conjuntos de provetes.

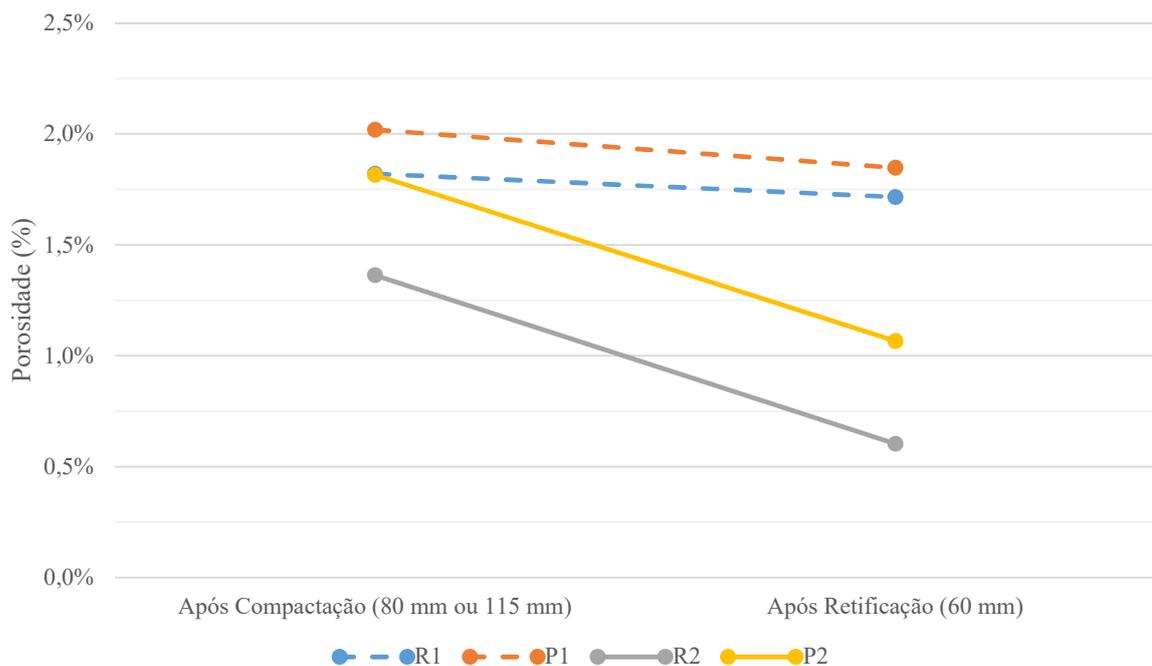


Figura 3.9 - Variação média da porosidade dos conjuntos de provetes retificados

Em conformidade com o verificado para a variação de baridade, é possível concluir que a maior variação no parâmetro da porosidade ocorreu para o conjunto de provetes R2 e P2, produzidos no compactador giratório. A porosidade diminuiu para menos de metade no caso da mistura de referência, (de 1,36% para 0,60%) e no caso da mistura com PEBD também sofreu um decréscimo substancial (de 1,82% para 1,07%). No caso do conjunto de provetes R1 e P1, verificou-se uma diminuição da porosidade das amostras, ainda que não tão drástica. Diminuiu, em média de 1,82% para 1,72% nos provetes compostos pela mistura de referência, e, de 2,02% para 1,85% nos provetes compostos pela mistura com PEBD.

Para a análise e comparação dos valores de porosidade média de cada conjunto de provetes foram utilizados os valores de porosidade dos provetes após a sua retificação. Na Figura 3.10 ilustra-se um gráfico que permite comparar este parâmetro entre cada conjunto de amostras produzidas, incluindo as produzidas por Fonseca (2018) e Bandeira (2019). Os valores porosidades individuais encontram-se representados no Anexo A.

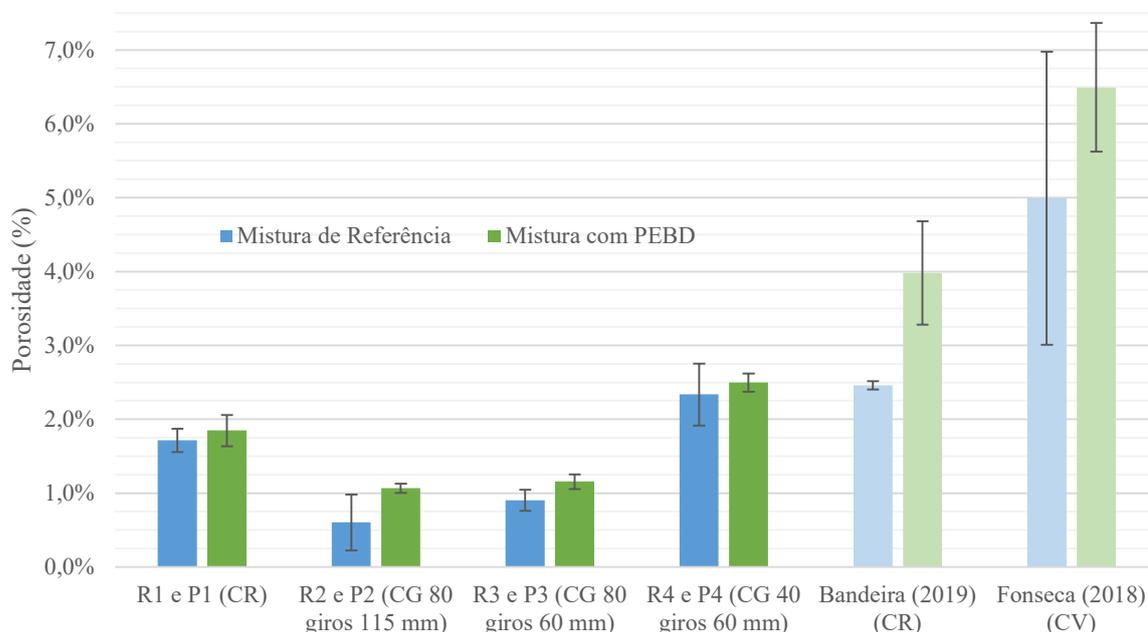


Figura 3.10 - Comparação da porosidade média do conjunto de provetes produzidos

A porosidade média de cada conjunto de amostras encontra-se em concordância com a baridade SSD média, fruto da sua relação intrínseca. Deste modo, os conjuntos de provetes produzidos por Fonseca (2018) e Bandeira (2019), que apresentavam o menor valor de baridade, apresentam o maior valor de porosidade. No espectro contrário, os conjuntos R2 e P2 apresentam o valor mais baixo de porosidade, como expectável. Naturalmente, um valor mais baixo da densidade de uma amostra indica que esta apresenta um maior número de vazios na sua constituição.

3.3.4 Curvas de compactação do compactador giratório

Durante a compactação efetuada pelo SGC, o software do equipamento realiza a leitura das alturas mediante o número de giros praticados. Certos estudos afirmam existir uma relação entre a energia empregue no compactador giratório e o número de passagens de um compactador cilíndrico em obra. Deste modo, a análise das curvas de compactação são um instrumento importante na definição de parâmetros de avaliação da compactabilidade das misturas (Gardete, 2016; Gomes, 2018).

Segundo a norma EN 12697-10 (CEN, 2001), a variação da porosidade de uma amostra compactada pelo SGC desenvolve-se em função da energia de compactação, como descrito na equação (3.4).

$$v(ng) = v(1) - (K \times \ln(ng)) \quad (3.4)$$

ng – Número de giros do compactador giratório;

$v(ng)$ – Porosidade para um número de giros, ng (%);

$v(1)$ – Porosidade da amostra após 1 giro (%);

K – Constante que representa a compactabilidade da amostra.

De modo a calcular os parâmetros descritos pela norma mencionada, foi necessário, inicialmente fazer um tratamento dos dados retirados do software do SGC. Como os valores das baridades calculadas pelo equipamento (em função da altura do provete) diferem, ainda que não substancialmente, dos valores medidos sobre o provete após a sua extração, a compactação relativa, em percentagem de baridade teórica máxima, para cada giro foi determinada usando a equação (3.5).

$$\%G_{mm,ng} = \frac{G_a \times h_m}{G_r \times h_{ng}} \times 100 \quad (3.5)$$

$\%G_{mm,ng}$ – Compactação relativa, em percentagem de baridade teórica máxima, no giro ng (%);

G_a – Baridade da espécie extraída, corresponde à baridade SSD (kg/m^3);

G_r – Baridade máxima teórica (kg/m^3);

h_m – Altura medida do provete (mm);

h_{ng} – Altura do provete medida pelo equipamento (mm).

O valor da porosidade correspondente a um determinado número de giros de compactação é posteriormente calculado como expresso na equação (3.6).

$$v(ng) = 100 - \%G_{mm,ng} \quad (3.6)$$

$v(ng)$ – Porosidade para um número de giros, ng (%);

$\%G_{mm,ng}$ – Compactação relativa, em percentagem de baridade teórica máxima, no giro ng (%).

Com o cálculo destes parâmetros é possível representar graficamente a evolução da porosidade da amostra em função do número de giros a que é sujeita. Efetuando uma regressão linear dos resultados, com uma boa aproximação, de ordem logarítmica, é possível extrair os valores de K e $v(1)$ (CEN, 2001). Na Figura 3.11 ilustram-se as curvas médias da evolução da porosidade, referentes aos conjuntos de provetes R2 e P2. As curvas médias referentes aos conjuntos de provetes R3, P3, R4 e P4 podem ser consultadas no Anexo A.

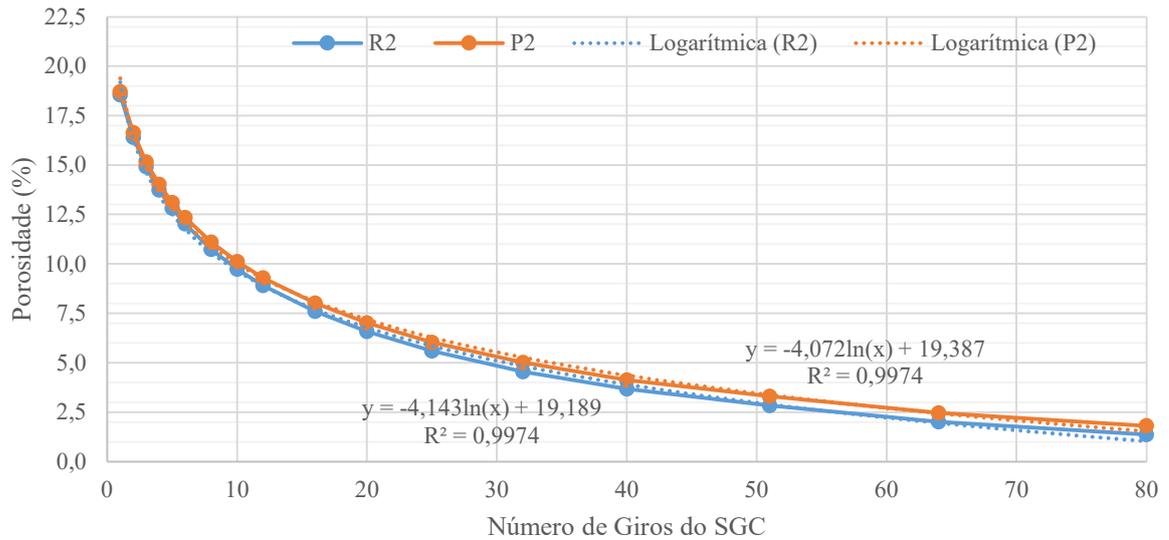


Figura 3.11 – Variação da porosidade em função do número de giros do SGC (R2 e P2)

Os parâmetros referentes à regressão linear efetuada para os conjuntos de provetes analisados podem ser consultados no Anexo A. Na Figura 3.12 representam-se os parâmetros K e $v(1)$ em forma de gráfico, de modo a facilitar a sua compreensão e análise.

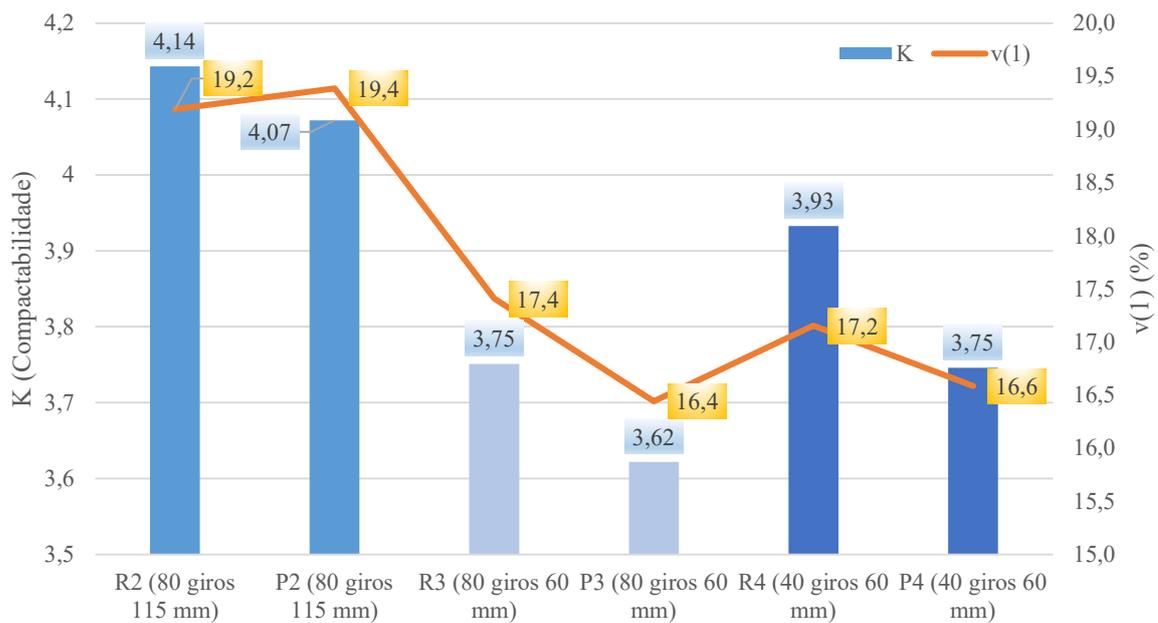


Figura 3.12 – Valores médios de K e $v(1)$ para os provetes produzidos no SGC

Verifica-se que a maior compactabilidade obtida (valor mais elevado de K) é referente ao conjunto de provetes R2 e P2, que foram compostos por uma maior massa de material derivado dos provetes apresentarem uma altura final superior aos restantes (115 mm). Comparando os conjuntos de provetes com alturas de cerca de 60 mm, conclui-se que os conjuntos R4 e P4, sujeitos a apenas 40 giros do compactador, em contraste com os 80 giros dos conjuntos R3 e P3, apresentam uma compactabilidade superior. É possível averiguar que em todos os conjuntos analisados, as misturas de referência apresentam uma maior compactabilidade, em comparação com as misturas aditivadas com PEBD.

