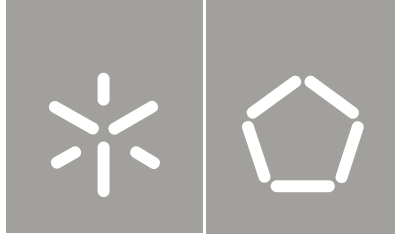




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Luís Coelho Martins

Efeito da Composição das Misturas
Betuminosas na Sensibilidade à Água e
Resistência à Deformação Permanente



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Luís Coelho Martins

Efeito da Composição das Misturas
Betuminosas na Sensibilidade à Água e
Resistência à Deformação Permanente

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

Outubro de 2012

Dedico este trabalho à minha família, nomeadamente aos meus pais e irmão, e ainda que não sendo da família oficialmente, mas já da família por tudo o que significa, à minha namorada Catarina Carvalho. Sem eles nada disto seria possível, pela sua compreensão, carinho e paciência.

Uma dedicatória muito especial e póstuma ao meu Padrinho João Coelho, uma pessoa que perdi já no decorrer deste trabalho, por toda a amizade, apoio e bons momentos passados juntos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PTDC/ECM/119179/2010, “Desenvolvimento de materiais multifuncionais com resíduos plásticos para pavimentação de estradas – PLASTIROADS”.

A realização deste trabalho só foi possível com as condições e meios posto à minha disposição pelo Grupo de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Agradeço pois a esta que foi a minha “casa” durante muitos anos e que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Doutor Hugo Silva, pela paciência, pela disponibilidade demonstrada, pelo apoio e acompanhamento e por toda a dedicação e conhecimento com que efetuou a orientação deste trabalho, desde o seu início ao seu termino.

Gostaria de agradecer aos técnicos de laboratório que me acompanharam neste trabalho, nomeadamente ao Engenheiro Carlos Palha e ao Hélder Torres, pelo apoio, ensinamentos transmitidos, pela disponibilidade e pelo cuidado e empenho demonstrados na execução dos trabalhos.

Quero agradecer aos meus pais, Joaquim e Graça, e ao meu irmão, Luís Miguel, por todo o apoio e paciência ao longo desta minha caminhada. Sem eles eu não teria conseguido chegar até aqui. A eles o meu muito obrigado.

À minha namorada Catarina Carvalho agradeço pela força, carinho, amizade, compreensão e paciência demonstrada durante a realização do trabalho. Ela foi sem dúvida um apoio que me deu toda a força para realizar este trabalho. As suas palavras foram encorajadoras e determinantes para a conclusão deste meu percurso. À Catarina o meu muito obrigado.

Aos meus amigos também gostaria de agradecer pois estiveram sempre ao meu lado ao longo destes anos.

Efeito da composição das misturas betuminosas na sensibilidade à água e resistência à deformação permanente

RESUMO

Os pavimentos podem degradar-se por diversas razões, comprometendo a sua durabilidade. A ocorrência de deformações permanentes e de degradações por sensibilidade à água são um dos exemplos da redução da durabilidade, em especial em países com grande pluviosidade, com menor qualidade de alguns materiais ou com altas temperaturas ambientais, como se verifica em várias economias emergente onde algumas empresas nacionais se estão a instalar. Assim, verifica-se que é importante estudar a influência que a composição das misturas pode ter na ocorrência destes fenómenos, analisando os fatores que podem influenciar estas patologias, tais como a granulometria, a máxima dimensão dos agregados e o tipo/teor em betume. O objetivo deste trabalho é perceber como é que a granulometria, ou a utilização de um betume mais duro ou mais mole, podem influenciar a resistência da mistura à deformação permanente e a sua sensibilidade à água.

Assim, foram estudadas cinco misturas que possuem diferentes tipos de composição, sendo que em quatro delas variou-se o fuso granulométrico e o diâmetro máximo dos agregados, e na outra mistura alterou-se o tipo de betume utilizado. Devido à variação destes parâmetros foi possível verificar o efeito do teor em betume nos resultados. Neste estudo foram utilizados ensaios de pista (EN 12697-22) para estudar a deformação permanente, e os procedimentos experimentais da norma EN 12697-12 para estudo da sensibilidade à água, que são os procedimentos mais utilizados para estudar estes comportamentos nos países europeus.

O trabalho realizado permitiu concluir que a composição das misturas influencia bastante a resistência à deformação permanente e a sensibilidade à água. A deformação permanente é mais influenciada pelo tipo e teor em betume, apresentando o pior resultado com um betume mais mole ou granulometrias próximas do fuso superior (com um teor em betume mais alto), e o melhor resultado foi obtido para a granulometria próxima do fuso inferior. O melhor resultado de sensibilidade à água foi obtido para a mistura com uma maior dimensão máxima e para a granulometria baseada no fuso superior, e o pior resultado foi obtido para a mistura com granulometria baseada no fuso inferior. De facto, o maior volume de vazios e a menor quantidade de betume a envolver os agregados origina misturas mais sujeitas à ação da água.

PALAVRAS-CHAVE: Granulometria; Deformação permanente; Sensibilidade à água; Teor em betume; Volume de vazios.

Influence of the composition of asphalt mixtures on the water sensitivity and rutting resistance

ABSTRACT

Pavements can distress for various reasons, reducing its durability. The occurrence of rutting and other degradations caused by water sensitivity are examples of a reduced durability, particularly in countries with high rainfall, lower quality of some materials or high ambient temperatures, as is the case of many emerging economies where some national companies are starting to work. Thus, it is important to study the influence that the mixture composition may have in the occurrence of these two phenomena, analyzing the factors that may influence these pathologies, such as the aggregate grading and maximum size and the type/content of bitumen. The objective of this work is to understand the way that grading and the use of hard/soft bitumen can influence the rutting resistance and water sensitivity of asphalt mixtures.

Thus, five mixtures with different composition were studied, varying the aggregate grading envelope and maximum size in four of them, and using a different type of bitumen in the other. By changing these parameters it was also possible to verify the effect of the bitumen content in the mixture performance. The tests used in this study were the wheel tracking test (EN 12697-22), in order to study the rutting resistance, and the experimental procedures of EN 12697-12 to study the sensitivity to water, as both are the procedures most commonly used to study these behaviors in European countries.

This work showed that the mixture composition greatly influences the rutting resistance and water sensitivity. The permanent deformation is more influenced by the type and content of bitumen, presenting the worst results with a softer bitumen or an aggregate grading near the superior limit of the envelope (which uses a higher bitumen content), while the best result was obtained for the aggregate grading near the inferior limit of the envelope. Concerning the water sensitivity performance, the best result was obtained for the mixture with a higher maximum size of aggregates and for the aggregate grading based in the over limit of the envelope, and the worst result was obtained for the aggregate grading based in the under limit of the envelope. In fact, higher values of voids content and lower amounts of bitumen evolving the aggregates results in mixtures with higher sensitivity to water.

KEYWORDS: Grading; Permanent deformation; Water sensitivity; Bitumen content; Voids volume.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento temático	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Conteúdo da dissertação	2
2	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	5
2.1	Deformação permanente de misturas betuminosas	5
2.1.1	Influência da temperatura na deformação permanente	Erro! Marcador não definido.
2.1.2	Influência do tráfego na deformação permanente	Erro! Marcador não definido.
2.2	Sensibilidade à água de misturas betuminosas	12
2.3	Influência da composição da mistura betuminosa na deformação permanente e na sensibilidade à água	13
2.3.1	Influência da granulometria	13
2.3.2	Influência do tipo de betume	17
2.3.3	Influência do teor em betume	20
2.4	Estudos de caracterização da deformação permanente	20
2.5	Estudos de análise da sensibilidade à água das misturas betuminosas	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	25
3.1	Introdução	25
3.2	Caracterização dos materiais utilizados	25
3.3	Metodologia utilizada	26
3.3.1	Metodologia escolhida para definição das curvas granulométricas	26
3.3.2	Definição e cálculo da percentagem de betume	38
3.3.3	Preparação dos agregados	40
3.3.4	Preparação dos betumes	40
3.3.5	Ensaio de penetração	42
3.3.6	Ensaio de anel e bola para determinação do ponto de amolecimento	43
3.3.7	Produção e compactação das misturas betuminosas	44
3.3.8	Baridade máxima teórica e volume de vazios das misturas	47