Em relação à porosidade no giro 1 de compactação ($v(I)$), os valores dos conjuntos R2 e P2 são claramente superiores aos restantes. No caso da mistura com PEBD, verificou-se um maior valor de porosidade, algo que não sucedeu nos restantes pares de conjuntos. Comparando os conjuntos R3, P3, R4 e P4, nota-se que a variação no número de giros de compactação não promoveu alterações significativas neste parâmetro. Assim sendo, é possível concluir que esta propriedade encontra-se exclusivamente dependente da altura dos provetes produzidos e, conseqüentemente, da massa que os compõe.

3.4 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico

3.4.1 Descrição do procedimento de ensaio

O método A presente na norma EN 12697-25 (CEN, 2005) descreve o procedimento de avaliação da deformação permanente de amostras através do ensaio uniaxial cíclico. Como mencionado previamente, este ensaio consiste da aplicação de uma força de compressão axial cíclica constante nos provetes cilíndricos, durante o decorrer do ensaio. O equipamento permite a medição da variação de altura do provete, ou seja, o valor da sua deformação axial. No final é obtido um gráfico que relaciona essa deformação em função do número de ciclos realizados. A curva obtida denomina-se curva de fluência.

A norma indica que sejam sujeitos a ensaio cinco provetes por cada conjunto de espécimes produzidos. No caso do conjunto R4, foram apenas ensaiados quatro provetes, devido à sua produção limitada. Todos os provetes sujeitos ao ensaio apresentaram as dimensões descritas na norma:

- Altura de (60 ± 3) mm;
- Diâmetro de (148 ± 7) mm.

O provete a ensaiar é colocado entre duas placas, paralelas, do equipamento. As placas têm uma forma cilíndrica, de altura reduzida (cerca de 25 mm). A placa superior tem um diâmetro de 96 mm, e é nela que a carga é aplicada durante o ensaio. Apesar de este ensaio ser uniaxial, como o diâmetro desta placa é inferior ao do provete, consegue-se um certo grau de confinamento que permite simular com maior proximidade as condições de solicitação em pavimentos (Bessa, 2016; CEN, 2005; Gardete, 2006).

Os provetes foram ensaiados no mínimo dois dias após a sua compactação, encontrando-se, durante esse período numa local à temperatura ambiente, para impedir que fossem danificados e facilitar a sua secagem, tal como é aconselhado na norma (CEN, 2005). De modo a preparar os provetes, estes foram colocados na câmara termostática do equipamento durante um período mínimo de 4 horas, à temperatura de ensaio (60°C). Após essa duração, as faces dos provetes foram cobertas com um óleo lubrificante, de modo a minimizar a fricção e permitir uma distribuição de tensões mais homogênea, e colocados entre as duas placas do equipamento (Figura 3.13). Nesta fase é possível iniciar o ensaio.



a)

b)

Figura 3.13 - Provete sujeito ao ensaio de compressão uniaxial cíclico

Após se iniciar o ensaio, e durante os primeiros 10 minutos, é aplicada uma pré-carga cujo valor é de (10 ± 1) kPa. Este pré-carregamento tem como objetivo realizar um ajuste das placas ao provete, evitando que o equipamento induza em leituras incorretas da deformação axial. Após a pré-carga, inicia-se a aplicação do carregamento cíclico. Este carregamento teve uma intensidade de 100 kPa e uma duração de aplicação de $(1 \pm 0,05)$ s, seguidos de um período de repouso de $(1 \pm 0,05)$ s, ou seja, uma frequência de carregamento de aproximadamente 0,5 Hz. O tipo de carregamento aplicado nos ensaios realizados foi um carregamento retangular, isto é, não existiu variação da intensidade da tensão aplicada, ao contrário do que acontece num carregamento sinusoidal. No total são aplicados 3600 ciclos de carregamento, tornando a duração do ensaio de cerca de 2 h e 10 min, contabilizando o período de pré-carga (CEN, 2005).

De modo a medir a variação da altura do provete durante a realização do ensaio, são utilizados dois transdutores próprios para o efeito, designados de LVDT (“*Linear Variable Differential Transformer*”), situados sobre a placa superior, na qual é aplicada a tensão de compressão. Estes foram calibrados previamente à realização de cada ensaio, de modo a que a medição efetuada pelo equipamento fosse a correta.

Os LVDT efetuam as leituras em cada ciclo de aplicação da carga. Em cada ciclo, o provete apresenta uma deformação axial recuperável, que ocorre durante o período de repouso do ciclo. No entanto, esta parcela é inferior à deformação axial permanente que este sofre durante o período de atuação da carga. Deste modo, a leitura dos LVDT da extensão permanente acumulada permite a representação gráfica já referida. Em alguns casos, é possível observar com maior facilidade a parcela da deformação reversível do provete, tal como é representado na Figura 3.14.

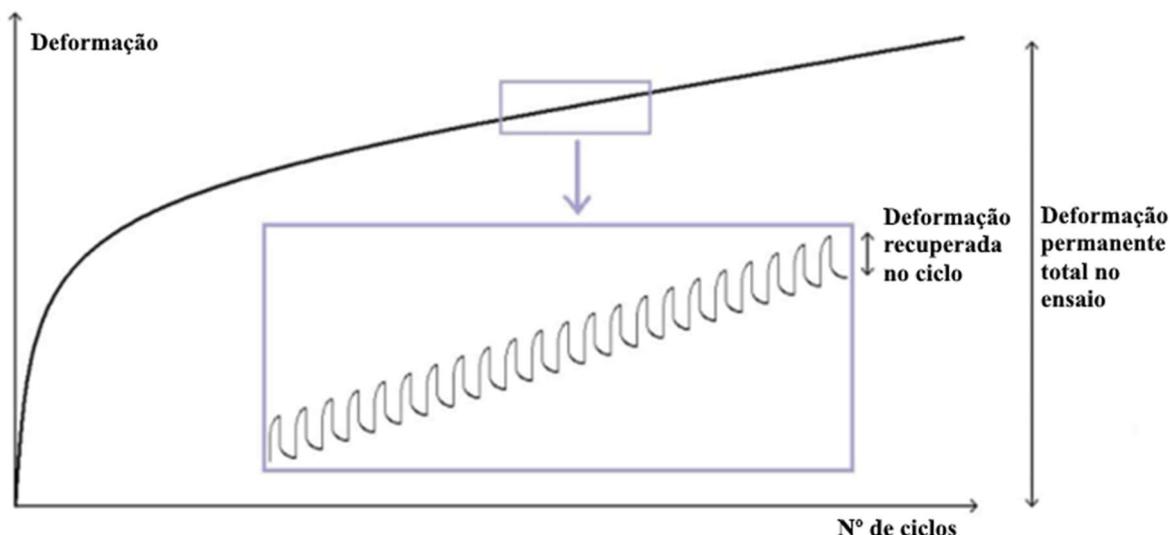


Figura 3.14 - Representação da evolução do gráfico obtido no ensaio de compressão uniaxial cíclico (Gardete, 2006)

Para além do gráfico, o software do equipamento permite também obter uma série de outros resultados. Entre eles destacam-se o valor da deformação permanente acumulada (3.7), módulo de fluência (3.8) e módulo de resiliência (3.9) em diversos ciclos de aplicação da carga. A juntar a estes parâmetros, é possível também verificar informações acerca da temperatura do ensaio e da intensidade da tensão induzida nos diversos ciclos de aplicação de carregamento do ensaio.

Deformação permanente acumulada:

$$\epsilon_n = \left(\frac{h_0 - h_n}{h_0} \right) \times 10^6 \quad (3.7)$$

ϵ_n – Deformação axial permanente acumulada do provete após n ciclos de aplicação da carga (microextensões);

h_0 – Altura média medida pelos LVDT após o período de pré-carga (mm);

h_n – Altura média medida pelos LVDT após n ciclos de aplicação da carga (mm).

Como referido, este parâmetro representa a extensão axial permanente acumulada após um certo número de ciclos. Na presente dissertação, apresentou-se, para a maior parte das amostras ensaiadas, o valor de ϵ_{3600} , que reflete a deformação permanente total medida no final do ensaio, em relação à altura inicial do provete. Os resultados analisados encontram-se em microextensões.

A norma referente ao ensaio (CEN, 2005) indica que no caso de o provete atingir o valor de 40000 microextensões (ou 4% da extensão total do provete), este entrou em rotura. O número do ciclo de carga em que tal sucede deve ser apontado, e representa o valor de FN (“*Flow Number*”), já mencionado. Deste modo, para os ensaios desenvolvidos na presente dissertação, inseriu-se um segundo critério de paragem de ensaio, quando o valor da deformação permanente acumulada atingisse esse valor. Verificou-se que 4 dos provetes ensaiados atingiram o valor mencionado, e, portanto, nesses casos, o ensaio não alcançou os 3600 ciclos de carga.

Módulo de fluência:

$$E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_n} \times 1000 \quad (3.8)$$

E_n – Módulo de fluência do provete no ciclo de aplicação da carga n (MPa);

σ – Tensão axial aplicada (kPa);

ϵ_n – Deformação axial permanente acumulada do provete após n ciclos de aplicação da carga (%).

O módulo de fluência representa uma aproximação da rigidez da mistura. Consiste do quociente entre a tensão aplicada ao provete e a deformação permanente acumulada registada após um determinado número de ciclos de carga. O valor analisado foi o valor do módulo de fluência no final do ensaio, E_{3600} . No entanto, este parâmetro não acrescenta muito à análise já realizada com o valor de E_{3600} , pois a tensão induzida nos ensaios foi sempre constante (100 kPa).

Módulo de resiliência:

$$E_{r,n} = \frac{\sigma}{\epsilon_r} \times 1000 \quad (3.9)$$

$E_{r,n}$ – Módulo de resiliência do provete no ciclo de aplicação da carga n (MPa);

σ – Tensão axial aplicada (kPa);

ϵ_r – Deformação axial permanente recuperada pelo provete no ciclo de aplicação de carga n (%).

O módulo resiliente é calculado através do quociente entre a tensão aplicada num ciclo de carregamento e a extensão recuperada pelo provete nesse mesmo ciclo. Este valor considera-se como uma aproximação do valor do módulo de deformabilidade complexo.

Com os resultados e parâmetros obtidos pelo ensaio, é possível calcular um outro parâmetro, denominado velocidade de deformação (3.10), importante para a análise da deformação permanente das misturas betuminosas estudadas (CEN, 2005).

Velocidade de deformação:

$$f_c = \frac{\epsilon_{n1} - \epsilon_{n2}}{n_1 - n_2} \quad (3.10)$$

f_c – Velocidade de deformação (microextensões/ciclo);

ϵ_{n1} ; ϵ_{n2} – Deformação axial permanente acumulada do provete após n_1 , n_2 ciclos de aplicação da carga (microextensões);

n_1 ; n_2 – Número de ciclos de aplicação da carga.

Esta propriedade reflete o acréscimo de extensão ocorrida por ciclo de carregamento aplicado. Na presente dissertação, a velocidade de deformação foi medida entre os ciclos de carregamento na qual a curva de fluência apresentava uma disposição aproximadamente linear, entre os ciclos nº 2000 e 3600.

3.4.2 Análise de resultados obtidos

Como mencionado, o software do equipamento de ensaio configura ficheiros com os resultados do ensaio, com diversos parâmetros e informações adicionais das condições de ensaio. Inicialmente, e utilizando esses resultados, foram desenhadas as curvas de fluência de cada provete ensaiado, que relaciona a deformação permanente sofrida com o número de carregamentos a que são sujeitos.

Posteriormente foram retirados os parâmetros com maior importância para análise na presente dissertação. Entre eles incluem-se o valor da deformação permanente final nos 3600 ciclos, ϵ_{3600} , bem como o valor de deformação permanente nos ciclos 2000 e 1000, ϵ_{2000} e ϵ_{1000} . Foram também retirados os valores do módulo de fluência e módulo de resiliência no ciclo 3600, E_{3600} e $E_{r,3600}$. Nos casos em que os provetes atingiram o valor máximo da deformação permanente permitida pelo ensaio (40000 microextensões ou 4% de deformação), foram apontados os números de ciclo no qual esse valor era atingido, ou seja, o “*Flow Number*”, FN. Finalmente foi calculado o valor da velocidade de deformação, f_c , entre os ciclos 2000 e 3600, zona em que a curva de fluência apresentava um desenvolvimento aproximadamente linear.

De modo a facilitar a visualização dos resultados serão apresentadas as curvas de fluência médias, resultantes da média da deformação permanente dos provetes ensaiados para cada ciclo de carregamento analisado. Deste modo, na Figura 3.15 representam-se as curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R1 e P1. Seguidamente, no Quadro 3.7, apresentam-se os parâmetros obtidos e calculados para cada provete desses conjuntos.

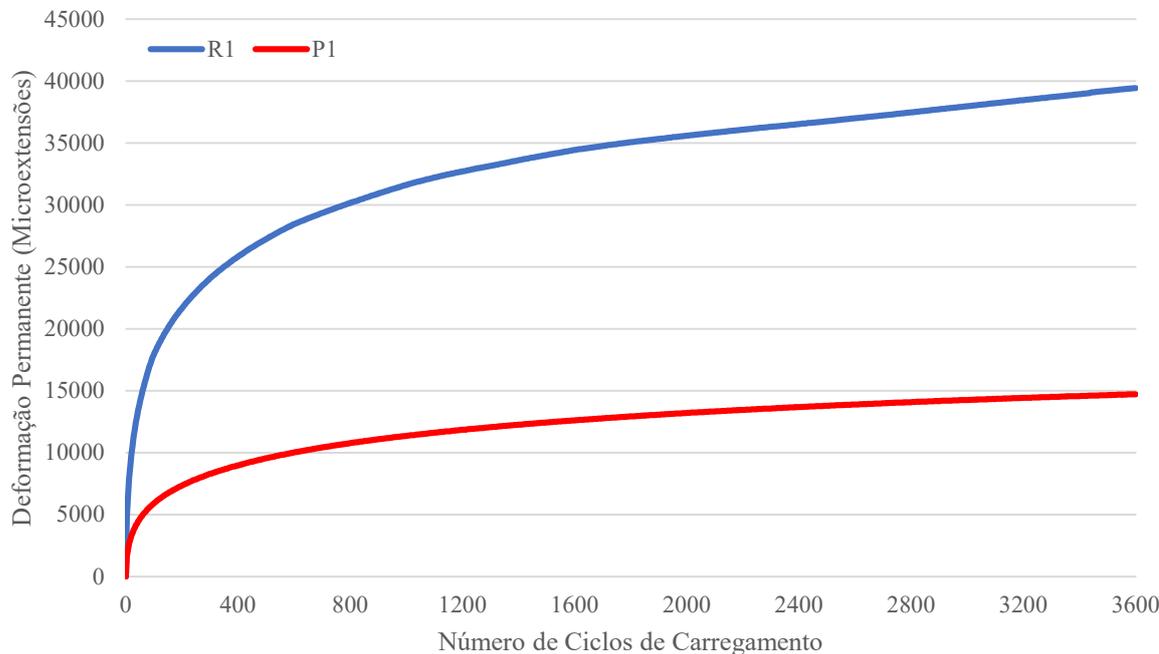


Figura 3.15 - Curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R1 e P1

Quadro 3.7 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico para os provetes do conjunto R1 e P1

Provete	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	V_m (%)	ϵ_{3600}	ϵ_{2000}	ϵ_{1000}	f_c ($\mu\text{ext./ciclo}$)	E_{3600} (MPa)	$E_{r,3600}$ (MPa)	FN (Ciclo)	
R1	R1.1	2434	1,81%	37449	34688	32188	1,73	2,67	766,9	-
	R1.3	2440	1,56%	40569	37433	34166	1,96	2,46	850,3	3440
	R1.5	2433	1,85%	44413	37937	32158	4,05	2,25	859,8	2544
	R1.6	2441	1,55%	32732	29502	27116	2,02	3,06	769,4	-
	R1.8	2439	1,61%	42046	38385	32401	2,29	2,38	838,7	2740
Média	2438	1,67%	39442	35589	31606	2,41	2,56	817,0	-	
P1	P1.1	2436	1,81%	11867	10464	8666	0,88	8,76	333,2	-
	P1.4	2438	1,70%	15687	14292	12632	0,87	6,71	311,4	-
	P1.5	2437	1,77%	16751	15118	13086	1,02	6,20	296,9	-
	P1.6	2429	2,08%	14727	13143	11176	0,99	6,96	266,0	-
	P1.7	2425	2,24%	14538	13027	11250	0,94	7,15	353,4	-
Média	2433	1,92%	14714	13209	11362	0,94	7,16	312,2	-	

Três dos provetes ensaiados (R1.3, R1.5 e R1.8) atingiram a deformação máxima possível e, portanto, os ensaios terminaram antes da ocorrência dos 3600 ciclos de carregamento. Para esses casos, a norma 12697-25 (CEN, 2005) indica que se devem extrapolar as curvas de fluência através de uma função que aproxime a inclinação das curvas nos últimos ciclos registados. Assim sendo, e com as curvas projetadas, foi possível obter uma aproximação do valor da deformação permanente acumulada no ciclo 3600 de carregamento, ϵ_{3600} .

Quando o provete atinge o valor de deformação mencionado, considera-se que atingiu o ponto de rotura, ou seja, entra na terceira fase de deformação típica, onde a deformação permanente aumenta drasticamente com o número de ciclos de carregamento aplicados. O número do ciclo no qual se verificou essa deformação limite foi registado e corresponde ao “Flow Number”, FN . Em mais nenhuma amostra ensaiada se atingiu o valor de deformação correspondente ao ponto de rotura, e, portanto, não foram registados nenhuns valores adicionais de FN .

Os conjuntos de provetes R1 e P1 correspondem às amostras compactados pelo compactador de rolos. É possível verificar o aumento de resistência da mistura aditivada com 6% de PEBD comparativamente à resistência das amostras compostas pela mistura de referência. Em média, a deformação permanente acumulada no final do ensaio, ϵ_{3600} , sofreu um decréscimo de cerca de 63% no caso dos provetes compostos pela mistura com resíduos plásticos.

Em seguida, ilustram-se as curvas médias de deformação para os restantes conjuntos de provetes, R2 e P2 (Figura 3.16), R3 e P3 (Figura 3.17) e R4 e P4 (Figura 3.18). Os resultados correspondentes aos provetes ensaiados constituintes dos conjuntos mencionados são também representados no Quadro 3.8, Quadro 3.9 e Quadro 3.10. Os provetes constituintes dos conjuntos mencionados foram compactados com auxílio do compactador giratório, SGC.

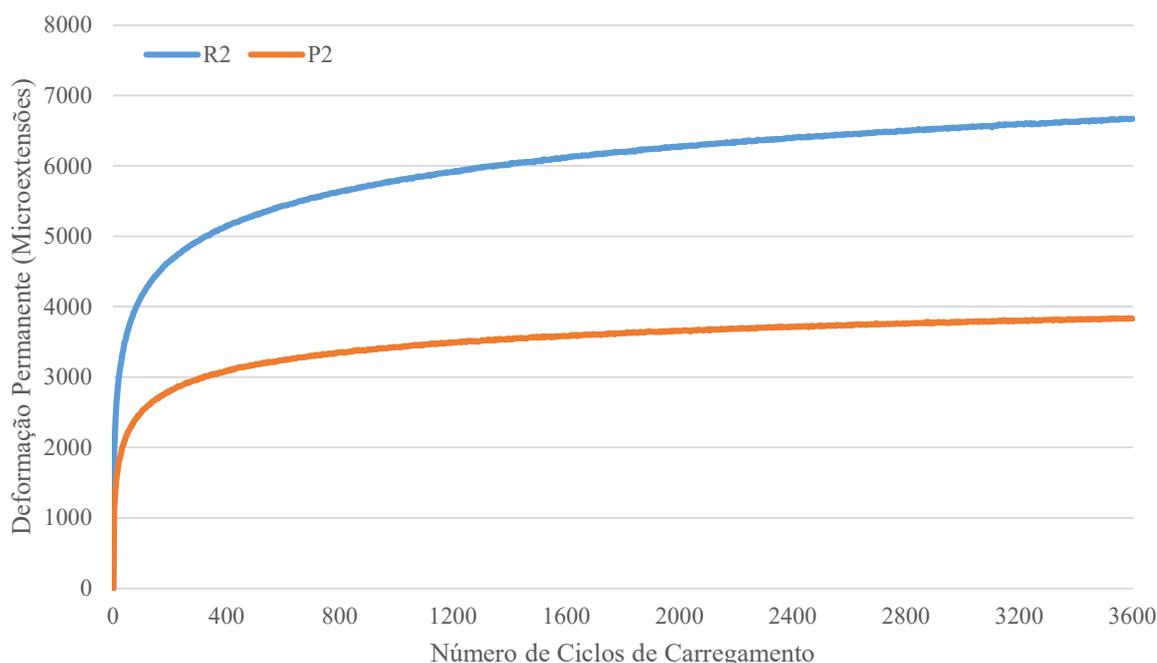


Figura 3.16 - Curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R2 e P2

Quadro 3.8 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico para os provetes do conjunto R2 e P2

Provete	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	V_m (%)	ϵ_{3600}	ϵ_{2000}	ϵ_{1000}	f_c ($\mu\text{ext./ciclo}$)	E_{3600} (MPa)	$E_{r,3600}$ (MPa)	
R2	R2.1	2469	0,40%	6312	5916	5458	0,25	16,46	282,2
	R2.2	2449	1,22%	6126	5850	5534	0,17	16,74	333,3
	R2.3	2474	0,19%	6375	6006	5500	0,23	16,30	335,4
	R2.5	2469	0,42%	6721	6226	5671	0,31	15,46	276,2
	R2.6	2466	0,51%	7801	7379	6812	0,26	13,15	275,6
Média	2465	0,55%	6667	6275	5795	0,24	15,62	300,6	
P2	P2.1	2456	1,00%	4150	3922	3664	0,14	24,72	318,7
	P2.2	2455	1,04%	4439	4204	3948	0,15	23,41	404,3
	P2.4	2453	1,12%	3439	3296	3102	0,09	30,22	421,9
	P2.5	2452	1,17%	3958	3816	3592	0,09	26,59	368,9
	P2.6	2454	1,06%	3171	3018	2813	0,10	32,34	454,6
Média	2454	1,07%	3831	3651	3424	0,11	27,46	393,7	

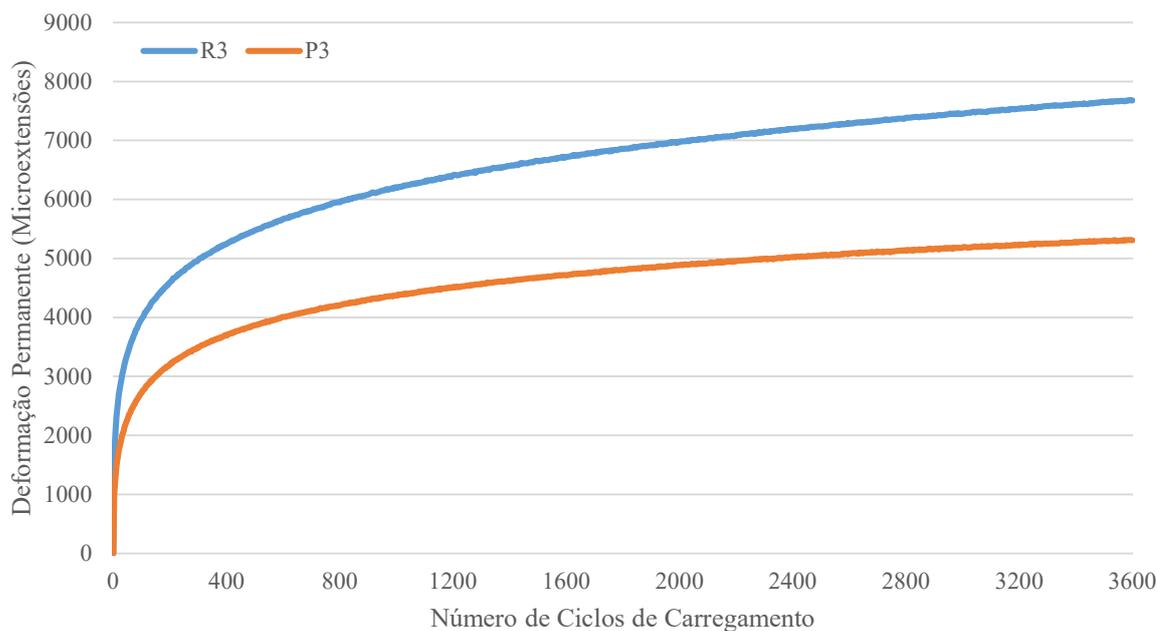


Figura 3.17 - Curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R3 e P3

Quadro 3.9 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico para os provetes do conjunto R3 e P3

Provete	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	V_m (%)	ϵ_{3600}	ϵ_{2000}	ϵ_{1000}	f_c ($\mu\text{ext./ciclo}$)	E_{3600} (MPa)	$E_{r,3600}$ (MPa)	
R3	R3.1	2463	0,64%	7989	7151	6275	0,52	12,8	268,6
	R3.2	2455	0,95%	7432	6854	6216	0,36	13,6	275,6
	R3.3	2455	0,98%	7413	6813	6132	0,37	14,0	254,1
	R3.4	2457	0,87%	7874	7091	6209	0,49	13,2	235,3
	Média	2458	0,86%	7677	6978	6208	0,44	13,4	258,4
P3	P3.2	2450	1,22%	7145	6599	5940	0,34	14,5	284,0
	P3.3	2455	1,04%	4076	3662	3116	0,26	25,5	269,7
	P3.4	2454	1,06%	4765	4413	3991	0,22	21,8	305,2
	P3.5	2449	1,27%	5865	5426	4906	0,27	17,7	289,6
	P3.6	2453	1,11%	4691	4337	3902	0,22	22,1	292,2
Média	2452	1,14%	5308	4887	4371	0,26	20,3	288,1	

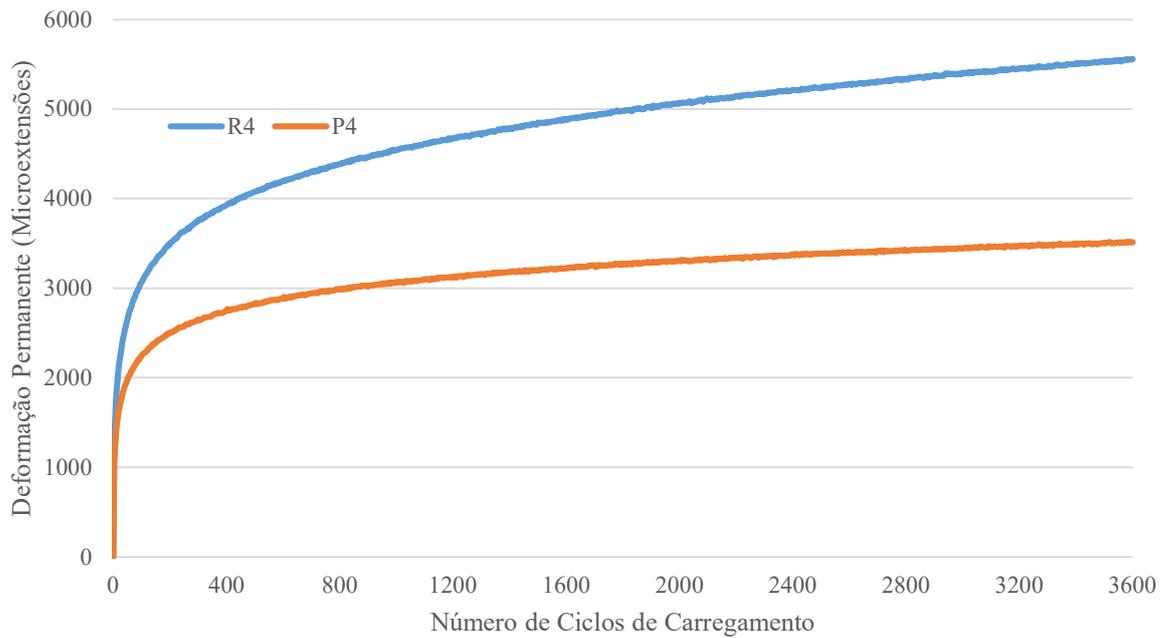


Figura 3.18 - Curvas médias de fluência para os conjuntos de provetes R4 e P4

Quadro 3.10 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico para os provetes do conjunto R4 e P4

Provete	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	V_m (%)	ϵ_{3600}	ϵ_{2000}	ϵ_{1000}	f_c ($\mu\text{ext./ciclo}$)	E_{3600} (MPa)	$E_{r,3600}$ (MPa)	
R4	R4.2	2427	2,10%	4849	4411	3960	0,27	21,4	273,9
	R4.3	2406	2,95%	6721	6078	5405	0,40	15,5	286,0
	R4.4	2428	2,06%	5244	4825	4335	0,26	19,8	295,8
	R4.6	2424	2,23%	5420	4951	4454	0,29	19,2	296,8
Média	2421	2,34%	5559	5066	4539	0,31	19,0	288,1	
P4	P4.1	2418	2,52%	3299	3065	2759	0,15	31,5	308,7
	P4.2	2417	2,58%	3383	3199	2985	0,11	30,7	351,2
	P4.4	2422	2,34%	3405	3220	2995	0,12	30,5	288,6
	P4.5	2418	2,53%	3764	3550	3295	0,13	27,6	298,3
	P4.6	2422	2,37%	3703	3501	3319	0,13	27,7	335,4
Média	2419	2,47%	3511	3307	3070	0,13	29,6	316,4	

De modo a facilitar a análise da deformação permanente acumulada por cada conjunto de provetes estudado, bem como os resultados obtidos no estudo de Fonseca (2018), elaborou-se um gráfico ilustrativo dessas deformações médias sofridas por cada conjunto de provetes em vários ciclos de aplicação de carregamento (1000, 2000 e 3600). O gráfico é ilustrado na Figura 3.19.