3.3.9	Ensaio de pista	48
3.3.10	Ensaio da sensibilidade à água	50
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TRABALHO EXPERIMENTAL	55
4.1	Caracterização do betume com base nas normas europeias	52
4.2	Estudo da deformação permanente	55
4.3	Sensibilidade à água	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.1	Conclusões	69
5.2	Estudos futuros	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diferentes tipos de formação de rodeiras (adaptado de Branco <i>et al.</i> , 2005).....	6
Figura 2.2 – Efeito da temperatura na deformação permanente em misturas betuminosas em ensaios triaxiais realizados a 40 °C e 60 °C (Sargand e Kim, 2003)	Erro! Marcador não definido.
Figura 2.3 – Zonas climáticas de Portugal continental (Baptista e Picado-Santos, 2002)	Erro! Marcador não definido.
Figura 2.4 – Fatores que influenciam a durabilidade das misturas betuminosas (adaptado de Copeland, 2007).....	13
Figura 2.5 – Estados da curva de fluência no ensaio de compressão uniaxial (adaptado de Little <i>et al.</i> , 1993)	22
Figura 3.1 – Representação das curvas de máxima compactidade para várias dimensões máximas de agregados (Pavement Interactive, 2009).....	28
Figura 3.2 – Zona restrita na curva de máxima compactidade (Pavement Interactive, 2009).....	28
Figura 3.3 – Requisito do fuso granulométrico AC 14 surf (EP, 2008) em comparação com o proposto pelo SUPERPAV para uma curva de granulometria (D=19mm) equivalente	30
Figura 3.4 – Curva de referência para a mistura 14Gm34.....	31
Figura 3.5 – Curva de referência para mistura 14Gi34	31
Figura 3.6 – Curva de referência para mistura 14Gs34.....	32
Figura 3.7 – Requisito do fuso granulométrico da mistura AC 20 Base (EP, 2008).....	33
Figura 3.8 – Curva de referência para a mistura 20Gm34.....	33
Figura 3.9 – Curva de referência para a mistura 14Gm89.....	34
Figura 3.10 – Curva granulométrica efetiva das misturas 14Gm34 e 14Gm89	34
Figura 3.11 – Curva granulométrica efetiva da mistura 14Gi34	35
Figura 3.12 – Curva granulométrica efetiva da mistura 14Gs34.....	35
Figura 3.13 – Curva granulométrica efetiva da mistura 20Gm34	36
Figura 3.14 – Curvas granulométricas efetivamente utilizadas para as várias misturas	36
Figura 3.15 – Aspeto do esqueleto mineral obtido com as diferentes granulometrias nas misturas produzidas para o ensaio de pista	37
Figura 3.16 – Estufa utilizada para manter os agregados secos e manter os materiais às temperaturas de mistura	40

Figura 3.17 – Equipamento para aquecimento do betume e produção do betume 70/100	41
Figura 3.18 – Imagem do equipamento do ensaio de penetração	42
Figura 3.19 – Esquema representativo do ensaio de anel e bola.....	43
Figura 3.20 – Ensaio de anel e bola realizado no laboratório	44
Figura 3.21 – Misturadora com mistura betuminosa	46
Figura 3.22 – Amostra retirada para determinação da baridade máxima teórica	46
Figura 3.23 – Cilindro de rasto liso e mistura a compactar	47
Figura 3.24 – Laje acondicionada e preparada para o ensaio de pista	49
Figura 3.25 – Pormenor do aumento nas cantoneiras para a laje com 6 cm de altura	49
Figura 3.26 – Imagem do ensaio de pista realizado	50
Figura 3.27 – Preparação dos carotes para os ensaios de sensibilidade à água	51
Figura 3.28 – Ensaio de tração indireta.....	52
Figura 4.1 – Variação da deformação permanente das duas lajetas da mistura 14Gi34 no ensaio de pista e representação do resultado médio equivalente da mistura	57
Figura 4.2 – Variação da deformação permanente durante os ensaios de pista.....	57
Figura 4.3 – Profundidade de rodeira de cada mistura em estudo no ensaio de pista.....	58
Figura 4.4 – Resultados de deformação WTS_{air} no ensaio de pista vs. volume de vazios.....	60
Figura 4.5 – Efeito da granulometria dos agregados nos resultados do ensaio de pista	60
Figura 4.6 – Efeito do diâmetro máximo dos agregados nos resultados do ensaio de pista.....	61
Figura 4.7 – Efeito do tipo de betume nos resultados do ensaio de pista	61
Figura 4.8 – Gráfico comparativo entre o volume de vazios e o valor de ITSR.....	64
Figura 4.9 – Tipo de rotura observada nos ensaios de tração indireta	65
Figura 4.10 – Esquema utilizado para cálculo da deformação efetiva na rotura	65
Figura 4.11 – Efeito da granulometria dos agregados na resistência à tração indireta.....	67
Figura 4.12 – Efeito da dimensão máxima dos agregados na resistência à tração indireta	67
Figura 4.13 – Efeito do tipo de betume na resistência à tração indireta	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Variação de fatores que podem influenciar a deformação permanente em misturas betuminosas (Sousa <i>et al.</i> , 1991)	8
Tabela 2.2 – Tabela de agregados utilizados nas misturas betuminosas (APORBET, 1998).....	Erro! Marcador não definido.
Tabela 3.1 – Quantidade de material utilizado para produzir cada mistura	37
Tabela 3.2 – Teor em betume para cada mistura	39
Tabela 3.3 – Quantidades em gramas que compõe as diferentes amassaduras/lajes.....	45
Tabela 4.1 – Resumo da norma EN 12591 para classificação de betumes	52
Tabela 4.2 – Penetração e ponto de amolecimento dos betumes 35/50 e 70/100 utilizados	53
Tabela 4.3 – Temperaturas de fabrico de mistura o seu fabrico e antes compactação	55
Tabela 4.4 – Valores da baridade aparente, baridade máxima teórica e do volume de vazios das lajetas utilizadas no ensaio de pista	55
Tabela 4.5 – Dimensões de cada lajeta do ensaio de pista	56
Tabela 4.6 – Resultados de deformação permanente no ensaio de pista.....	58
Tabela 4.7 – Temperaturas das misturas usadas no ensaio de sensibilidade à água.....	62
Tabela 4.8 – Baridade máxima teórica, baridade aparente e volume de vazios dos carotes ensaiados à sensibilidade à água	62
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de sensibilidade à água (ITSR).....	63
Tabela 4.10 – Deformação efetiva na rotura de cada mistura em estudo	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

Ao longos dos anos tem-se vindo a desenvolver vários estudos para tentar perceber melhor o comportamento das misturas betuminosas, como é o caso da deformação permanente e a sensibilidade à água, que são fatores que influenciam a durabilidade dos pavimentos.

A deformação permanente tem, ao longo do tempo, uma importância muito grande no desempenho do pavimento, pois para além de condicionar a vida útil do pavimento e o seu desempenho, tem também uma importância muito grande na segurança dos utentes. Tem-se vindo a desenvolver esforços nas áreas dos materiais para conseguir melhorar a sua resistência à deformação. Porém, os métodos utilizados nos estudos são habitualmente empíricos, e não dão uma avaliação muito correta do desempenho no terreno (Sousa *et al.*, 1991).

É pois fundamental conhecer o modo como a composição das misturas betuminosas influencia o comportamento do pavimento, com uma maior incidência no estudo da influência da granulometria das misturas (granulometria com mais ou menos finos, granulometrias com dimensão máxima dos agregados diferente). Também é muito importante verificar qual a influência do tipo de betume utilizado, pois este é um fator muito importante em especial na resistência à deformação permanente de um pavimento.

Países como Angola e Moçambique estão em crescimento, e várias empresas da área rodoviária têm procurado entrar nesse mercado, havendo necessidade duma adaptação à realidade desses locais. Nestes países verifica-se uma maior probabilidade de ocorrer deformação permanente nos pavimentos devido, em grande parte, às temperaturas elevadas, mas também por problemas em relação à qualidade dos materiais disponíveis. Torna-se assim necessário realizar um estudo em laboratório para tentar perceber como simular este efeito para melhorar as misturas, ou as formas como os pavimentos são efetuados, para garantir um comportamento adequado.

Por outro lado, nos países com maior quantidade de precipitação, os pavimentos podem apresentar problemas de desagregação se as misturas forem mais sensíveis à água. Por isso é importante compreender em laboratório se existe possibilidade de melhorar as misturas

betuminosas para efetuar pavimentos mais duradouros e com melhor desempenho quando aplicados em climas mais húmidos.

1.2 Objetivos

Neste trabalho estudou-se qual a influência que a composição das misturas betuminosas tem na resistência à deformação permanente, comparando para isso três tipos de curvas granulométricas diferentes, uma mistura com dimensão máxima mais alta e outra com um betume mais mole. Ao mesmo tempo verificou-se qual das granulometrias apresenta uma maior sensibilidade à água.

Com este trabalho pretende compreender-se se o facto de definir granulometrias diferentes, mas com curvas granulométricas apenas nos limites dos fusos, influencia a deformação permanente e a sensibilidade à água. Para além disto também foi estudado se o facto de as misturas terem diferentes dimensões máximas, e betumes com diferentes penetrações (35/50 e 70/100), influencia os comportamentos atrás referidos. Utilizamos como dimensão máxima normal dos agregados 14 mm e 20 mm como alternativa. O betume usado normalmente foi o 35/50, por ser um betume muito utilizado em Portugal, e o 70/100 foi a alternativa por ser um betume mais mole bastante comum noutros países.

O ensaio utilizado para caracterizar a deformação permanente foi o ensaio de pista, normalizado pela norma europeia EN 12697-22. Quanto aos procedimentos de ensaio realizados neste trabalho para estudar a sensibilidade à água, esses são apresentados na norma europeia EN 12697-12.

1.3 Conteúdo da dissertação

O presente trabalho está organizado em cinco partes. O primeiro capítulo deste trabalho apresenta uma abordagem sobre a deformação permanente e a sensibilidade à água, assim como a sua importância para um bom desempenho dos pavimentos. Também são descritos os objetivos deste trabalho e, numa última fase, indica-se a composição de cada uma das partes do trabalho.