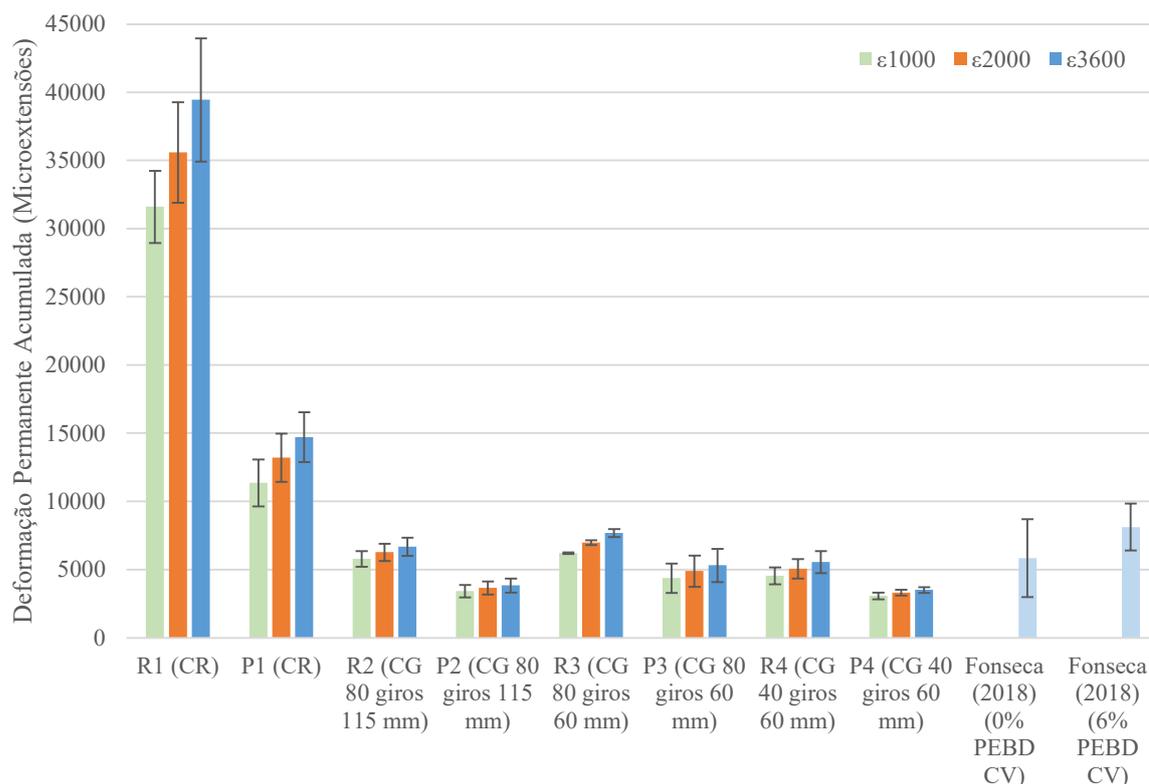


Figura 3.19 - Gráfico comparativo das deformações permanentes acumuladas médias dos vários conjuntos de provetes estudados

É possível concluir que os provetes compactados pelo compactador de rolos (R1 e P1) apresentam uma resistência à deformação permanente inferior à dos provetes compactados por compactador giratório (R2, P2, R3, P3, R4 e P4). Estes resultados são corroborados com as conclusões obtidas por diversos autores (Hassan *et al.*, 2012; Hunter *et al.*, 2004; Kok *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2018; Mollenhauer e Wistuba, 2015), que, enaltecem o efeito das compactações que utilizam moldes no seu processo em produzir amostras com maior resistência à deformação permanente, comparativamente às compactações sem utilização de moldes ou efetuadas em obra.

É importante referir que durante a compactação de rolos foi utilizado um molde para reter a mistura, no entanto, devido ao elevado volume de material compactado e às dimensões do molde serem, portanto, também superiores, é possível que o efeito de confinamento não tenha sido verificado com a mesma proporção. Adicionalmente, durante o processo de compactação pelo método de rolos uma grande superfície da laje encontrou-se em contacto com o ar durante todo o processo, o que pode levar à diminuição da sua temperatura, fator importante para se efetuar uma compactação eficiente.

Na maior parte dos pares de conjuntos de amostras analisadas observou-se um aumento da resistência à deformação permanente nos casos de provetes compostos pela mistura com adição de 6% de PEBD reciclado, comparativamente aos provetes compostos pela mistura de referência. No entanto, para os resultados obtidos por Fonseca (2018), verificou-se o contrário. Os ensaios realizados pela autora revelaram uma maior dispersão de resultados, fruto também,

de uma maior dispersão de baridades obtidas durante a produção das amostras, o que pode ter influenciado os valores médios de deformação permanente.

A maior diminuição da deformação permanente acumulada no final do ensaio surgiu para os provetes P1 em relação aos provetes R1. Neste caso, os provetes compostos pela mistura aditivada com resíduos reciclados de PEBD permitiram um decréscimo de cerca de 63% na deformação permanente acumulada no ciclo final do ensaio, como já referido anteriormente. Bandeira (2019), através de ensaios de simulação em amostras compactadas por compactador de rolos verificou que o acréscimo de resistência à deformação permanente, resultante da adição de 6% PEBD na mistura de referência, foi de 66%, valor próximo do obtido para o grupo de provetes P1 em relação ao conjunto R1. O menor acréscimo da resistência foi verificado no caso do conjunto de provetes P3, em comparação com a deformação permanente acumulada dos provetes do conjunto R3, estes diminuíram a deformação sofrida em 30%, um valor que, ainda assim, é considerável.

Comparando os conjuntos R2 e P2, compactados a 115 mm de altura e, posteriormente retificados a 60 mm, com os conjuntos R3 e P3, compactados a 60 mm, notou-se uma pequena variação da deformação permanente acumulada sofrida. Os provetes retificados apresentaram um valor ligeiramente inferior de porosidade, o que permitiu uma maior resistência à deformação permanente. No entanto, o processo de retificação pode durar alguns dias e é dispendioso. Adicionalmente, a diferença dos resultados não é significativa o suficiente para justificar o processo de retificação de provetes visto não permitir obter melhores resultados.

Os conjuntos de provetes compactados por 40 giros no SGC apresentaram o menor valor de deformação permanente acumulada. Estes resultados não estão de acordo com o esperado. A diminuição de energia incitada na compactação, que induziu a um valor superior da porosidade dos provetes, levaria a considerar que estes provetes iriam sofrer a maior deformação permanente, pelo menos dentro do grupo de provetes compactados pelo SGC. No entanto isto não se verificou, podendo os resultados estarem relacionados com a porosidade baixa (inferior a 3%) de todas amostras produzidas, o que leva a que a variação da deformação permanente sofrida não seja linear com o seu aumento. Este fenómeno levou a que se fizesse uma análise das deformações permanentes sofridas em função da porosidade, apresentada mais à frente.

Perante os resultados da deformação permanente obtida no final do ensaio, ϵ_{3600} , procedeu-se novamente a uma análise estatística de variância, de um modo semelhante à efetuada para a baridade SSD. Avaliou-se a significância dos resultados através da análise do “*p-value*”. Para valores inferiores de 5%, o grupo de amostras estudadas concluía-se estatisticamente diferente das restantes, ou seja, o método de compactação teria uma influência significativa na deformação permanente sofrida pelas amostras.

Concluiu-se que, para a mistura de referência, o grupo de amostras R1 (compactadas pelo compactador de rolos) é estatisticamente diferente dos restantes grupos, devido à maior deformação permanente sofrida. Relativamente à mistura aditivada, o grupo de amostras compactada pelo compactador de rolos (P1) e as amostras obtidas por Fonseca (2018) distinguiram-se dos restantes conjuntos de amostras. Os resultados obtidos neste estudo encontram-se representados no Anexo B.

Os valores da deformação sofrida nos ciclos 1000 e 2000 são também representados na figura, de modo a obter uma apreciação aproximada do desenvolvimento da curva de fluência. Verifica-se que nos provetes que resistiram mais ao ensaio (conjunto P2 e P4), não existe um

grande acréscimo entre a deformação sofrida nos três ciclos analisados, o que significa que grande parte da deformação sofrida pelos provetes ocorreu nos primeiros ciclos, ou seja, na fase primária da curva de fluência. Por outro lado, as amostras que sofreram maior deformação apresentam uma maior variação entre as deformações verificadas nos ciclos mencionados, o que significa que a curva de fluência não terá estabilizado e a amostra continua a deformar a um ritmo substancial.

A análise do desenvolvimento da curva de fluência, em função do número de ciclos de carregamentos aplicados, pode ser analisada, de um modo mais detalhado, através da velocidade de deformação f_c . Na Figura 3.20 ilustram-se os valores médios desse parâmetro referentes a cada conjunto de provetes estudado.

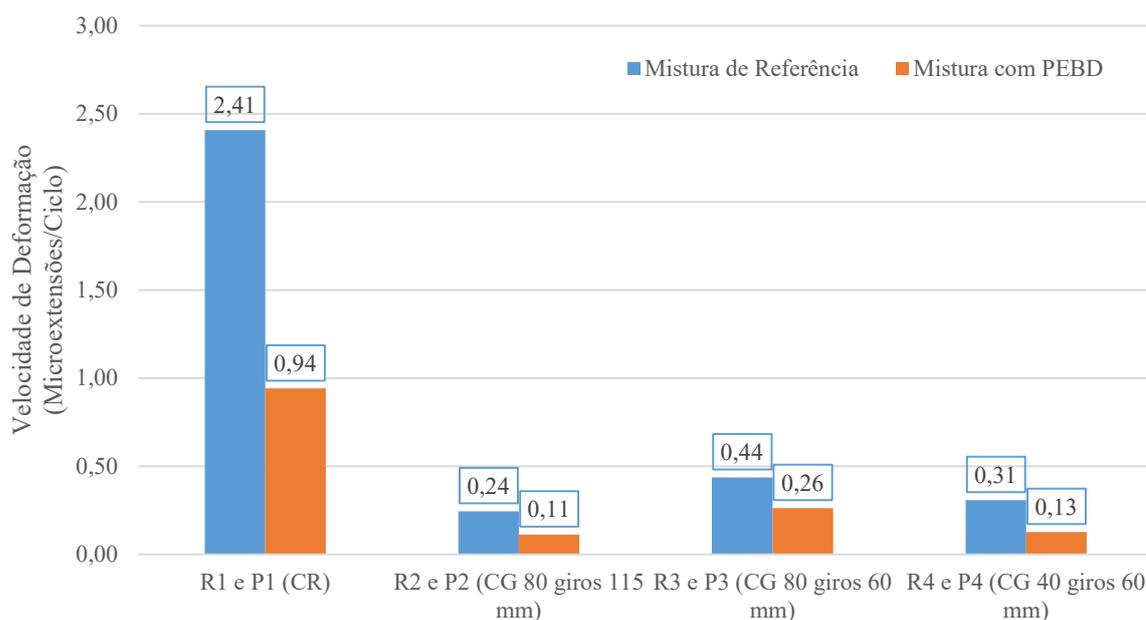


Figura 3.20 - Gráfico comparativo das velocidades de deformação médias dos vários conjuntos de provetes estudados

Os resultados obtidos para a velocidade de deformação encontram-se, em maior parte, em concordância com a deformação permanente acumulada. Os conjuntos R1 e P1, que apresentaram uma maior deformação permanente acumulada, revelam uma velocidade de deformação superior. Isto significa que mesmo durante a fase linear da curva, existe um acréscimo de deformação substancial por cada ciclo de carregamento aplicado. Naturalmente, uma amostra com maior velocidade de deformação apresentará, no final, um valor de deformação permanente acumulada também superior.

No entanto, analisando os valores de f_c obtidos para os conjuntos R4 e P4, verificam-se que apesar destes conjuntos terem apresentado valores de deformação permanente acumulada final inferiores a todos os outros conjuntos ensaiados, neste caso apresentam um valor superior de velocidade de deformação em comparação com o conjunto R2 e P2. Perante esta informação é possível concluir que apesar de na fase aproximadamente linear da curva de fluência existir um maior acréscimo de deformação por ciclo de carregamento aplicado, estes sofreram menor deformação na primeira fase de desenvolvimento da curva, o que levou a que no final, a deformação acumulada fosse inferior às do conjunto R2 e P2. Por outro lado, as amostras destes últimos conjuntos sofreram, numa fase inicial do ensaio uma deformação mais intensa, por cada

ciclo de carregamento aplicado, e, numa fase final, permitiram uma menor velocidade de deformação.

Os resultados obtidos para o módulo de fluência e o módulo de resiliência são, de um modo semelhante, comparados para os vários conjuntos de provetes estudados. Na Figura 3.21 representa-se o gráfico que ilustra esses parâmetros.

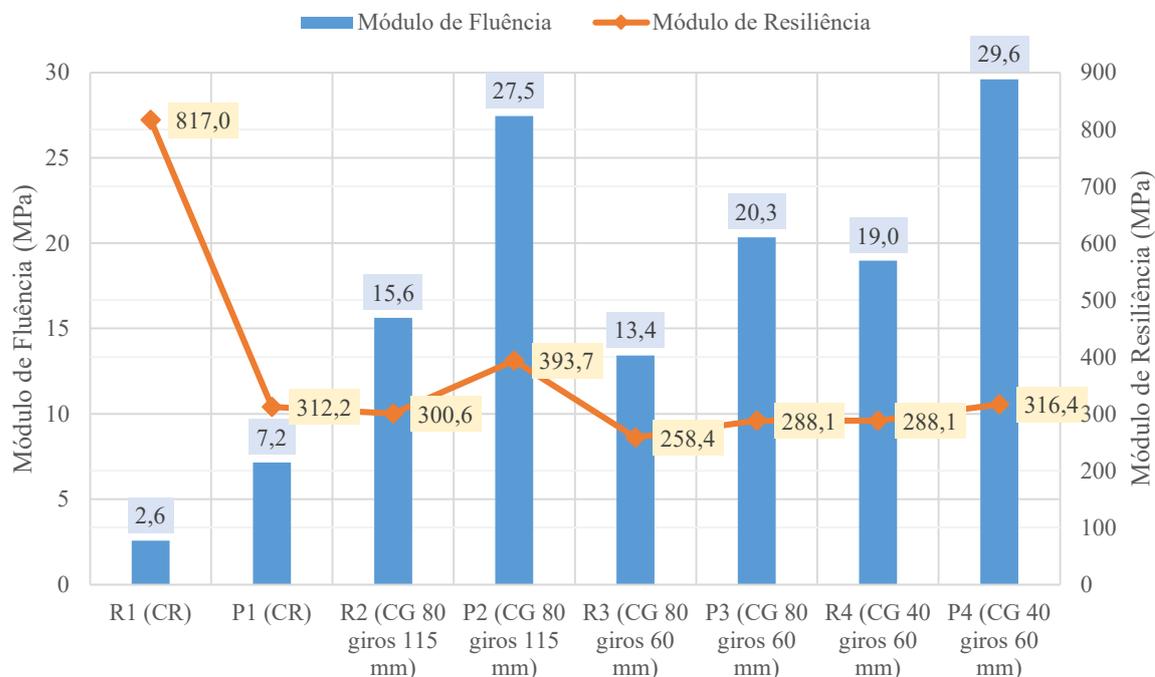


Figura 3.21 - Gráfico comparativo dos valores médios do módulo de fluência e módulo de resiliência dos vários conjuntos de provetes estudados

Os valores obtidos para o módulo de fluência no ciclo de carregamento 3600, E_{3600} , permitem classificar os vários conjuntos de amostras do mesmo modo que a deformação permanente acumulada nesse mesmo ciclo, ϵ_{3600} . Visto a tensão aplicada não variar entre os ensaios realizados (100 kPa), e este parâmetro representar o quociente entre essa tensão e a deformação permanente acumulada, conclui-se que os valores mais altos obtidos permitem classificar os provetes como os mais resistentes. Por outro lado, os valores mais baixos indicam a menor resistência dos provetes à deformação permanente.