No segundo capítulo faz-se uma revisão do estado de arte sobre a temática. Neste capítulo fala-se sobre os conceitos de deformação permanente e sensibilidade à água, sobre os fatores que mais os influenciam. Por fim refere-se os estudos já efetuados no âmbito da avaliação destas duas patologias dos pavimentos.

No capítulo 3 explica-se todos os procedimentos experimentais. Neste capítulo está explicada a escolha dos materiais a utilizar e a composição das curvas granulométricas. Depois refere-se toda a forma como se procedeu para o fabrico das lajetas e dos carotes para serem ensaiados. Também é explicado o procedimento para o fabrico do betume 70/100, por este não existir em laboratório. Numa última fase indicam-se os procedimentos dos ensaios de pista (*wheel tracking test* ou WTT) e de sensibilidade à água.

O capítulo 4 apresenta todos os resultados obtidos no trabalho. Numa primeira parte apresenta-se e analisa-se os resultados obtidos para estudo dos betumes utilizados no trabalho (esses ensaios foram os de penetração a 25 °C e o ensaio de anel e bola). Seguidamente é feita a análise e apresentação os resultados dos ensaios de pista e de sensibilidade à água, que permitem retirar as principais conclusões deste trabalho.

O quinto capítulo apresenta as conclusões retiradas do trabalho assim como a proposta de trabalhos futuros a realizar na continuação deste trabalho.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Deformação permanente de misturas betuminosas

A resistência à deformação permanente tem grande importância no desempenho do pavimento pois, para além de condicionar a vida útil do pavimento e o seu desempenho, tem também grande importância na segurança dos utentes. Tem-se realizado estudos nas áreas dos materiais para conseguir melhorar a sua resistência à deformação. Porém, como estes métodos são empíricos, não dão uma avaliação muito correta da forma como os materiais se desempenham no terreno (Sousa *et al.*, 1991).

Existem variados tipos de deformações permanentes observáveis na superfície dum pavimento, nomeadamente (Branco *et al.*, 2005):

- Abatimento (longitudinal, transversal);
- Ondulação;
- Deformações localizadas;
- Rodeiras.

O abatimento é uma deformação com uma extensão significativa, podendo apresentar-se ao longo do pavimento (abatimento longitudinal) ou na direção transversal (abatimento transversal). A localização do abatimento longitudinal pode ser junto das bermas, derivado da redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação pela entrada de água junto das bermas ou na zona de interface berma/pavimento. Quando o abatimento se localiza junto do eixo do pavimento pode ser devido ao fendilhamento ao longo desse eixo, o qual permite a passagem da água através do pavimento para camadas granulares e solo de fundação, reduzindo assim a capacidade de suporte. Quanto ao abatimento transversal, este tem uma localização que depende das patologias nas camadas inferiores, principalmente no solo de fundação (Branco *et al.*, 2005).

Outro tipo de deformação transversal é a ondulação, a qual se repete ao longo do pavimento com uma determinada frequência. A ondulação pode ocorrer na camada de desgaste devido a uma deficiente distribuição de ligante, e nas camadas de betão betuminoso em que ocorra o arrastamento da mistura por excessiva deformação plástica (devido à ação do tráfego). Pode

ainda resultar da deformação da fundação, o que provoca uma ondulação leve no pavimento (Branco *et al.*, 2005).

Segundo Branco *et al.* (2005) a deformação localizada ocorre numa pequena área do pavimento e normalmente origina rotura do pavimento.

As rodeiras são deformações longitudinais que ocorrem nas zonas de passagem dos pneus dos veículos. Esta deformação é a mais frequente e significativa de todas, e podem assumir, vendo pelo perfil transversal, dois tipos que são as rodeiras de pequeno raio e rodeiras de grande raio (Branco *et al.*, 2005). Na Figura 2.1 estão representados tipos de rodeiras e quais as suas origens, nas quais também se inclui rodeiras por desgaste.

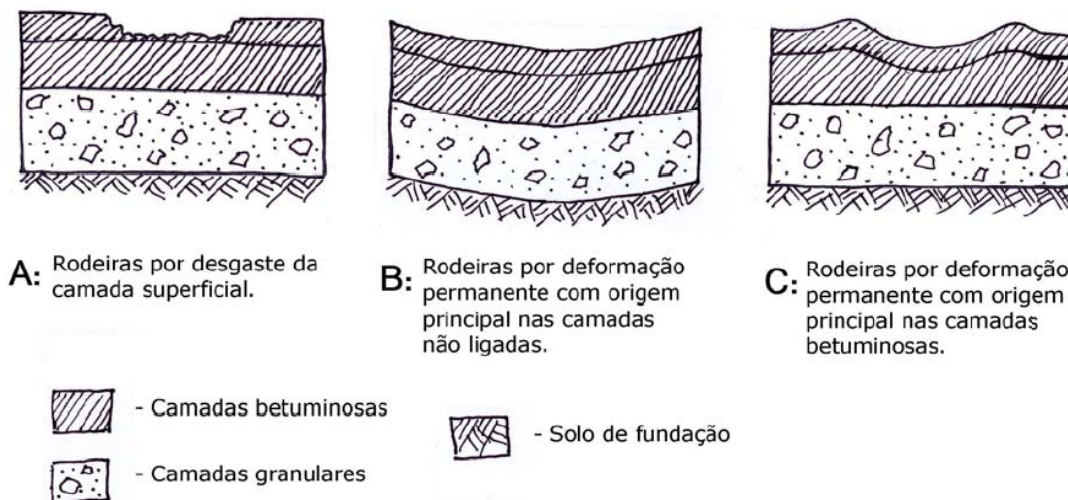


Figura 2.1 – Diferentes tipos de formação de rodeiras (adaptado de Branco *et al.*, 2005)

Ao analisar o esquema da Figura 2.1, Gardete (2006) escreveu sobre o caso A como um caso em que as rodeiras ocorrem devido à degradação da camada superficial do pavimento, contribuindo apenas esta camada para a formação das rodeiras. Este tipo de rodeira é pouco frequente em Portugal, pois são provocadas por correntes de neve e por pneus pitonados, mais comuns em países frios. No caso da situação B as rodeiras são provocadas por deformação do solo de fundação, e apesar das camadas do pavimento manterem a sua espessura estas também se deformam a fim de acompanhar o movimento da fundação. Por último, no caso C a rodeira é causada pela deformação das camadas betuminosas que acontece fundamentalmente à superfície, pois é a zona que está mais sujeita a cargas e ações climáticas desfavoráveis. Assim, as rodeiras do tipo C são mais comuns em países quentes como Portugal e são

caracterizadas por serem de pequeno raio e pela formação de pequenas elevações laterais que as acompanham.

Pereira e Picado Santos (2002) referem que as causas mais importantes para a deformação permanente, por ordem descendente, são:

- Compacidade insuficiente das camadas estruturais do pavimento;
- Deficientes condições de drenagem, inclusive as resultantes de um pavimento fendilhado;
- Deficiente capacidade de suporte do solo de fundação;
- Ação do ciclo “gelo-degelo”;
- Subdimensionamento das camadas granulares.

Zaniewski e Harsha (2003) afirmam que a deformação pode ser maior quando a consolidação das camadas mais grossas se dá pela ação do tráfego após a sua construção, pois se acontecer uma fraca compactação, o tráfego que lá passa oferece uma ação constante de pressão que se vão transformando em deformações do pavimento.

Os fatores que alteram a resistência das misturas betuminosas à deformação permanente são (Gardete, 2005):

- As propriedades dos ligantes, além das características que dependem do tipo de composição e das proporções da mistura betuminosa;
- Ações exteriores, como são as ações climatéricas, em especial a temperatura e o tráfego, definido pelo número de veículos pesados, pelas cargas por eixo, tipo de pressão dos pneus e velocidades praticadas.

Sousa *et al.* (1991) apontaram uma série de fatores que influenciam a deformação permanente das misturas betuminosas, os quais se identificam na Tabela 2.1, onde também se apresenta o efeito destes.

O estudo da deformação permanente em misturas betuminosas é muito complexo pois depende de vários fatores ambientais (clima), do tipo de aplicação da mistura e da composição da própria mistura betuminosa em si, sendo que o tráfego também influencia bastante a sensibilidade das misturas à deformação (Furlan *et al.*, 2004).

Tabela 2.1 – Variação de fatores que podem influenciar a deformação permanente em misturas betuminosas (Sousa *et al.*, 1991)

Fator		Variação observada	Efeito da deformação permanente
Agregado	Textura superficial	Lisa a rugosa	Diminui
	Granulometria	Descontínua a contínua	Diminui
	Forma	Rolado a britado	Diminui
		Lamelar a cúbico	Diminui
	Dimensão máxima	Aumento	Diminui
Betume	Rigidez (a)	Aumento	Diminui
Mistura betuminosa	Teor em betume	Aumento	Aumenta
	Porosidade	Aumento	Aumenta (b)
	VMA	Aumento	Aumenta (c)
	Processo de compactação	(d)	(d)
Condições de serviço	Temperatura	Aumento	Aumenta
	Carga por roda	Aumento	Aumenta
	Pressão dos pneus	Aumento	Aumenta
	Número de aplicações de carga	Aumento	Aumenta
	Teor em água	Seco ou húmido	Aumenta (e)
	Velocidade de aplicação da carga	Aumento	Diminui

Legenda: VMA – volume de vazios na mistura de agregados;

- (a) Refere-se à rigidez do betume correspondente à temperatura para a qual a formação de cavado de rodeiras é mais determinante. Se o betume utilizado for modificado aumenta o módulo de rigidez do betume para temperaturas críticas, diminuindo assim a suscetibilidade à deformação permanente;
- (b) Quando a porosidade é da ordem de 3% a 4% ou inferior, a diminuição da porosidade correspondente a um aumento da propensão para deformações permanentes;
- (c) Valores de VMA muito baixos, inferiores a 10%, deverão ser evitados;
- (d) O processo de compactação, quer em laboratório, quer em obra, influencia a estrutura do esqueleto mineral da mistura betuminosa, pelo que o comportamento à deformação permanente é afetado;
- (e) Caso a mistura betuminosa seja sensível à água.

Os ensaios para caracterização da deformação permanente nos pavimentos podem ser agrupados nas seguintes categorias (Brown *et al.*, 2001):

– Ensaios empíricos:

- Marshall;
- Ensaio de Hveem.

– Ensaios fundamentais:

- Ensaio de compressão uniaxial estático (ensaio de fluência) ou cíclico;
- Ensaio de compressão triaxial, geralmente com cargas cíclicas;
- Ensaio de corte com aplicação de cargas estáticas ou cíclicas;
- Ensaio de compressão diametral (cargas estáticas ou cíclicas);

- Ensaio em cilindro oco, que aplica simultaneamente tensões axiais e de corte.
- Ensaio de simulação:
 - Ensaio de pista ou de simulação de tráfego em laboratório (*wheel tracking*);
 - Ensaio de simulação de tráfego em pista à escala real.

Previtera (1974) afirmou que o amolecimento das misturas betuminosas ocorre devido à absorção dos raios solares por parte da superfície do pavimento, e às temperaturas elevadas do ar. O amolecimento provoca maiores deformações elásticas e plásticas dos pavimentos, o que se pode transformar em deformações permanentes sob ação das cargas. O mesmo autor observou que deformações elásticas e plásticas chegavam a ser três vezes maiores no Verão que no Inverno.

Em zonas com altas temperaturas à superfície do pavimento assiste-se a uma deformação maior no pavimento, pois a viscosidade do ligante betuminoso diminui a altas temperaturas, o que provoca uma diminuição da sua capacidade de carga (Zaniewski *et al.*, 2003).

Sousa *et al.* (1994) também referem que as características plásticas das misturas betuminosas influenciam a deformação permanente, sendo que estas misturas nos dias de grande calor sofrem uma deformação maior devido ao seu amolecimento.

O comportamento das misturas betuminosas, ao contrário de outros materiais utilizados na construção de pavimentos flexíveis, depende muito da temperatura. As camadas betuminosas, condicionadas pelo comportamento do betume asfáltico, exibem a temperaturas baixas um comportamento elástico, a temperaturas intermédias um comportamento viscoelástico e a temperaturas elevadas um comportamento viscoso ou plástico. Assim, as deformações permanentes ocorrem a temperaturas mais elevadas, que é quando o módulo de deformabilidade é menor (Baptista, 2006).

A temperatura afeta as duas componentes da deformação permanente (irreversível e reversível) em misturas betuminosas, contribuindo para que ocorra uma maior deformação por corte na mistura, mas também para que ocorra uma maior densificação. Na Figura 2.2 pode observar-se o efeito da temperatura na deformação permanente (Gardete, 2006).

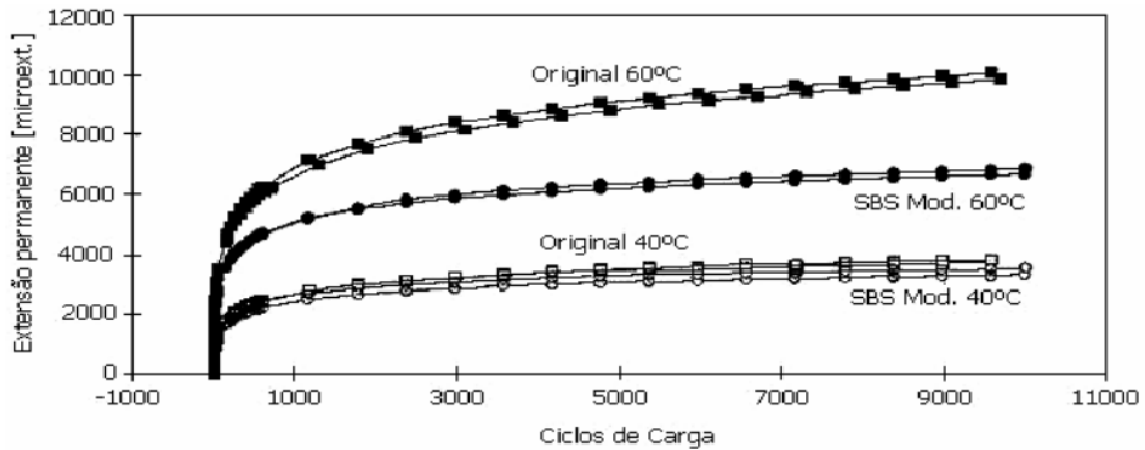


Figura 2.2 – Efeito da temperatura na deformação permanente em misturas betuminosas em ensaios triaxiais realizados a 40 °C e 60 °C (Sargand e Kim, 2003)

Segundo Baptista (2006), a localização da obra e o tipo de betume utilizado influenciam a temperatura utilizada nos ensaios da deformação permanente. As zonas definidas para Portugal são quatro, sendo elas a Zona Quente, Zona Média Sul Mondego, Zona Média Norte Mondego e Zona temperada (Baptista e Picado-Santos, 2002).

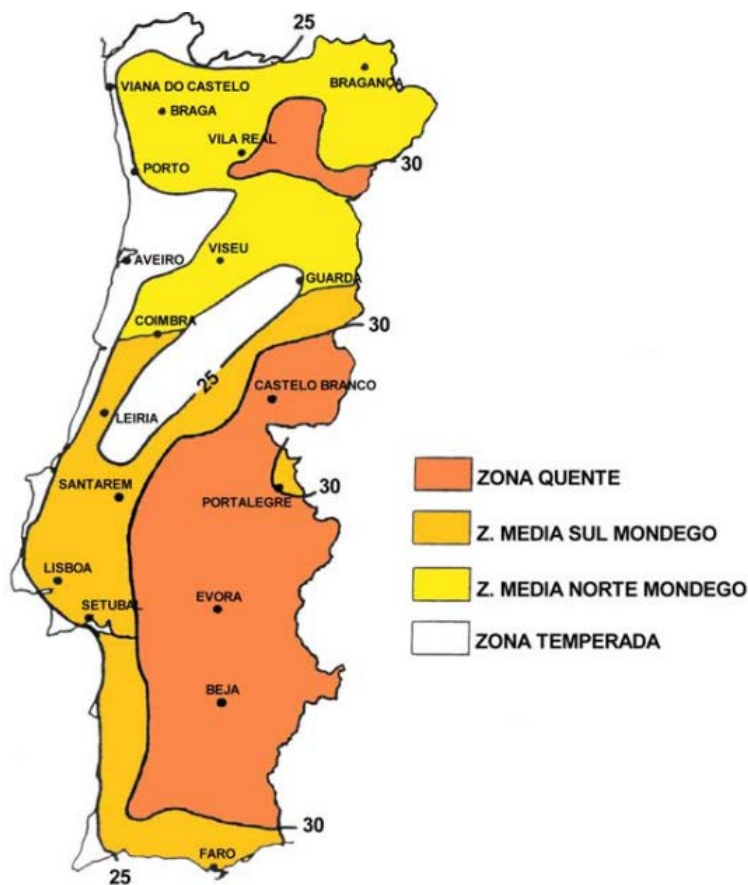


Figura 2.3 – Zonas climáticas de Portugal continental (Baptista e Picado-Santos, 2002)

Para Portugal Continental a temperatura para a caracterização de misturas betuminosas deve situar-se entre os 40 °C e os 50 °C dependendo da zona em que se localiza o pavimento. Assim, as temperaturas para as quatro zonas acima descritas são 50 °C para a Zona Quente, 45 °C para a Zona Média Sul Mondego e Zona Média Norte Mondego, enquanto para a Zona temperada são 40 °C (Freire, 2002).

A frequência de aplicação de cargas, que está relacionada com a velocidade do tráfego pesado, condiciona o comportamento das misturas betuminosas, principalmente o módulo de deformabilidade ou rigidez, que é tanto maior quanto maior é a velocidade do tráfego.

O tráfego cria degradações nos pavimentos, principalmente deformações permanentes nas fundações e fendilhamento por fadiga nas camadas ligadas, o que está base do dimensionamento de pavimentos flexíveis. No entanto, também influencia a deformação permanente nas camadas betuminosas quando o tráfego é muito intenso e agressivo, com cargas por eixo elevadas e velocidade de circulação reduzida (Baptista, 2006).

O aumento do tráfego de veículos pesados leva à realização de pavimentos com uma espessura maior de mistura betuminosa, o que leva a um cuidado maior com a composição dessas misturas, de forma a evitar problemas tais como a deformação permanente. Para isto é necessário procurar soluções em termos de projeto, construção e conservação dos pavimentos (Gardete, 2006).