Relativamente ao módulo de resiliência no ciclo de carregamento 3600, $E_{r,3600}$, este foi calculado através do quociente entre a tensão aplicada pelo ensaio e a extensão recuperada pelo provete nesse ciclo. Como a tensão induzida foi constante, um valor elevado deste parâmetro indicará uma menor deformação recuperada pela amostra no ciclo de análise. No entanto, o valor foi relativamente constante para todos os provetes estudados, levando a resultados não conclusivos. No entanto, para o caso do conjunto de provetes R1, notou-se um valor substancialmente superior em comparação com os restantes (817,0 MPa). Este valor elevado pode refletir a proximidade destas amostras ao ponto de rotura, corroborada pelo maior valor de deformação axial acumulada, próxima das 40000 microextensões, visto que durante esta fase as amostras perdem capacidade de recuperar a deformação sofrida.

Posteriormente, tendo em conta os resultados obtidos para a deformação permanente acumulada, foi efetuada uma análise comparativa dessa propriedade em função da porosidade

de cada provete estudado. Sendo assim, a Figura 3.22 ilustra um gráfico de dispersão que relaciona esses parâmetros.

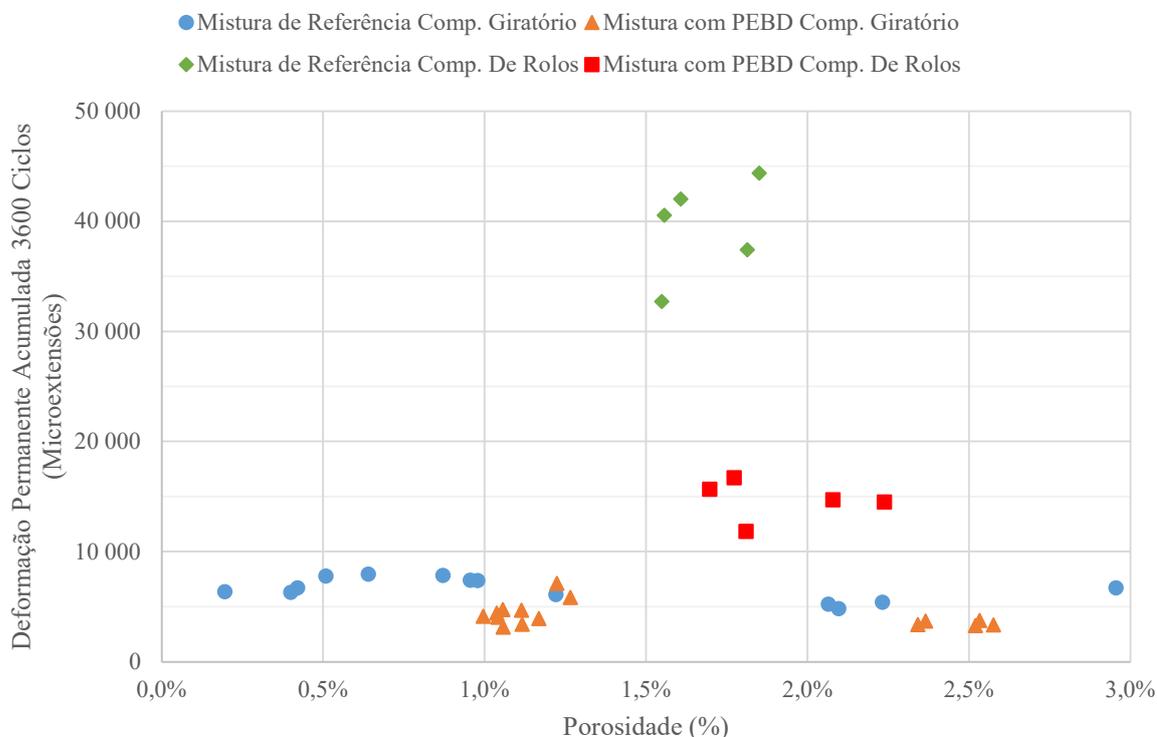


Figura 3.22 - Gráfico de dispersão que relaciona ϵ_{3600} com a porosidade dos provetes

Numa primeira análise é possível concluir que as amostras que foram compactadas com o compactador de rolos, ainda que apresentem valores de porosidade semelhantes às amostras compactadas no compactador giratório apresentam uma menor resistência à deformação permanente, como já havia sido referido.

Outra hipótese já referida, e reforçada pela análise deste gráfico é a de que os provetes compostos pela mistura com resíduos plásticos, apesar de apresentarem propriedades volumétricas semelhantes às dos provetes compostos pela mistura de referência, sofrem uma menor deformação permanente acumulada.

Relativamente à variação da deformação permanente acumulada perante as variadas porosidades (analisando, neste caso, apenas os provetes compactados pelo compactador giratório) (Figura 3.23), nota-se, apesar de alguma dispersão de resultados, que para valores mais reduzidos de porosidade as amostras tendem a sofrer uma maior deformação permanente. Este fenómeno é observado com maior clarividência no caso das misturas de referência, nos quais para porosidades inferiores a 1,5% as deformações são, por norma, superiores às restantes. A deformação das misturas com adição de PEBD são também ligeiramente superiores, na maioria dos casos, para valores de porosidade inferior, entre os 1,0% e os 1,5%.

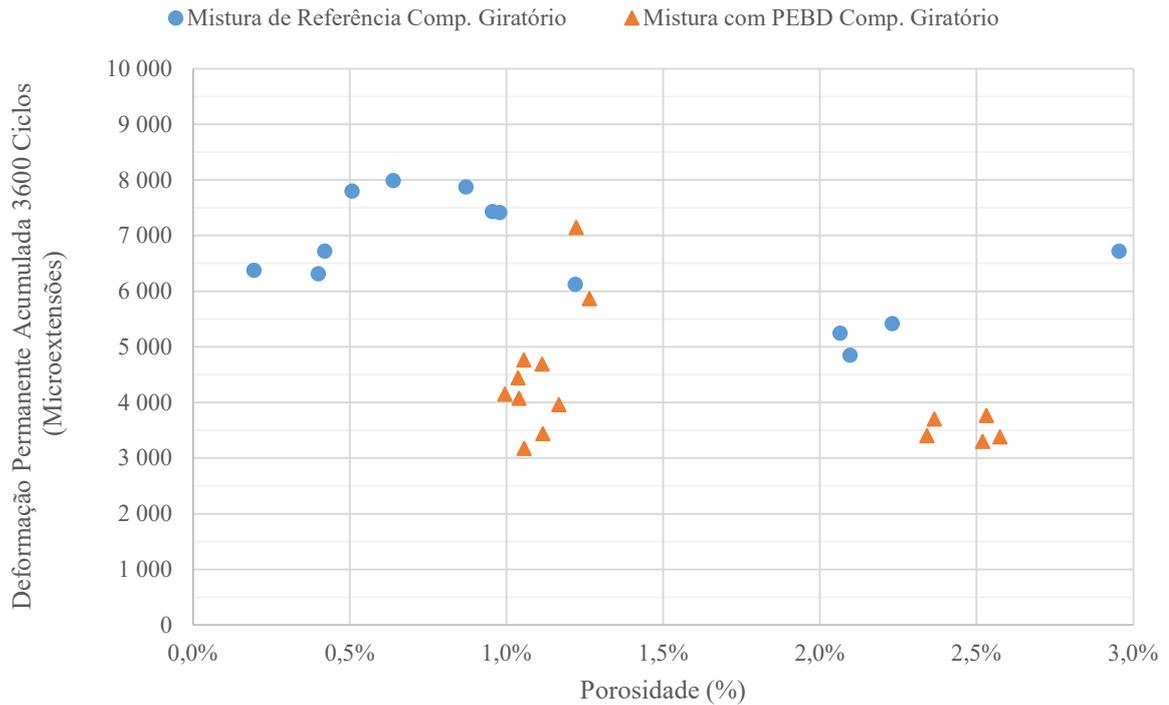


Figura 3.23 - Gráfico de dispersão que relaciona ϵ_{3600} com a porosidade dos provetes ensaiados compactados pelo compactador giratório

Por norma, amostras com valores mais elevados de porosidade apresentariam uma menor resistência à deformação permanente. No entanto, como todos os provetes produzidos continham valores de volumes de vazios inferiores a 3% (volume de vazios crítico), é possível que o seu comportamento piore com a diminuição da porosidade existente nas amostras. As misturas tornam-se menos resistentes e mais suscetíveis a deformar abaixo desse valor. Este fenómeno advém do facto que para volumes de vazios inferiores a 3% o betume preenche todo o espaço existente entre as partículas. Para temperaturas elevadas o betume funcionará então de um modo lubrificante entre as partículas sólidas, potenciando a deformação da mistura (Baptista, 2006; Capitão, 2003; Gardete, 2006).

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

A presente dissertação vem na sequência de estudos efetuados anteriormente, nos quais foram estudados a viabilidade de inserção de resíduos plásticos reciclados numa mistura AC 14 surf 35/50 e analisadas propriedades como a resistência à fadiga e à deformação permanente através de ensaios de simulação. O objetivo do presente estudo foi de desenvolver uma investigação das mesmas misturas, analisando amostras compactadas por métodos distintos e avaliar as suas resistências à deformação permanente por ensaios do tipo fundamentais.

A mistura betuminosa estudada tem aplicação comum em camadas de desgaste. Deste modo, a investigação realizada apresenta relevância não só nas construções de pavimentos novos como também na reabilitação de pavimentos já existentes. Foram produzidas duas misturas, uma sem incorporação de qualquer material adicional, denominada de referência, e outra com a inclusão de 6% de PEBD (Polietileno de Baixa Densidade). As amostras analisadas foram produzidas por via de compactação de rolos e compactação giratória, com a variação de alguns parâmetros de compactação como a energia induzida e a altura dos provetes.

De modo a caracterizar a deformação permanente recorreu-se ao ensaio de compressão uniaxial cíclico, que simula as cargas constantes a que um pavimento fica sujeito. Este ensaio permite não só classificar as amostras pela sua resistência à deformação permanente como obter diversos outros parâmetros que oferecem informações adicionais acerca dos provetes durante o decorrer do ensaio.

Concluiu-se que a incorporação de resíduos plásticos na mistura aumenta a sua resistência à deformação permanente. Os valores de deformação permanente acumulada obtidos para os diferentes ciclos analisados do ensaio foram inferiores comparativamente à mistura de referência. A diminuição sofrida verificada variou entre 30% e 60%. Esta diminuição é também refletida nos resultados da velocidade de deformação e módulo de fluência. Um outro benefício é a reduzida utilização de betume nas misturas aditivadas. Os 6% de PEBD reciclado são referentes à massa de betume utilizado, permitindo uma economia do ligante que deriva do petróleo, um combustível fóssil cuja fonte é limitada.

Comparando os métodos de compactação utilizados, é notório que as amostras produzidas pelo compactador de rolos apresentaram uma resistência à deformação permanente inferior às compactadas pelo compactador giratório, apesar das propriedades volumétricas (baridade e porosidade) serem semelhantes. Esta conclusão é corroborada pela literatura estudada. O modo de compactação do compactador giratório permite um maior atrito entre as partículas sólidas da mistura betuminosa, o que se reflete numa maior resistência estrutural.

Para valores reduzidos de porosidade, abaixo de 3%, o comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente tende a piorar. Para as amostras cujos valores percentuais de porosidade eram mais reduzidos, a deformação permanente sofrida foi superior. Os provetes com porosidades próximas de 3% sofreram uma menor deformação. Estes resultados surgem do facto de que para volumes de vazios extremamente reduzidos, o betume preencher grande parte dos espaços existentes entre as partículas sólidas. Quando sujeito a elevadas temperaturas o betume comporta-se de um modo lubrificante e permite, com mais facilidade, o deslocamento relativo do material que compõe a mistura betuminosa, espelhando, portanto, uma menor resistência à deformação.

Os provetes compactados por compactação giratória com uma altura superior (115 mm), que sofreram, posteriormente, remoção da face superior e inferior, apresentaram um aumento substancial da sua baridade e, conseqüentemente, diminuição da sua porosidade após essa retificação. Os provetes compactados por compactação de rolos, que sofreram a mesma

correção, não verificaram um decréscimo tão considerável. Pode-se concluir que o compactador giratório produz provetes nos quais a distribuição dos vazios da mistura, na direção vertical, se concentra com maior predominância nas zonas periféricas, ou seja na zona da face superior e inferior para o caso de provetes cilíndricos.

Apesar da diferença observada entre as propriedades volumétricas das amostras compactadas pelo compactador giratório com posterior correção de alturas e as amostras compactadas originalmente com 60 mm, no segundo caso o valor de deformação permanente acumulada não aumentou significativamente. Para a mistura de referência o valor de deformação final foi em média de 6667 microextensões comparativamente ao valor médio de 7677 microextensões dos provetes não corrigidos. Para a mistura com plástico a deformação média final foi de 3831 microextensões comparativamente a 5308 microextensões. Assim sendo, como os resultados são relativamente próximos, é possível afirmar que a produção dos provetes de altura mais reduzida, 60 mm, é mais vantajosa, visto ser um processo com menos etapas e menos dispendioso.

Relativamente à análise da compactabilidade das misturas através das curvas obtidas no compactador giratório, é possível aferir que a mistura de referência apresenta uma maior facilidade de compactação, e, portanto, uma maior trabalhabilidade e espalhabilidade. Os valores obtidos do parâmetro K , que define essas propriedades, foram inferiores para a mistura aditivada com resíduos plásticos em todos os casos analisados.

No geral, em relação à resistência à deformação permanente, a adição dos resíduos plásticos por via seca permitiu obter resultados satisfatórios. É importante referir, mais uma vez, a importância da utilização de materiais reciclados como o aproveitado na presente dissertação, devido aos seus benefícios económicos e sustentáveis. A diminuição da propensão a formação de patologias em pavimentos, por deformação permanente, favorece a durabilidade das vias, protege a condução e assegura uma maior comodidade aos condutores.