Cardoso (2002) refere que as deformações permanentes causadas pelo tráfego são provocadas pela repetição de cargas que tende a ocorrer no mesmo local, razão pela qual a deformação verificada aumenta quando as estradas são mais afuniladas e obrigam os veículos a passar tendencialmente no mesmo local, havendo uma menor distribuição lateral das cargas.

Para uma melhor caracterização deste efeito nas misturas betuminosas, o ensaio a utilizar será o ensaio de pista, pois permite variar a frequência e o tipo de carregamento. Uma descrição mais profunda deste ensaio será apresentada mais à frente, quando se fizer uma descrição detalhada dos ensaios para a caracterização da deformação permanente das misturas betuminosas utilizadas durante este trabalho.

2.2 Sensibilidade à água de misturas betuminosas

A resistência das misturas betuminosas à ação da água é uma das características mais importantes quanto ao desempenho e durabilidade de um pavimento, sendo que os cadernos de encargos já incluem observações quanto à sensibilidade à água. Esta característica é avaliada através da perda de resistência mecânica das misturas betuminosas após condicionamento em água.

O estudo deste fator é importante quando se pretende fazer a seleção do material a utilizar num pavimento. Se houver uma incorreta seleção de materiais, e uma incorreta determinação da sensibilidade à água de uma mistura, isso pode dar origem a uma deterioração precoce do pavimento (Vasconcelos *et al.*, 2006).

As misturas com maior porosidade tendencialmente são mais suscetíveis à ação da água devido à maior zona de contacto entre a água e a mistura, o que acontece através dos poros existentes. Esta sensibilidade à água provoca uma maior fadiga dos materiais constituintes do pavimento, o que reduz a resistência destes à deterioração (Partl *et al.*, 2009).

Segundo Pereira (2009) um fator importante para este estudo é o tipo de camada de regularização, visto que esta pode impedir a entrada de água nas restantes camadas para assim evitar uma maior deterioração do pavimento e assim fazer com que este possua uma maior resistência a todos os fatores que o possam afetar. Segundo o mesmo autor, a água que afeta os pavimentos pode ter várias proveniências após períodos de elevada pluviosidade, sendo as mais importantes:

- Água proveniente da superfície;
- Água proveniente de zonas limítrofes;
- Águas subterrâneas.

Copeland (2007) construiu o esquema da Figura 2.4 que traduz os fatores que devem ser considerados no estudo da sensibilidade à água. Podemos retirar deste esquema que a sensibilidade da água influencia e pode prevenir diversas patologias como a degradação, fendilhamento e deformação permanente, entre outras, assim como outras propriedades das misturas que influenciam esta característica nos pavimentos.

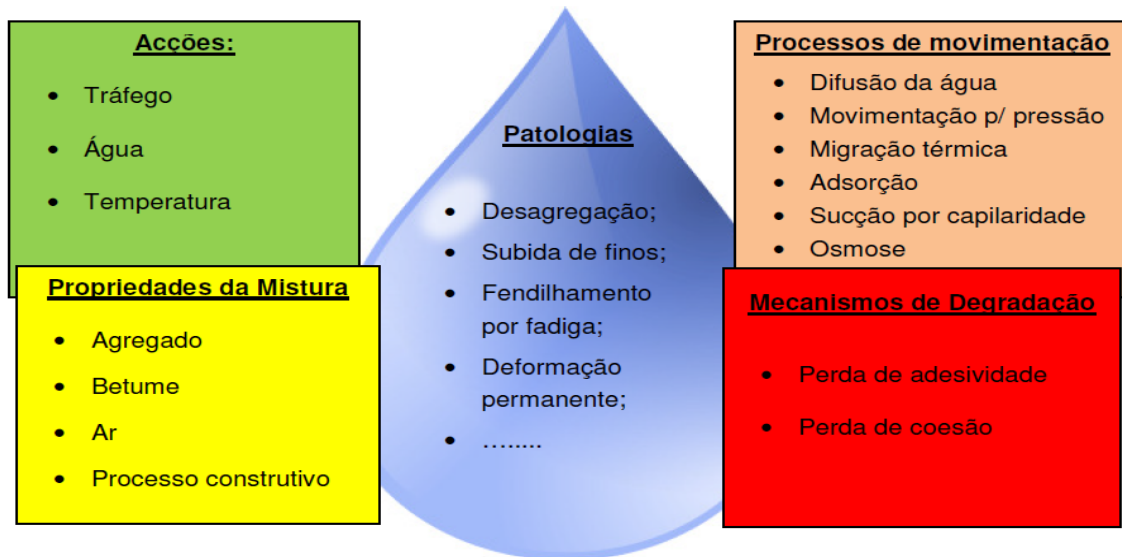


Figura 2.4 – Fatores que influenciam a durabilidade das misturas betuminosas (adaptado de Copeland, 2007)

A norma utilizada em Portugal até 2003, para realizar esta caracterização, foi a norma MIL-STD-620A. Porém, a norma europeia que apareceu mais recentemente, EN 126977-12, veio trazer algumas mudanças na maneira como se realizam atualmente os ensaios de sensibilidade à água.

2.3 Influência da composição da mistura betuminosa na deformação permanente e na sensibilidade à água

2.3.1 Influência da granulometria

Miranda (2008) *apud* Pereira (2009) afirma que uma mistura betuminosa é composta por agregados de três dimensões diferentes, agregado grosso, agregado fino e por filer, tendo cada um a sua função específica:

- Os agregados grossos têm a função de garantir estabilidade à mistura betuminosa, de aumentar a resistência mecânica e de assegurar rugosidade superficial suficiente para a circulação dos veículos;
- Os agregados finos (inferiores a 2 mm) têm a função de dar estabilidade e compacidade à mistura;
- O filer (material inferior a 0,063 mm) tem a função de garantir à mistura compacidade e impermeabilidade.

Brien (1976), referido por Freire (2002), realizou ensaios de simulação em pista, do tipo *Wheel Tracking*, em que as misturas betuminosas tinham as mesmas quantidades de betume mas que tinham diferentes tipos de agregados grossos (dimensão superior a 4,75 mm), graníticos e basálticos, britados e não britados. Os agregados que não eram britados apresentaram piores resultados em termos de formação de rodeira em relação aos agregados britados, que apresentam resultados mais satisfatórios.

Franco (2007) afirmou que as propriedades relacionadas com a produção dos materiais influenciam o comportamento das misturas na resistência à deformação permanente, e essas propriedades são a forma como a rocha é esmagada e a classificação do material agregado. Quanto melhor a classificação dos agregados obtida em ensaios de laboratório, melhores as propriedades físicas que este material oferece ao pavimento, e logo melhor o comportamento do pavimento à deformação permanente.

Algumas das características dos agregados das misturas betuminosas que melhoram a deformação permanente são as seguintes (Cooper, 1994):

- Textura superficial quando passa de lisa a rugosa;
- A granulometria quando passa de contínua a descontínua;
- A forma das partículas dos agregados quando passam de roladas a britadas, e de lamelares a cúbicas;
- O aumento da dimensão máxima do agregado.

Num estudo realizado pela APORBET (1998), foi proposto para os agregados utilizados nas misturas betuminosas que estes devem de possuir agregados limpos, duros, pouco suscetíveis a mudanças devido ao clima, com boa capacidade de adesão ao ligante, com qualidade uniforme e isentos de materiais ou matérias prejudiciais. Estes materiais devem de ter proveniência de pedreiras.

A deformação permanente das misturas betuminosas é um fenómeno complexo onde o ligante, o agregado e a interface ligante-agregado controlam em simultâneo o desempenho das misturas betuminosas (Sousa *et al.*, 1994).

Por sua vez, Zaniewski e Harsha (2003) afirmaram que as propriedades da mistura betuminosa que mais influenciam a deformação são:

- Suscetibilidade às variações de temperatura e taxa de carregamento;

- Efeitos do envelhecimento;
- Efeitos da humidade.

Gardete (2006) escreveu que a utilização de agregados com uma granulometria adequada, expressa na curva granulométrica da mistura, é fundamental para obter uma mistura coesa e com uma elevada interligação das partículas dos agregados após compactação. Assim, uma mistura com granulometria contínua apresenta uma melhor resistência à deformação permanente do que uma mistura aberta ou descontínua.

O mesmo autor refere que outra propriedade que influencia a resistência à deformação permanente é a máxima dimensão dos agregados, sendo que uma mistura com um agregado de máxima dimensão elevado apresenta, habitualmente, uma melhor resistência do que uma mistura semelhante em que o agregado de máxima dimensão seja menor. Isto acontece porque o esqueleto mineral que se forma na mistura é tanto mais sólido e resistente quanto maior a dimensão máxima do agregado.

O uso de materiais reciclados contribui para um aumento da deformação permanente, pois estes materiais apresentam menor rigidez e resistência. Devido à menor qualidade desses materiais, esta granulometria não deve ser utilizada na composição de misturas para camadas de base dos pavimentos, pois estes pavimentos podem apresentar fraca qualidade em termos de resistência à deformação permanente (Liu *et al.*, 1998).

Segundo Cooper (1994) a granulometria dos agregados e as características que estes possuem podem alterar o comportamento da mistura à deformação permanente. Assim, se estes tiverem uma granulometria contínua têm um melhor comportamento do que se tiverem uma granulometria descontínua.

Quando ocorrem condições que originam deformações permanentes, a forma e a textura dos agregados são fatores importantes para melhorar o desempenho da mistura, pois durante a ocorrência de deformações existe o movimento de partículas e qualquer tipo de característica que iniba este movimento é importante (Freire, 2002).

A utilização de agregados angulosos proporciona menores deformações que têm um melhor comportamento do que misturas betuminosas com a mesma composição e granulometria mas com agregados de natureza aluvionar (Ugé *et al.*, 1974). Para chegar a estas conclusões foi

utilizado o ensaio de deformação por corte como forma de investigação do comportamento à deformação permanente de misturas com diferentes percentagens de material britado. Foram realizados ensaios com duas misturas de composição intermédia, uma em que apenas a areia é britada, e outra em que a fração grossa é britada e a areia é rolada, sendo que a primeira apresenta melhores resultados.

Após a realização de estudos comparativos do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas que são aplicadas habitualmente em camadas de base, verificou-se que o comportamento em ensaios de compressão uniaxial estáticos variou bastante com diferentes tipos de granulometria e diferentes tipos de agregados, o que demonstra a importância das características da mistura de agregados (Azevedo, 1993).

Segundo Cooper (1997) uma granulometria estabelecida adequadamente, que quando misturadas entre si e com o betume formem um esqueleto mineral estável, minimiza a ocorrência de deformação permanente. Assim, segundo este autor, quanto mais contactos existirem entre as partículas durante a compactação, maior estabilidade terá a mistura à deformação permanente.

Uma das causas para o aumento da deformação permanente é a presença dum excesso de partículas finas nas misturas betuminosas, e de partículas com forma arredondada e que provocam um aumento do teor em betume necessário para compor essas misturas betuminosas (Button *et al.*, 1990).

Segundo Silva (2006) o filer é responsável pela capacidade de impermeabilidade da mistura betuminosa, para além de a sua composição influenciar a trabalhabilidade e a capacidade de ligação entre o betume e os agregados.

Kandhal *et al.* (1998) *apud* Silva (2006) executaram vários tipos de ensaios para caracterizar diferentes tipos de filer, e os resultados destes ensaios foram comparados com base nos resultados obtidos pelas misturas betuminosas produzidas com estes diferentes tipos de filer. Desta forma, estes autores concluíram que a percentagem de finos, especialmente o filer, influencia o comportamento das misturas betuminosas na medida em que:

- Um aumento dos finos, especialmente do filer, vai provocar uma necessidade maior do pavimento de possuir maior quantidade de betume, o que faz com que este fique com uma menor resistência à deformação permanente;
- Os agregados finos têm grande influência no endurecimento do betume enquanto estão a formar o masticue, o que pode originar um comportamento mais frágil, o que faz com que a mistura se torne mais suscetível ao fendilhamento;
- Alguns agregados finos tornam a mistura mais suscetível à sensibilidade à água.

Khandal *et al.* (1998) referem que embora o tipo de mistura e as características do betume influenciem a sensibilidade à água das misturas betuminosas, as propriedades dos agregados são as principais responsáveis pela adesão entre o betume e o agregado.

Segundo Pereira (2007), a adesividade entre os agregados e os ligantes é das características que mais influenciam a sensibilidade à água das misturas betuminosas. Segundo o mesmo autor são muitas as características do agregado que influenciam o fenómeno da adesividade, entre as quais se destacam:

- Porosidade e absorção;
- Composição química;
- Composição mineralógica e polaridade;
- Angularidade;
- Forma;
- Textura superficial.

2.3.2 Influência do tipo de betume

Alguns autores recomendam a utilização de betumes modificados pela incorporação de elastómeros e plastómetros com a intenção de melhorar o comportamento das misturas betuminosas à deformação. Este melhor comportamento deve-se ao ligante modificado a altas temperaturas ter uma viscosidade superior à do betume sem modificação, sem correr o risco de ocorrer um comportamento inverso do betume a baixas temperaturas (Freire, 2002).

Na reabilitação da A8 (CRIL-Loures), a empresa Autoestradas do Atlântico utilizou dois tipos de soluções para o reforço utilizando para isso uma mistura que utilizava um betume modificado com borracha reciclada (BMB) e uma outra com betume modificado com

polímeros (SBS). Em seguida foram retiradas lajes do pavimento que permitiram fazer uma avaliação do módulo de deformabilidade, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente. Neste estudo concluíram que a mistura BMB com apenas 2 cm de espessura apresenta uma resistência à deformação permanente e à fadiga superior à mistura com polímero com 5 cm de espessura (Pais e Pereira, 2006).

O betume, que é um ligante, tem como função, para além de permitir a ligação entre os agregados, garantir a flexibilidade e permitir uma maior trabalhabilidade à mistura, tem como função ocupar os espaços vazios. Uma estrutura com um elevado volume de vazios é uma estrutura que não apresenta um bom comportamento à deformação permanente, porém se o índice de vazios também for inferior a 3% a mistura não apresenta estabilidade suficiente e torna-se suscetível a apresentar pouca resistência à deformação permanente (Silva, 2006).

Os trabalhos de investigação realizados durante muitas décadas mostram que a suscetibilidade à deformação permanente está relacionada com as características dos materiais, incluindo (Archilla *et al.*, 2000):

- Conteúdo excessivo de ligante betuminoso;
- Conteúdo excessivo de agregados finos;
- Alta percentagem de areia natural;
- Formas das partículas do agregado;
- Excessiva permeabilidade da mistura ou do material granular;
- Suscetibilidade do betão betuminoso.

A deformação permanente também é influenciada pela forma como a compactação das misturas betuminosas é realizada. A existência de drenagem na camada também influencia a deformação permanente, sendo que caso a drenagem exista haverá menos pressão sobre os materiais melhorando as suas características (Franco, 2007).

Para que uma mistura betuminosa apresente um bom comportamento à deformação permanente necessita-se que a quantidade de vazios na mistura de agregados (VMA) seja baixa. Em geral a redução da porosidade das misturas betuminosas aumenta a resistência à deformação permanente. Isto é conseguido se durante a construção for utilizada uma elevada energia de compactação, assim como a utilização de misturas corretamente formuladas e aplicadas (Freire, 2002). Um VMA muito baixo também poderá ser prejudicial porque não

assegura uma suficiente percentagem de vazios entre as partículas de agregados para permitir o seu posterior preenchimento por betume, de modo a permitir uma compactação sem conduzir ao seu refluimento (Cooper *et al.*, 1985 *apud* Freire, 2002).

Segundo estudos realizados nas misturas com betumes modificados com borracha, estes tornam as misturas menos suscetíveis à deformação permanente independentemente do tipo de mistura ou da granulometria adotada (Fontes *et al.*, 2010).

Segundo Sousa *et al.* (1994) *apud* Fontes *et al.* (2010), uma diminuição do volume de vazios provoca uma reação no ligante para que este se transforme num lubrificante entre os agregados, o que reduz a pressão entre os pontos de contacto dos agregados. Esta reação provoca mudanças no comportamento à deformação permanente fazendo com que em dias de calor estas misturas se deformem mais facilmente.

A modificação de betumes com a adição de borracha pode traduzir-se por uma melhoria das suas propriedades. Assim, um betume que seja mais mole após a adição de borracha pode ter um comportamento igual ao de um betume que seja um pouco mais duro. Esta mudança provoca também uma melhoria na resistência da mistura betuminosa às ações mecânicas (Taner *et al.*, 2011).

Entretanto, Partl *et al.* (2009) referem que as misturas betuminosas com adição de borracha apresentam maior resistência à ação da água, sendo por isso menos sensíveis aos agentes climáticos.

Segundo Pereira (2009), parte do betume é absorvido pelo agregado e outra parte fica a envolver o agregado, o que resulta no volume total de betume. O volume de betume juntamente com o volume de vazios é igual ao valor do VMA (volume de vazios no esqueleto mineral). Se a quantidade de betume absorvido pelo agregado for muito elevada, e assim diminuir a espessura de betume que envolve as partículas de agregado, a sensibilidade à água das misturas aumenta, uma vez que a mistura betuminosa se torna mais frágil ficando mais suscetível às ações prejudiciais da água.

Quando uma mistura betuminosa apresenta uma maior sensibilidade à água, esta tem uma durabilidade menor. Para impedir que isto aconteça a quantidade de betume é muito importante, pois fornece uma resistência maior da mistura para a entrada da água. Porém,

deve ter-se em atenção que a percentagem de betume também se pode tornar prejudicial para o desempenho global da mistura, e ao formular as misturas é importante ter em atenção que a percentagem de betume é uma fator muito importante para assegurar não só uma menor sensibilidade à água como uma resistência à deformação (Pereira, 2009).

2.3.3 Influência do teor em betume

Em 1990, Brown e Bassett verificaram que apesar de uma mistura ter um volume de vazios maior, esta apresentava menores deformações permanentes que as misturas com menor volume de vazios. Estes autores concluíram que quanto menor o volume de vazios maior quantidade de betume precisava a mistura, sendo que quanto maior o teor em betume nas misturas menor a resistência destas à deformação permanente.

Em 2002, Erkens verificou que diferentes teores em betume conduziam a diferentes degradações no pavimento. Ao realizar ensaios para classificar a deformação permanente, este autor concluiu que para um teor em betume baixo as misturas nos pavimentos tinham tendência a desagregar, e para um teor em betume muito elevado verificava-se uma deformação excessiva, enquanto para o teor em betume ótimo o comportamento foi o mais aceitável.