No entanto, serão necessários mais estudos que sustentem a introdução de materiais de origem reciclada como aditivo de misturas betuminosas de modo a melhorar as suas propriedades mecânicas, não só a resistência à deformação permanente, mas também outras propriedades de desempenho como a resistência à fadiga. Seria interessante o desenvolvimento de investigações com o âmbito de adicionar outros tipos de resíduos plásticos reciclados pela via seca, quer pela substituição de ligante, quer pela substituição parcial de agregados, visto este método não se considerar ainda uma prática corrente e necessitar de um maior suporte de teor científico.

O desenvolvimento desses estudos poderia, em parte, ser direcionado para amostras de porosidade reduzida, de modo a analisar com maior pormenor o comportamento dessas misturas betuminosas quando o volume de vazios é inferior a um dado valor. Deste modo, poderia ser analisado se o valor de “porosidade crítica”, de 3%, se mantém constante para as misturas aditivadas.

Uma outra variante do estudo poderia focar-se em amostras produzidas através de compactação de rolos, nomeadamente em trechos experimentais, visto esta ser a compactação que vários autores indicam como a mais próxima da compactação que ocorre em obra, devido à semelhança do modo de atuação do equipamento. Assim, e como estas foram concluídas através dos ensaios realizados, no presente trabalho experimental, como as amostras que apresentaram menor resistência à deformação permanente, seria possível obter uma previsão do desempenho das misturas estudadas para camadas de desgaste em serviço.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2000). *“Hot Mix Asphalt Pavement Handbook 2000”*. United States Army Corps of Engineers, Washington, D.C., E.U.A., pp. 1-227.

Abdo, A., Khater, M. (2018). *“Enhancing Rutting Resistance of Asphalt Binder by Adding Plastic Waste”*. Cogent Engineering, Vol. 5, pp. 1-7.

Abed, A., Al-Azzawi, A. (2012). *“Evaluation of Rutting Depth in Flexible Pavements by Using Finite Element Analysis and Local Empirical Model”*. American Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 5, No. 2, pp. 163-169.

Ahmad, M. (2014). *“Low Density Polyethylene Modified Dense Graded Bituminous Macadam”*. International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 16, No. 8, pp. 366-372.

Ahmad, N., Jaya, R. (2016). *“The Use of Plastic Waste in Bituminous Mixture for the Road Pavement”*. 1st Proceeding of Civil Engineering, Construction Management, Geotechnics & Transportation, Vol. 2, pp. 315-325.

Airey, G., Collop, A. (2015). *“Mechanical and Structural Assessment of Laboratory- and Field-Compacted Asphalt Mixtures”*. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 50-63.

Ali, Y., Irfan, M., Ahmed, S., Ahmed, S. (2017). *“Permanent Deformation Prediction of Asphalt Concrete Mixtures – A Synthesis to Explore a Rational Approach”*. Construction and Building Materials, Vol. 153, pp. 588-597.

Alkaissi, Z. (2018), *“Effect of High Temperature and Traffic Loading on Rutting Performance of Flexible Pavements”*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences.

Almeida Jr., P., Boeira, F., Specht, L., Cervo, T., Pereira, D., Centofante, R., Barboza Jr., V., Correia e Silva, C. (2018). *“Avaliação Laboratorial do Tipo e Teor de Ligante e da Granulometria na Deformação Permanente de Misturas Asfálticas”*. Revista Transportes, Vol. 26, No. 2, pp. 1-15.

Almeida, A., Capitão, S., Bandeira, R., Fonseca, M., Picado-Santos, L. (2020). *“Performance of AC Mixtures Containing Flakes of LDPE Plastic Film Collected from Urban Waste Considering Ageing”*. Construction and Building Materials, Vol. 232, pp. 1-11.

Bandeira, R. (2019). *“Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Com a Incorporação de Fragmentos de Resíduos de Plástico de Baixa Densidade”*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, pp. 1-69.

Baptista, A. (2006). *“Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: Contribuição Para o Seu Estudo e Aplicação”*. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, pp. 1-382.

Barbosa, L., Dreger, A., Schneider, E., Morisso, F., Santana, R. (2017). *“Polietileno de Baixa Densidade – PEBD: Mercado, Produção, Principais Propriedades e Aplicações”*. Revista Espacios, Vol. 38, No. 17, pp. 10-23.

Barros, L., Brito, L., Ceratii, J. (2015). *“Desempenho Quanto à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas com Diferentes Ligantes”*. XVIII Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto 2015 (CILA 2015), Barriloche, Patagonia, Argentina.

Bastos, J., Soares, J., do Nascimento, L. (2017). *“Critérios Para os Resultados do Ensaio Uniaxial de Carga Repetida de Misturas Asfálticas em Laboratório a Partir do Desempenho em Campo”*. Revista Transportes, Vol. 25, No. 2, pp. 29-40.

Beainy, F., Singh, D., Commuri, S., Zaman, M. (2014). *“Laboratory and Field Study on Compaction Quality of an Asphalt Pavement”*. International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 317-323.

Bessa, J. (2016). *“Betão Betuminoso Temperado com Betume Aditivado em Refinaria com Incorporação de Misturas Recicladas”*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pp. 1-111.

Bijleveld, F. R., Miller, S. R., de Bondt, A. H., Dorée, A. G. (2016). “*Aligning Laboratory and Field Compaction Practices for Asphalt – The Influence of Compaction Temperature on Mechanical Properties*”. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 727-740.

Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2016). “*Pavimentos Rodoviários*”. Edições Almedina, Coimbra, Portugal.

Buchanan, M. S., Brumfield, J., Sheffield, R. (2004). “*Investigation of the Gyration Angle of Superpave Gyration Compactors*”. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, N. 5, p. 444-451.

Capitão, S. (2003). “*Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade*”. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, pp. 1-452.

CEN (2001). “*Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 10: Compaction*”. EN 12697-10, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2002). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 29: Determination of the Dimensions of a Bituminous Specimen*”. EN 12697-29, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2003). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 8: Determination of Void Characteristics of Bituminous Specimens*”. EN 12697-8, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2004). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 31: Specimen Preparation by Gyration Compactor*”. EN 12697-31, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2005). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 25: Cyclic Compression Test*”. EN 12697-25, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007a). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 30: Specimen Preparation by Impact Compactor*”. EN 12697-30:2004+A1, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007b). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 32: Laboratory Compaction of Bituminous Mixtures by Vibratory Compactor*”. EN 12697-32:2003+A1, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007c). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 33: Specimen Prepared by Roller Compactor*”. EN 12697-33:2003+A1, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007d). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 22: Wheel Tracking*”. EN 12697-22:2003+A1, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007e). “*Bitumen and Bituminous Binders – Determination of Needle Penetration*”. EN 1426, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007f). “*Bitumen and Bituminous Binders – Determination of the Softening Point – Ring and Ball Method*”. EN 1427, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007g). “*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 35: Laboratory mixing*”. EN 12697-35:2004+A1, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007h). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 6: Determination of Bulk Density of Bituminous Specimens*”. EN 12697-6:2003+A1, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2007i). “*Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 5: Determination of the Maximum Density*”. EN 12697-5:2002+A1, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2009). “*Bitumen and Bituminous Binders – Specifications for Paving Grade Bitumens*”. EN 12591, European Committee for Standardization, Brussels.

- Chen, J., Lin, C., Stein, E., Hothan, J. (2004). “*Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements*”. Journal of Transportation Engineering, Vol. 130, No. 4, pp. 519-525.
- Comissão Europeia (2018). “*Uma Estratégia Europeia para os Plásticos na Economia Circular*”. Comunicação da Comissão Europeia ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, Estrasburgo, França, pp. 1-19.
- Costa, L., Peralta, J., Oliveira, J., Silva, M. (2017). “*A New Life for Cross-Linked Plastic Waste as Aggregates and Binder Modifier for Asphalt Mixtures*”. Applied Sciences, Vol. 7, No. 603, pp. 1-16.
- Costa, P. (2015). “*Estudo da Compactabilidade em Laboratório de Misturas Betuminosas com Resíduos Plásticos*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, pp. 1-126.
- Dalhat, M., Wahhab, H. (2017). “*Performance of Recycled Plastic Waste Modified Asphalt Binder in Saudi Arabia*”. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 349-357.
- Delgadillo, R., Bahia, H. (2008). “*Effects of Temperature and Pressure on Hot Mixed Asphalt Compaction – A Field and Laboratory Study*”. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, Issue 6, pp. 440-448.
- EAPA (2017). “*Asphalt in Figures 2017*”. European Asphalt Pavement Association. pp. 1-17
- EP (2014). “*Caderno de Encargos Tipo Obra – Pavimentação*”. Estradas de Portugal, S. A., Portugal.
- Ferreira, J., Soares, J., Bastos, J. (2016). “*Métodos de Seleção Granulométrica com Foco na Resistência à Deformação Permanente*”. Revista Transportes, Vol. 24, No. 2, pp. 46-52.
- Fonseca, M. (2018). “*Estudo de Misturas Betuminosas*”. Relatório de Estágio Formal para Admissão à Ordem dos Engenheiros – Região Centro, Colégio de Engenharia Civil, Coimbra.
- Fonseca, M., Almeida, A., Capitão, S., Bandeira, R., Rodrigues, C. (2019). “*Avaliação do Uso de Plástico Recuperado de Sólidos Urbanos Como Agente Modificador de Misturas Betuminosas*”. 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.
- Fonseca, P. (2011). “*Propriedades Volumétricas de Misturas Betuminosas (Com e sem Fibras)*”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, pp. 1-146.
- Freire, A. (2002). “*Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, pp. 1-132.
- Gameiro, A. (2013). “*Produção de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados: Compactabilidade e Comportamento Mecânico*”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, pp. 1-125.
- Gardete, D. (2006). “*Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, pp. 1-186.
- Gardete, D., Picado-Santos, L., Capitão, S. (2018). “*Improving Bituminous Mixture Performance by Optimizing the Design Compaction Energy – A Cost Effective Approach for Better Pavements*”. Construction and Building Materials, Vol. 190, pp. 1173-1181.
- Gardete, D., Picado-Santos, L., Pais, J., Luzia, R. (2008). “*Ensaio Laboratoriais Para Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*”. 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, Moçambique.
- Gardete, D., Picados-Santos, L., Capitão, S. (2016). “*Avaliação da Trabalhabilidade de Misturas Betuminosas com Base nas Curvas de Compactação*”. 8º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

- Georgiou, P., Sideris, L., Loizos, A. (2016). “*Evaluation of the Effects of Gyrotory and Field Compaction on Asphalt Mix Internal Structure*”. *Materials and Structures*, Vol. 49, Issue 1-2, pp. 665-676.
- Gomes, G. (2018). “*O Uso do Compactador Giratório na Formulação de Misturas Betuminosas*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, pp. 1-81.
- Grave, L. (2016). “*Efeito da Temperatura de Compactação nas Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas*”. Dissertação de Mestrado, Centro Universitário UNIVATES, pp. 1-116.
- Hassan, N., Airey, G., Khan, R., Collop, A. (2012). “*Nondestructive Characterisation of the Effect of Asphalt Mixture Compaction on Aggregate Orientation and Segregation Using X-Ray Computed Tomography*”. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 84-92.
- Hofko, B., Blab, R., Alisov, A. (2014). “*Influence of Compaction Direction on Performance Characteristics of Roller-Compacted HMA Specimens*”. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 17, Issue 1, pp. 39-49.
- Hossain, N., Singh, D., Zaman, M. (2016). “*Sensitivity of Traffic Input Parameters on Rutting Performance of a Flexible Pavement Using Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*”. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 9, pp. 450-459.
- Huerne, H. (2004). “*Compaction of Asphalt Road Pavements Using Finite Elements and Critical State Theory*”. PhD Thesis, Civil Engineering and Management Department, University of Twente, pp. 1-319.
- Hunter, A., Airey, G., Collop, A. (2004). “*Effect of Asphalt Mixture Compaction on Aggregate Orientation and Mechanical Performance*”. *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA’04)*, Sun City, South Africa.
- Hunter, R. (2000). “*Asphalts in Road Construction*”. Institution of Civil Engineers Publishing, London, United Kingdom.
- InIR (2019). Disposições Normativas: Critérios de Dimensionamento, <http://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao%20Tcnica/DiretivasConstrucaoPavimentosCritériosDimensionamento.pdf>, página Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP, Portugal, acessado em 3/09/2019.
- IPQ (2008a). “*Misturas Betuminosas Especificações dos Materiais Parte 1: Betão Betuminoso*”. Norma Portuguesa EN 13108-1, Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- IPQ (2008b). “*Misturas Betuminosas Especificações dos Materiais Parte 20: Ensaio de Tipo*”. Norma Portuguesa EN 13108-20, Instituto Português de Qualidade, Portugal.
- Irfan, M., Ali, Y., Iqbal, S., Ahmed, S., Hafeez, I. (2018). “*Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures Using Static, Dynamic and Repeated Creep Load Tests*”. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 43, pp. 5143-5155.
- Iwama, M. (2009). “*Influence of Specimen Size and Orientation on the Mechanical Properties of Laboratory Compacted Asphalt Specimens*”. Master’s Thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, pp. 1-363.
- Javilla, B., Fang, H., Mo, L., Shu, B., Wu, S. (2017). “*Test Evaluation of Rutting Performance Indicators of Asphalt Mixtures*”. *Construction and Building Materials*, Vol. 155, pp. 1215-1223.
- Jiménez, F. (2014). “*Manual de Pavimentação CEPSA*”. Cepsa Portuguesa Petróleos S.A., Lisboa, Portugal.
- Kalantar, Z., Karim, M., Mahrez, A. (2012). “*A Review of Using Waste and Virgin Polymer in Pavement*”. *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 55-62.
- Kim, S., Darabi, M., Little, D., Al-Rub, R. (2018). “*Effect of the Realistic Tire Contact pressure on the Rutting Performance of Asphaltic Concrete Pavements*”. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 2138-2146.

Kok, B., Yilmaz, M., Alataş, T. (2014). “*Evaluation of the Mechanical Properties of Field- and Laboratory-Compacted Hot-Mix Asphalt*”. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 26, Issue 9, pp. 31-41.

Leandro, R., Vasconcelos, K., Bernucci, L. (2017). “*Evaluation of the Laboratory Compaction Method on the Air Voids and the Mechanical Behaviour of Hot Mix Asphalt*”. Construction and Building Materials, Vol. 156, pp. 424-434.

Lehnen, G. (2015). “*Estudo Sobre a Compactação de Misturas Asfálticas em Diferentes Temperaturas*”. Dissertação de Mestrado, Centro Universitário UNIVATES, pp. 1-105.

Leon, L., Charles, R. (2015). “*Impact of Coarse Aggregate Type and Angularity on Permanent Deformation of Asphalt Concrete*”. WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol. 59, pp. 303-313.

Leon, L., Gay, D. (2019). “*Gene Expression Programming for Evaluation of Aggregate Angularity Effects on Permanent Deformation of Asphalt Mixtures*”. Construction and Building Materials, Vol. 211, pp. 470-478.

Li, L., Huang, X., Wang, L., Li, C. (2013). “*Journal of Materials in Civil Engineering*”. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 907-912.