As misturas betuminosas deveriam apresentar teores em betume que conduzissem a porosidades de cerca de 4% de modo a evitar deformações permanentes, mas este critério também está associado a misturas com adequada estabilidade e ao uso de agregados de boa qualidade (Monismith *et al.*, 1985). Freire (2002) refere que estudos realizados nos EUA, em que foram efetuadas medições da porosidade de provetes obtidos no pavimento de uma pista de ensaio, mostraram que um valor de porosidade de 3% é crítico para ocorrência de deformações permanentes, pois abaixo deste valor aumenta a profundidade de rodagem.

2.4 Estudos de caracterização da deformação permanente

Tal como foi anteriormente referido, existem vários ensaios associados à deformação permanente. Um desses ensaios, utilizado de forma empírica, é o ensaio Marshall, que tem como objetivo quantificar a resistência mecânica e a deformação sofrida por uma mistura ensaiada laboratorialmente. Este ensaio é utilizado como parte da metodologia de formulação

de misturas betuminosas e serve para obter o valor ótimo do teor em betume, bem como baridades de referência com vista ao controlo da qualidade das misturas aplicadas nos pavimentos (Freire, 2002). Este ensaio é realizado com base na norma EN 12697-34, e consiste em compactar provetes com 75 pancadas, determinando-se em seguida a resistência mecânica dos provetes após a imersão destes em água a 60 °C.

Segundo Brown *et al.* (2001), este ensaio também pode ser utilizado para determinar o índice de “rigidez” de Marshall que serve para caracterizar as misturas betuminosas. Este índice é obtido a partir do quociente entre o valor da estabilidade e deformação de Marshall. Assim, uma mistura betuminosa com um índice de “rigidez” de Marshall elevado pode indicar um bom comportamento à deformação permanente.

Gardete (2006) e Baptista (2004) afirmam que, após analisar vários ensaios, verificou-se que o ensaio Duriez e o ensaio de Hveem têm muitas limitações e que por isso não são bons para caracterizar a resistência das misturas à deformação permanente, embora possam ser utilizados para caracterizar o comportamento mecânico geral das misturas betuminosas.

Outro ensaio que caracteriza a deformação permanente é o ensaio de compressão uniaxial. Este foi utilizado por Little *et al.* (1993), que concluíram que era um ensaio eficaz para identificar a suscetibilidade das misturas à deformação permanente. Os mesmos autores afirmam que este ensaio apresenta variações nos resultados conforme o tipo de betume e seu teor, os agregados que constituem a mistura, o volume de vazios, temperatura do ensaio e tipo de carregamento. As tensões aplicadas neste ensaio devem estar ao nível das tensões aplicadas no pavimento. Assim, a temperatura deve situar-se nos 40 °C e as tensões axiais devem situarem-se no intervalo de 3,50 a 4,15 kgf/cm² (valores utilizados para assegurarem uma melhor compactação), sendo a duração do ensaio de uma hora. Os resultados deste ensaio, que são bons indicadores da deformação permanente da mistura betuminosa, são a deformação permanente total para uma hora de carregamento e a inclinação do estado secundário da curva de deformação/tempo de carregamento. O estado secundário é analisado entre os 1000 e os 3600 segundos, tal como se pode verificar no resultado típico deste ensaio que é apresentado na Figura 2.5.

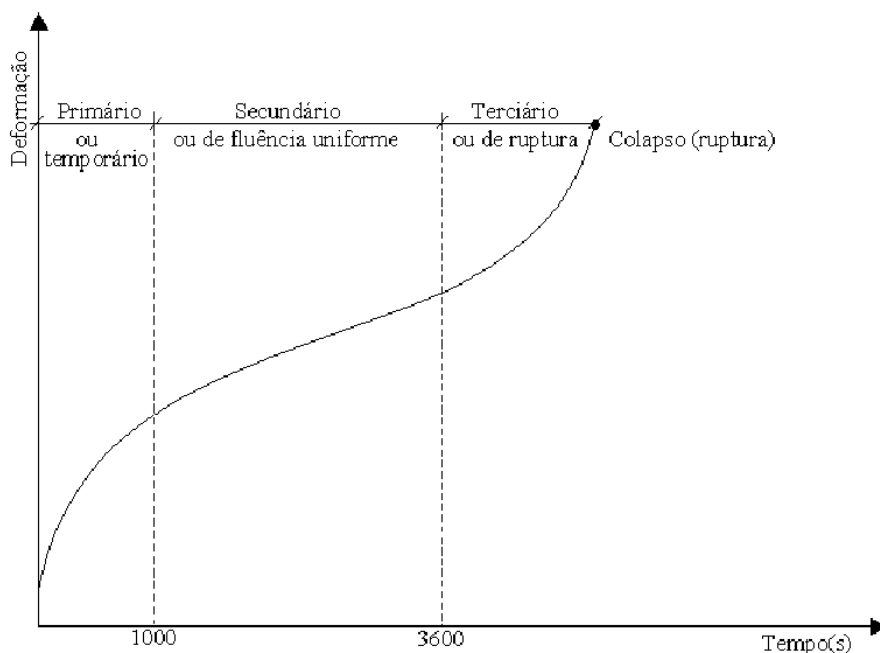


Figura 2.5 – Estados da curva de fluência no ensaio de compressão uniaxial (adaptado de Little *et al.*, 1993)

Em Portugal, Gardete (2006) realizou o ensaio de compressão uniaxial em dois tipos de provetes, uns produzidos em laboratório e outros de obra com diferentes percentagens de betume, afirmando que estes valores são semelhantes aos obtidos com o ensaio de pista. Assim, este ensaio fornece dados da deformação permanente que dependem do teor em betume, da quantidade de agregados grossos e do tipo de betume.

O mesmo autor estudou a deformação permanente utilizando para isso o ensaio triaxial e concluiu que este ensaio, apesar de apresentar boas indicações para o estudo da deformação permanente (pois verificou-se que um aumento da quantidade de betume leva a uma diminuição da capacidade resistente da mistura), é um ensaio que por vezes apresenta resultados muito díspares para pequenas variações nos parâmetros em estudo.

O ensaio de pista é um dos ensaios mais utilizados em todo mundo como ferramenta para a avaliação do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas, pois é um ensaio que permite simular o efeito da passagem das rodas dos carros no pavimento e determinar qual o efeito desta passagem. Permite controlar durante todo o ensaio a temperatura, a velocidade de carregamento e a pressão de contacto. Verifica-se que os provetes com menor percentagem de betume sofrem menores deformações e têm menores

velocidades de deformação. Quanto maior a percentagem de betume menor a resistência à deformação permanente (Gardete, 2006).

Num estudo realizado por Brown e Basset (1990), em que utilizaram cinco misturas betuminosas contendo agregados com a dimensão máxima de 3/8, 1/2, 3/4, 1 e 3/2 polegadas, verificaram que as misturas com granulometrias com maior dimensão máxima e maior volume de vazios apresentam melhores resultados de resistência à deformação permanente, concluindo que isto também se deve ao facto de as misturas com maior volume de vazios precisarem de menor quantidade de ligante, sendo a percentagem de ligante um fator que tem uma grande influência na resistência à deformação permanente.

2.5 Estudos de análise da sensibilidade à água das misturas betuminosas

Poulikakos e Partl (2009) realizaram um estudo com o objetivo de investigar o efeito da água, da temperatura e da frequência nas propriedades mecânicas das misturas betuminosas porosas. Assim, utilizaram oito amostras retiradas das camadas superiores de estradas já sujeitas a tráfego, em que a idade destas amostras variou entre 0 e 13 anos, com teores em betume entre 4,3% e 6,0%, com volumes de vazios de 14,8% a 26,1%, em que praticamente todas as amostras eram modificadas com polímeros. Antes de estes provetes serem retirados do pavimento foram avaliados visualmente (polimento, desagregação, desgaste, deformação permanente e fendilhamento): 3 dos pavimentos estavam em condições suficientes, 4 em condições médias e 1 era novo. Após realização dos ensaios de sensibilidade à água verificou-se que o desempenho era menor em condições em que os provetes estavam molhados, diminuindo o desempenho a cada aumento de temperatura. Verificaram também que as misturas sem betume modificado eram mais sensíveis à água.

Partl *et al.* (2009), num estudo realizado sobre a influência da água em misturas porosas, concluíram que as misturas com granulometria aberta e produzidas com betume modificado com borracha conseguem diminuir a sensibilidade à água em comparação com misturas betuminosas porosas ou semi-porosas. Este resultado foi conseguido pelo facto de o betume com borracha envolver melhor o agregado formando uma proteção mais dura e espessa à volta deste, o que torna a mistura mais resistente e menos sensível à água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

A metodologia utilizada neste trabalho baseou-se numa escolha de materiais que melhor ajudassem a perceber quais os fatores que mais influenciavam os problemas que a deformação permanente e a sensibilidade à água se deparam. Para isso utilizou-se misturas com diferentes granulometrias e com diferentes tipos de betume, um mais duro e outro mais mole, para se conseguir abranger um maior número de fatores que pudessem afetar as características das misturas em estudo. A escolha da composição granulométrica base também foi criteriosa por ser uma das mais usadas em Portugal.