Liu, P., Xu, H., Wang, D., Wang, C., Schulze, C., Oeser, M. (2018). “*Comparison of Mechanical Responses of Asphalt Mixtures Manufactured by Different Compaction Methods*”. Construction and Building Materials, Vol. 162, pp. 765-780.

Liu, Y. (2017). “*Effects of Coarse Aggregate Morphological Characteristics on Mechanical Performance of Stone Matrix Asphalt*”. PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, pp. 1-147.

Manju, R., Sathya, S., Sheema, K. (2017). “*Use of Plastic Waste in Bituminous Pavement*”. International Journal of ChemTech Research, Vol. 10, No. 8, pp. 804-811.

Micaelo, R. (2008). “*Compactação de Misturas Betuminosas: Ensaio de Campo e Modelação Numérica*”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, pp. 1-510.

Mishra, B. (2016). “*Use of Plastic Waste in Bituminous Mixes of Flexible Pavements by Wet and Dry Methods: A Comparative Study*”. International Journal of Modern Engineering Research, Vol. 6, Issue 3, pp. 41-50.

Mishra, B., Gupta, M. (2017). “*A Study on Use of Plastic Coated Aggregates in Bituminous Concrete Mixes of Flexible Pavement*”. International Journal of Engineering Research and Application, Vol. 7, Issue 10, Part-7, pp. 26-33.

Mohammad, L., Wu, Z., Obulareddy, S., Cooper, S., Abadie, C. (2006). “*Permanent Deformation Analysis of Hot-Mix Asphalt Mixtures with Simple Performance Tests and 2002 Mechanical-Empirical Pavement Design Software*”. Journal of the Transportation Research Board, No. 1970, pp. 133-142.

Mollenhauer, K., Wistuba, M. (2015). “*Influence of Asphalt Compaction Procedure on 3D Deformation Properties*”. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 5-12.

Morea, F., Agnusdei, J., Zerbino, R. (2011). “*The Use of Asphalt Low Shear Viscosity to Predict Permanent Deformation Performance of Asphalt Concrete*”. Materials and Structures, Vol. 44, pp. 1241-1248.

Motevalizadeh, S., Ayar, P., Motevalizadeh, S., Yaganeh, S., Ameri, M., Bemana, K. (2018). “*Investigating the Impact of Different Loading Patterns on the Permanent Deformation Behaviour in Hot Mix Asphalt*”. Construction and Building Materials, Vol. 167, pp. 707-715.

Narayan, S., Krishnan, J., Little, D., Rajagopal, K. (2017). “*Mechanical Behaviour of Asphalt Binders at High Temperatures and Specification for Rutting*”. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 916-927.

Nascimento, F., Guimarães, A., Carneiro, L. (2015). “*Análise da Influência das Propriedades do Ligante Asfáltico e do Esqueleto Pétreo na Deformação Permanente de Misturas Asfálticas*”. 18^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Foz do Iguaçu, Brasil.

NCHRP (2002). “*Contribution of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements*”. NCHRP Report 468, National Cooperative Highway Research Program, National Academy Press, Washington D.C., pp. 1-65.

Nouali, M., Derriche, Z., Ghorbel, E., Chuanqiang, L. (2018). “*Plastic Bag Waste Modified Bitumen a Possible Solution to the Algerian Road Pavements*”. Road Materials and Pavement Design, pp. 1-13.

Onofre, F., Bessa, I., Branco, V., Soares, J. (2011). “*Correlação Entre Variáveis de Densificação do Compactador Giratório e Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Convencionais e Com Resíduos*”. Revista Transportes, Vol. 19, No. 1, pp. 13-22.

Partl., M., Flisch, A., Jonsson, M. (2011). “*Comparison of Laboratory Compaction Methods Using X-ray Computer Tomography*”. Road Materials and Pavement Design, Vol. 8, Issue 2, pp. 139-164.

Pereira, P., Miranda, C. (1999). “*Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*”. Universidade do Minho, Braga, Portugal.

Pérez-Jiménez, F., Martínez, A., Miró, R., Hernández-Barrera, D., Araya-Zamorano, L. (2014). “*Effect of Compaction Temperature and Procedure on the Design of Asphalt Mixtures Using Marshall and Gyrotory Compactors*”. Construction and Building Materials, Vol. 65, pp 264-269.

Peterson, R., Mahboub, K., Anderson, R., Masad, E., Tashman, L. (2004). “*Comparing Superpave Gyrotory Compactor Data to Field Cores*”. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 78-83.

Pimentel, C. (2013). “*Formulação de Misturas Betuminosas a Quente: Contribuição Para Um Novo Método de Formulação*”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, pp. 1-124.

Plati, C., Georgiou, P., Loizos, A. (2015). “*Influence of Different Roller Compaction Modes on Asphalt Mix Performance*”. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 64-70.

Polaczyk, P., Han, B., Huang, B., Jia, X., Shu, X. (2018). “*Evaluation of the Hot Mix Asphalt Compactability Utilizing the Impact Compaction Method*”. Construction and Building Materials, Vol. 187, pp. 131-137.

Remišová, E., Zatkalíková, V. (2016). “*Evaluation of Bituminous Binder in Relation to Resistance to Permanent Deformation*”. Procedia Engineering, Vol. 153, pp. 584-589.

Renken, P. (2004). “*The Compaction Resistance of Asphalt Mixes – A Comprehensive Performance Related Property*”. Proceedings of the 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004, Vienna, Austria.

Ribas, C., Thives, L. (2019). “*Evaluation of Effect of Compaction Method on the Macrostructure of Asphalt Mixtures Through Digital Image Processing Under Brazilian Conditions*”. Construction and Building Materials, Vol. 228, pp. 1-14.

Santos, J. (2016). “*Misturas Betuminosas a Quente: Uma Análise à Abordagem Empírica e Fundamental da Norma de Produto*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, pp. 1-100.

Sarang, G., Lekha, B., Krishna, G., Shankar, A. (2016). “*Comparison of Stone Matrix Asphalt Mixtures with Polymer-Modified Bitumen and Shredded Waste Plastics*”. Road Materials and Pavement Design, Vol. 17, No. 4, pp. 933-945.

Scherocman, J., Walker, D. (2019). <http://asphaltmagazine.com/factors-affecting-asphalt-compaction>, página Asphalt Magazine, E.U.A., acessado em 5/09/2019.

SHRP (1991). “*Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*”. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C..

Silva, A. (2014). *“Formulação de Misturas Betuminosas a Quente: Análise Comparativa da Aplicação de Métodos Empíricos e Volumétricos”*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pp. 1-177.

Sullivan, B., Kaloush, K., Witzak, M. (2003). *“Simple Performance Test for Permanent Deformation Evaluation of Asphalt Mixtures”*. 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich, Switzerland.

Swami, B., Mehta, Y., Bose, S. (2004). *“A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials Sourced in India”*. The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 163-173.

Trimbakwala, A. (2017). *“Plastic Roads: Use of Waste Plastic in Road Construction”*. International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 7, Issue 4, pp. 137-139.

Voskuilen, J., Van de Ven, M. (2004). *“Specimen Preparation for Testing, Lab vs Field Preparation: The Spatial Approach”*. Proceedings of the 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004, Vienna, Austria.

Walubita, L., Jamison, B., Alvarez, A., Hu, X., Mushota, C. (2012). *“Air Void Characterisation of HMA Gyratory Laboratory-Moulded Samples and Field Cores Using X-Ray Computed Tomography (X-Ray CT)”*. Journal of The South African Institution of Civil Engineering, Vol. 54, No. 1, pp 22-31.

Wang, X., Shen, Shihui, S., Huang, H., Zhang, Z. (2019). *“Towards Smart Compaction: Particle Movement Characteristics from Laboratory to the Field”*. Construction and Building Materials, Vol. 218, pp. 323-332.

Wang, Y., Lu, Y., Si, C., Sun, T. (2017). *“Finite Element Analysis for Rutting Prediction of Asphalt Concrete Pavement Under Moving Wheel Load”*. International Journal of Simulating Modelling, Vol. 16, No. 2, pp. 229-240.

Wistuba, M. (2014). *“The German Segmented Steel Roller Compaction Method – State-of-the-Art Report”*. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 17, Issue 1, pp. 81-86.

Yinfei, D., Jiaqi, C., Zheng, H., Weizheng, L. (2018). *“A Review on Solutions for Improving Rutting Resistance of Asphalt Pavement and Test Methods”*. Construction and Building Materials, Vol. 168, pp. 893-905.

Ying, G., Xiaoming, H., Wenbin, Y. (2014). *“The Compaction Characteristics of Hot Mixed Asphalt Mixtures”*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, Vol. 29, No. 5, pp. 956-959.

Zhang, C., Wang, H., You, Z., Yang, X. (2016). *“Compaction Characteristics of Asphalt Mixture with Different Gradation Type Through Superpave Gyratory Compaction and X-Ray CT Scanning”*. Construction and Building Materials, Vol. 129, pp. 243-255.

Ziari, H., Kaliji, A., Babagoli, R. (2016). *“Laboratory Evaluation of the Effect of Waste Plastic Bottle (PET) on Rutting Performance of Hot Mix Asphalt Mixtures”*. Petroleum Science and Technology, Vol. 34, No. 9, pp 819-823.

Zou, G., Xu, J., Wu, C. (2017). *“Evaluation of Factors That Affect Rutting Resistance of Asphalt Mixes by Orthogonal Experiment Design”*. International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 10, Issue 3, pp. 282-288.

ANEXO A

Quadro A.1 – Variação de baridade SSD e porosidade de provetes retificados

Provete	Pré-Retificação		Pós-Retificação		Variação		
	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	V _m (%)	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	V _m (%)	$\Delta\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	ΔV_m (%)	
R1	R1.1	2434,18	1,81%	2434,10	1,81%	-0,08	0,00%
	R1.2	2431,11	1,93%	2428,93	2,02%	-2,18	+0,09%
	R1.3	2436,83	1,70%	2440,47	1,56%	+3,64	-0,15%
	R1.4	2436,77	1,70%	2439,21	1,61%	+2,44	-0,10%
	R1.5	2430,75	1,95%	2433,19	1,85%	+2,43	-0,10%
	R1.6	2432,65	1,87%	2440,66	1,55%	+8,01	-0,32%
	R1.7	2433,68	1,83%	2436,41	1,72%	+2,73	-0,11%
	R1.8	2435,22	1,77%	2439,20	1,61%	+3,99	-0,16%
	R1.9	2433,85	1,82%	2436,25	1,73%	+2,40	-0,10%
P1	P1.1	2426,03	2,20%	2435,63	1,81%	+9,60	-0,39%
	P1.2	2439,46	1,65%	2441,28	1,58%	+1,82	-0,07%
	P1.3	2437,44	1,74%	2440,06	1,63%	+2,62	-0,11%
	P1.4	2434,75	1,84%	2438,42	1,70%	+3,67	-0,15%
	P1.5	2431,79	1,96%	2436,55	1,77%	+4,76	-0,19%
	P1.6	2427,68	2,13%	2428,96	2,08%	+1,28	-0,05%
	P1.7	2419,15	2,47%	2425,02	2,24%	+5,87	-0,24%
	P1.8	2428,74	2,09%	2432,51	1,94%	+3,77	-0,15%
	P1.9	2428,67	2,09%	2433,54	1,89%	+4,87	-0,20%
R2	R2.1	2459,57	0,79%	2469,13	0,40%	+9,57	-0,39%
	R2.2	2426,47	2,12%	2448,80	1,22%	+22,33	-0,90%
	R2.3	2453,36	1,04%	2474,21	0,19%	+20,86	-0,84%
	R2.4	2425,79	2,15%	2457,14	0,88%	+31,35	-1,26%
	R2.5	2456,28	0,92%	2468,61	0,42%	+12,34	-0,50%
	R2.6	2449,87	1,18%	2466,46	0,51%	+16,59	-0,67%
P2	P2.1	2437,18	1,75%	2455,82	1,00%	+18,63	-0,75%
	P2.2	2437,21	1,75%	2454,78	1,04%	+17,57	-0,71%
	P2.3	2436,34	1,78%	2454,97	1,03%	+18,63	-0,75%
	P2.4	2434,84	1,84%	2452,83	1,12%	+17,99	-0,73%
	P2.5	2434,56	1,85%	2451,56	1,17%	+17,00	-0,69%
	P2.6	2432,58	1,93%	2454,30	1,06%	+21,72	-0,88%

Quadro A.2 - Dimensões e propriedades volumétricas de provetes produzidos

Provete	Dimensões		Baridades						Porosidade	
	h (cm)	d (cm)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	ρ_w (kg/m ³)	$\rho_{b,ssd}$ (kg/m ³)	$\rho_{b,dim}$ (kg/m ³)	V _m (%)	
R1	R1.1	6,21	14,36	2416,60	1426,20	2417,40	998,38	2434,10	2404,72	1,81%
	R1.2	6,11	14,45	2395,90	1411,70	2396,50	998,38	2428,93	2391,80	2,02%
	R1.3	6,06	14,43	2346,90	1387,20	2347,30	998,38	2440,47	2368,76	1,56%
	R1.4	6,29	14,43	2457,10	1452,10	2457,80	998,38	2439,21	2392,19	1,61%
	R1.5	6,25	14,43	2436,90	1437,70	2437,60	998,38	2433,19	2384,16	1,85%
	R1.6	6,19	14,43	2412,60	1426,40	2413,30	998,38	2440,66	2383,95	1,55%
	R1.7	6,17	14,43	2390,10	1411,10	2390,50	998,38	2436,41	2371,29	1,72%
	R1.8	6,18	14,42	2405,30	1421,30	2405,80	998,38	2439,20	2386,78	1,61%
	R1.9	6,15	14,42	2393,60	1413,60	2394,50	998,38	2436,25	2385,11	1,73%
P1	P1.1	6,11	14,21	2324,70	1372,30	2325,30	998,48	2435,63	2399,10	1,81%
	P1.2	6,14	14,22	2318,60	1370,90	2319,20	998,48	2441,28	2380,40	1,58%
	P1.3	6,14	14,20	2329,90	1377,30	2330,70	998,48	2440,06	2399,73	1,63%
	P1.4	6,05	14,29	2300,50	1359,40	2301,40	998,48	2438,42	2372,07	1,70%
	P1.5	6,09	14,23	2320,70	1370,20	2321,20	998,48	2436,55	2395,10	1,77%
	P1.6	6,13	14,21	2326,60	1370,70	2327,10	998,48	2428,96	2393,93	2,08%
	P1.7	6,11	14,24	2310,20	1359,90	2311,10	998,48	2425,02	2376,74	2,24%
	P1.8	6,05	14,23	2292,00	1352,00	2292,80	998,48	2432,51	2385,74	1,94%
	P1.9	6,11	14,26	2321,00	1369,30	2321,60	998,48	2433,54	2382,13	1,89%
R2	R2.1	6,01	15,01	2597,50	1548,20	2597,80	997,73	2469,13	2443,49	0,40%
	R2.2	6,02	15,01	2557,70	1516,00	2558,10	997,73	2448,80	2402,55	1,22%
	R2.3	5,98	15,03	2583,50	1542,00	2583,80	997,73	2474,21	2437,13	0,19%
	R2.4	6,00	15,01	2567,40	1525,20	2567,70	997,73	2457,14	2419,71	0,88%
	R2.5	6,01	15,07	2597,20	1548,00	2597,70	997,73	2468,61	2423,89	0,42%
	R2.6	5,98	15,01	2580,10	1536,90	2580,60	997,73	2466,46	2438,28	0,51%
P2	P2.1	5,99	15,02	2576,60	1530,10	2576,90	997,73	2455,82	2426,66	1,00%
	P2.2	6,00	15,03	2570,10	1525,80	2570,40	997,73	2454,78	2416,41	1,04%
	P2.3	6,02	15,02	2582,60	1533,20	2582,80	997,73	2454,97	2424,32	1,03%
	P2.4	6,00	15,00	2565,60	1522,30	2565,90	997,73	2452,83	2419,22	1,12%
	P2.5	6,00	15,01	2562,50	1519,70	2562,70	997,84	2451,56	2413,58	1,17%
	P2.6	6,00	15,02	2566,60	1523,50	2567,00	997,84	2454,30	2416,33	1,06%

Quadro A.3 - Dimensões e propriedades volumétricas de provetes produzidos (continuação)

Provete	Dimensões		Baridades						Porosidade	
	h (cm)	d (cm)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	ρ _w (kg/m ³)	ρ _{b,ssd} (kg/m ³)	ρ _{b,dim} (kg/m ³)	V _m (%)	
R3	R3.1	5,90	15,01	2525,50	1502,60	2525,80	997,96	2463,19	2421,10	0,64%
	R3.2	6,04	15,02	2572,10	1527,00	2572,40	997,96	2455,37	2403,48	0,95%
	R3.3	6,01	15,01	2561,40	1520,60	2561,90	997,96	2454,78	2407,03	0,98%
	R3.4	6,01	15,01	2573,30	1528,70	2573,70	997,96	2457,45	2420,02	0,87%
	R3.5	6,01	15,02	2566,70	1523,80	2566,80	997,96	2455,85	2412,41	0,94%
	R3.6	6,03	15,02	2576,00	1528,50	2576,50	997,96	2452,99	2413,01	1,05%
P3	P3.1	5,94	15,01	2526,30	1497,50	2526,50	997,84	2449,81	2405,54	1,24%
	P3.2	6,08	15,02	2591,00	1536,00	2591,20	997,84	2450,17	2407,20	1,22%
	P3.3	6,04	15,02	2586,20	1535,20	2586,50	997,84	2454,70	2417,16	1,04%
	P3.4	6,11	15,01	2595,40	1540,30	2595,50	997,84	2454,33	2401,72	1,06%
	P3.5	6,02	15,05	2565,60	1520,40	2565,70	997,84	2449,12	2397,77	1,27%
	P3.6	6,07	15,01	2595,10	1539,60	2595,30	997,84	2452,88	2417,59	1,11%
R4	R4.2	5,99	15,02	2469,30	1456,10	2471,30	997,84	2427,08	2327,55	2,10%
	R4.3	6,08	15,00	2481,50	1453,70	2482,70	997,61	2405,81	2308,66	2,95%
	R4.4	5,94	15,00	2470,10	1456,30	2471,50	997,84	2427,87	2353,76	2,06%
	R4.6	5,99	15,00	2463,70	1450,80	2465,10	997,84	2423,73	2326,52	2,23%
P4	P4.1	6,00	14,99	2479,40	1457,80	2481,20	998,07	2418,02	2342,13	2,52%
	P4.2	6,01	15,01	2475,80	1455,20	2477,70	998,07	2416,64	2327,75	2,58%
	P4.3	6,05	15,01	2474,80	1454,80	2477,80	998,07	2414,48	2310,76	2,66%
	P4.4	5,98	15,01	2481,50	1461,10	2483,50	998,07	2422,44	2345,10	2,34%
	P4.5	6,01	15,02	2475,20	1455,50	2477,30	998,07	2417,71	2324,96	2,53%
	P4.6	6,01	15,02	2474,10	1456,60	2476,20	998,07	2421,85	2323,34	2,37%

Quadro A.4 - Valores de regressão linear no estudo de compactação dos provetes produzidos no SGC

Conjunto de Provetes	Regressão Linear	R ²	K	v(I)
R2	-4,143ln(x)+19,189	0,9974	4,143	19,189
P2	-4,072ln(x)+19,387	0,9974	4,072	19,387
R3	-3,751ln(x)+17,407	0,9969	3,751	17,407
P3	-3,622ln(x)+16,444	0,9973	3,622	16,444
R4	-3,933ln(x)+17,154	0,9959	3,933	17,154
P4	-3,746ln(x)+16,584	0,9960	3,746	16,584

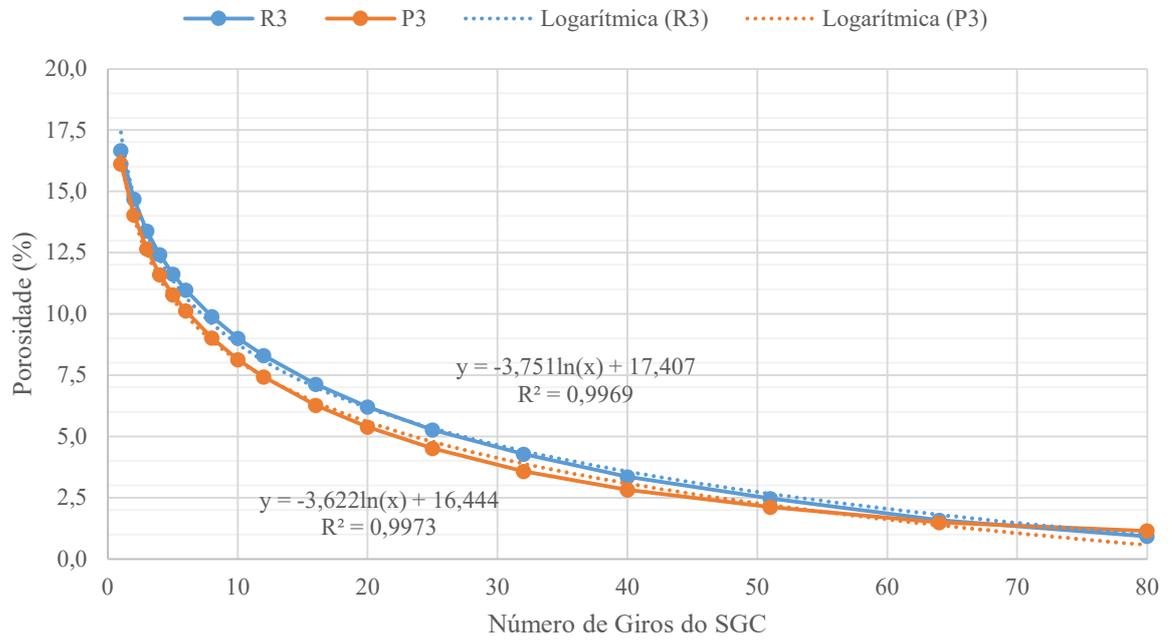


Figura A.1 - Variação da porosidade em função do número de giros do SGC (R3 e P3)

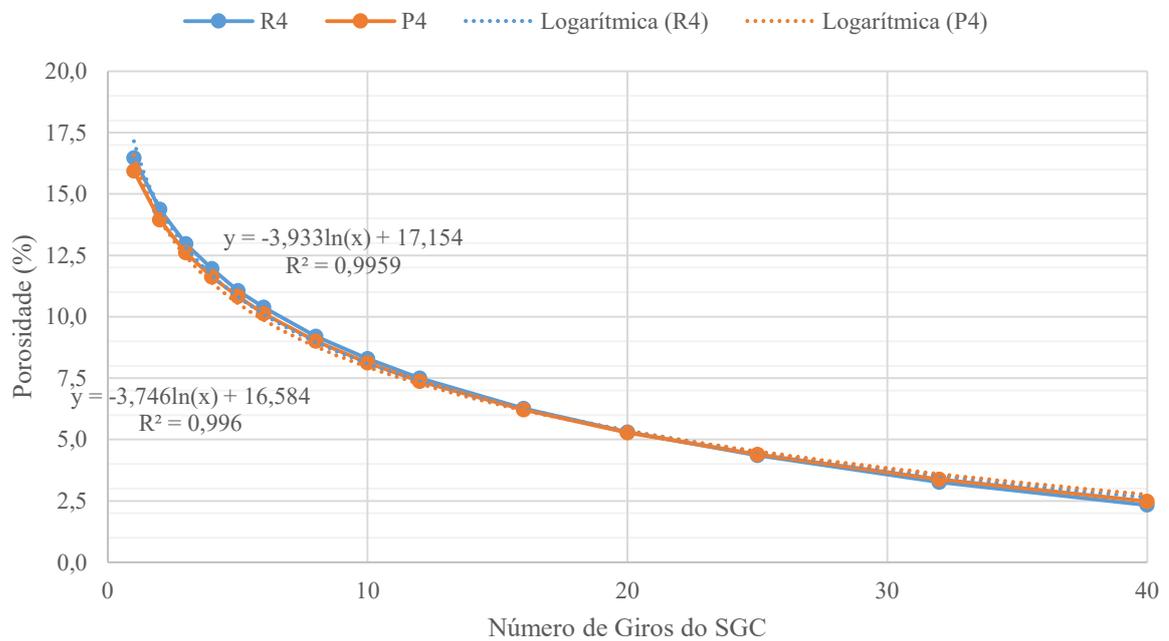


Figura A.2 - Variação da porosidade em função do número de giros do SGC (R4 e P4)

ANEXO B

Quadro B.1 - Resumo da ANOVA a 1 fator (Baridade SSD para a mistura de referência)

Quadro resumo da ANOVA a 1 factor (Baridade SSD/0%PEBD)					
'Source'	'SS'	'df'	'MS'	'F'	'Prob>F'
'Groups'	26532,31052	4	6633,0776	18,8340753	6,74E-06
'Error'	5634,959	16	352,18494	□	□
'Total'	32167,26952	20	□	□	□

Quadro B.2 - Comparação dos conjuntos de amostras (Baridade SSD para a mistura de referência)

Comparação múltipla (Baridade SSD/0%PEBD)					
Grupos a comparar		Diferença	Intervalo de confiança		p-value
R1	R2	-64,263	-27,900	8,463	0,1798
R1	R3	-58,754	-20,185	18,384	0,5161
R1	R4	-22,154	16,415	54,984	0,6927
R1	CV	40,352	82,340	124,328	0,0002
R2	R3	-30,854	7,715	46,284	0,9709
R2	R4	5,746	44,315	82,884	0,0205
R2	CV	68,252	110,240	152,228	0,0000
R3	R4	-4,055	36,600	77,255	0,0884
R3	R5	58,613	102,525	146,437	0,0000
R4	CV	22,013	65,925	109,837	0,0024

Quadro B.3 - Resumo da ANOVA a 1 fator (Baridade SSD para a mistura aditivada)

Quadro resumo da ANOVA a 1 factor (Baridade SSD/6% PEBD)					
'Source'	'SS'	'df'	'MS'	'F'	'Prob>F'
'Groups'	41776,67251	4	10444,168	166,892653	5,79E-14
'Error'	1126,442796	18	62,580155	□	□
'Total'	42903,11531	22	□	□	□

Quadro B.4 - Comparação dos conjuntos de amostras (Baridade SSD para a mistura aditivada)

Comparação múltipla (Baridade SSD/6% PEBD)					
Grupos a comparar		Diferença	Intervalo de confiança		p-value
P1	P2	-36,069	-20,940	-5,811	0,0044
P1	P3	-34,449	-19,320	-4,191	0,0088
P1	P4	-1,519	13,610	28,739	0,0899
P1	CV	96,051	113,520	130,989	0,0000
P2	P3	-13,509	1,620	16,749	0,9974
P2	P4	19,421	34,550	49,679	0,0000
P2	CV	116,991	134,460	151,929	0,0000
P3	P4	17,801	32,930	48,059	0,0000
P3	CV	115,371	132,840	150,309	0,0000
P4	CV	82,441	99,910	117,379	0,0000

Quadro B.5 - Resumo da ANOVA a 1 fator (Deformação permanente para a mistura de referência)

Quadro resumo da ANOVA a 1 factor ($\epsilon 3600/0\%$PEBD)					
'Source'	'SS'	'df'	'MS'	'F'	'Prob>F'
'Groups'	4147281895	4	1,037E+09	162,433656	9,80E-13
'Error'	102128634,8	16	6383039,7	□	□
'Total'	4249410530	20	□	□	□

Quadro B.6 - Comparação dos conjuntos de amostras (Deformação permanente para a mistura de referência)

Comparação múltipla ($\epsilon 3600/0\%$PEBD)					
Grupos a comparar	Diferença	Intervalo de confiança	p-value		
R1 R2	27879,563	32774,940 37670,317	1,01E-08		
R1 R3	26572,563	31764,895 36957,227	1,02E-08		
R1 R4	28690,963	33883,295 39075,627	1,02E-08		
R1 CV	27941,245	33593,940 39246,635	1,02E-08		
R2 R3	-6202,377	-1010,045 4182,287	0,9737		
R2 R4	-4083,977	1108,355 6300,687	0,9634		
R2 CV	-4833,695	819,000 6471,695	0,9912		
R3 R4	-3354,798	2118,400 7591,598	0,7592		
R3 CV	-4082,685	1829,045 7740,775	0,8739		
R4 CV	-6201,085	-289,355 5622,375	0,9999		

Quadro B.7 - Resumo da ANOVA a 1 fator (Deformação permanente para a mistura aditivada)

Quadro resumo da ANOVA a 1 factor ($\epsilon 3600/6\%$PEBD)					
'Source'	'SS'	'df'	'MS'	'F'	'Prob>F'
'Groups'	426708469,2	4	106677117	73,1387756	7,00E-11
'Error'	26254036,88	18	1458557,6	□	□
'Total'	452962506,1	22	□	□	□

Quadro B.8 - Comparação dos conjuntos de amostras (Deformação permanente para a mistura aditivada)

Comparação múltipla ($\epsilon 3600/6\%$PEBD)					
Grupos a comparar	Diferença	Intervalo de confiança	p-value		
P1 P2	8573,180	10882,820 13192,460	0,0000		
P1 P3	7096,200	9405,840 11715,480	0,0000		
P1 P4	8893,806	11203,446 13513,086	0,0000		
P1 CV	3924,392	6591,334 9258,276	0,0000		
P2 P3	-3786,620	-1476,980 832,660	0,3360		
P2 P4	-1989,014	320,626 2630,266	0,9929		
P2 CV	-6958,428	-4291,486 -1624,544	0,0010		
P3 P4	-512,034	1797,606 4107,246	0,1737		
P3 CV	-5481,448	-2814,506 -147,564	0,0358		
P4 CV	-7279,054	-4612,112 -1945,170	0,0005		