A escolha de uma mistura base com uma granulometria que correspondia ao fuso intermédio, e depois a escolha de mais duas em que a granulometria correspondia ao fuso superior e inferior dessa mistura, foi uma forma de demonstrar que apesar das aparentes semelhanças, o facto de as misturas terem uma composição granulométrica diferente tem um efeito efetivo no comportamento dessas misturas à deformação permanente e na sensibilidade à água. Ao alterar esta composição também foi possível perceber que com a alteração da granulometria também há outro fator que interfere no comportamento da mistura, que é o teor em betume, variando este entre os 5% e 6% consoante a granulometria utilizada.

Foi também escolhida uma mistura em que se alterou o diâmetro máximo do agregado, com o intuito de perceber de que forma esse parâmetro e o volume de vazios interfere no desempenho da mistura. Posteriormente também foi fabricada uma mistura que em termos de granulometria correspondia à mistura base (fuso intermédio), mas com um tipo de betume diferente (mais mole), para assim ser possível perceber qual a influência relativa de cada parâmetro em estudo no comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente e na sua sensibilidade à água.

3.2 Caracterização dos materiais utilizados

Os materiais a ser usados são agregados graníticos distribuídos pelas dimensões 0/4, 4/6, 4/10, 6/14 e 14/20, e um filer calcário, misturados para produzir misturas com uma dimensão máxima de 14 mm ou 20 mm, visto estas serem as dimensões mais utilizadas em Portugal.

Em relação ao betume utilizou-se um betume 35/50, por ser um dos betumes mais utilizados em Portugal, para a primeira série de ensaios e para a mistura com uma dimensão máxima de 20 mm. Utilizou-se depois um betume mais mole (70/100) para avaliar o seu efeito numa mistura com o fuso médio, sendo que esse betume foi obtido a partir duma mistura entre os betumes 35/50 e 160/220 (mais habitualmente comercializados em Portugal).

Assim, definiu-se para a análise em laboratório cinco misturas contínuas com a seguinte composição, que foram realizadas segundo os procedimentos laboratoriais normais:

- i) Mistura com D=14mm, com a curva contínua de máxima compactidade de potência 0,45 (correspondente ao fuso médio) e betume 35/50 (mistura de referência) – **14Gm34**;
- ii) Mistura com D=14mm, com curva contínua correspondente ao fuso inferior da curva obtida para a mistura de referência (mais grossos) e betume 35/50 – **14Gi34**;
- iii) Mistura com D=14mm, com curva contínua correspondente ao fuso superior da curva obtida para a mistura de referência (mais finos) e betume 35/50 – **14Gs34**;
- iv) Mistura com D=20mm, com a curva contínua de máxima compactidade de potência 0,45 (correspondente ao fuso médio) e betume 35/50 – **20Gm34**;
- v) Mistura com D=14mm, com a curva contínua de máxima compactidade de potência 0,45 (correspondente ao fuso médio) e betume 70/100 – **14Gm89**.

3.3 Metodologia utilizada

3.3.1 Metodologia escolhida para definição das curvas granulométricas

A primeira tarefa realizada neste trabalho consistiu na escolha dos materiais a utilizar nas misturas betuminosas. Depois disto definiu-se as curvas granulométricas a utilizar para produzir as misturas para os dois tipos de ensaios a realizar.

Em Portugal, para a produção de misturas betuminosas e para a definição das curvas granulométricas é usual recorrer à utilização do caderno de encargos das Estradas de Portugal (EP, 2008), que define para cada tipo de camada de pavimento o tipo de curva granulométrica a utilizar. Estas especificações estão detalhadas para cada tipo de mistura betuminosa, isto é, para misturas a quente ou a frio, misturas com aditivos, misturas com ligantes betuminosos ou hidráulicos. Este documento faz também outras considerações necessárias para um bom funcionamento das misturas e dos pavimentos.

Nos Estados Unidos da América a produção de misturas betuminosas, e a escolha de materiais e das curvas granulométricas está associada ao método SUPERPAV (*Superior Performing Asphalt Pavement System*). Este apareceu aquando da finalização em 1993 do programa SHRP, e veio melhorar a forma de fazer a seleção dos materiais e o cálculo das misturas betuminosas, designando um conjunto de três pontos que ajudam a estabelecer o método de conceção de mistura, que são os seguintes:

- Um novo método de formulação das misturas betuminosas que tem em conta as cargas do tráfego e as condições ambientais;
- Um novo método para a avaliação dos ligantes betuminosos;
- Novos métodos de análises das misturas betuminosas.

Para a definição da granulometria dos agregados o SUPERPAV define duas maneiras de seleccionar os mesmos, colocando restrições quanto à granulometria (por meio de pontos gerais e de requisitos para a granulometria grossa e fina) e para a forma dos materiais. Sabendo dos problemas e condicionalismos da escolha dos materiais granulométricos, este método propõe a utilização da Equação 3.1 para descrever uma granulometria com densidade máxima (para misturas densas) que foi desenvolvida por Fuller e Thompson em 1907.

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (3.1)$$

Onde:

P – Percentagem de material passado em cada peneiro da dimensão d;

d – Tamanho dos agregados a ser considerados (dimensão dos vários peneiros);

D – Dimensão máxima dos agregado a ser utilizado;

n – Parâmetro para ajustamento da granulometria.

O método do SUPERPAV utiliza o gráfico correspondente à Equação 3.1 para determinar a linha de máxima densidade e para fazer o ajustamento da curva granulométrica, utilizando para o efeito a curva continua de máxima compacidade de potência de 0,45. Este gráfico utiliza o tamanho do peneiro elevado a 0,45, sendo a linha de máxima potência aquela que une o valor zero à percentagem máxima (100%) para a máxima dimensão da mistura. A localização exata desta linha muda em função da dimensão máxima dos agregados da mistura, tal como indicado nas retas apresentadas na Figura 3.1.

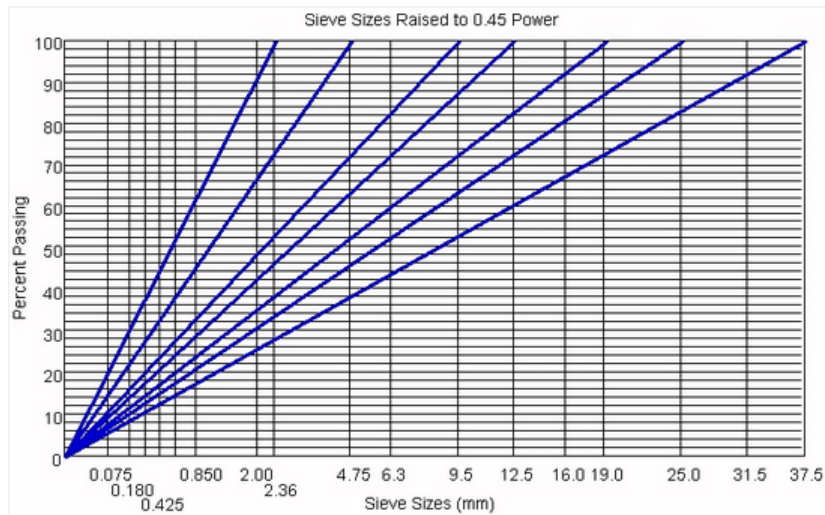


Figura 3.1 – Representação das curvas de máxima compactação para várias dimensões máximas de agregados (Pavement Interactive, 2009)

Este método contemplava antes uma zona que era chamada como a zona restrita (Figura 3.2), onde era recomendado que as curvas granulométricas dos agregados não passassem. Porém, em 2002 essa zona foi retirada por se verificar que afinal a granulometria dos agregados daquela zona não tinham qualquer efeito negativo no funcionamento da mistura.

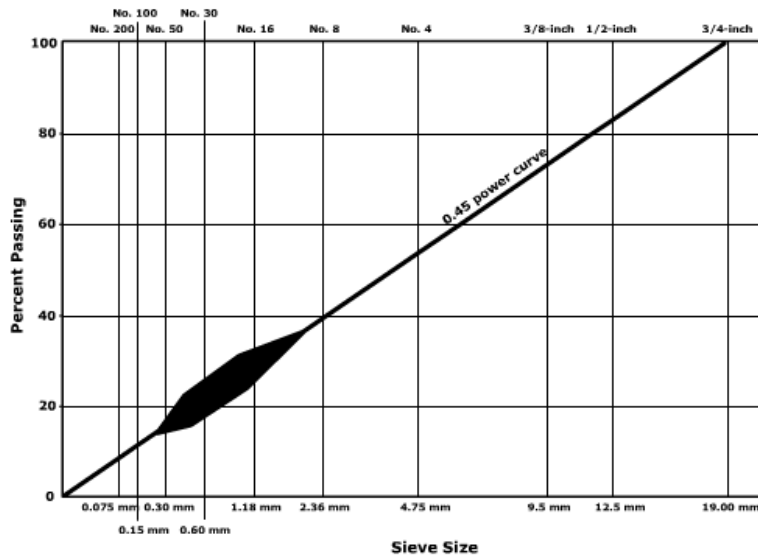


Figura 3.2 – Zona restrita na curva de máxima compactação (Pavement Interactive, 2009)

As curva granulométrica de base usada neste trabalho procurou basear-se na curva contínua de máxima compactação de potência 0,45, para os fusos granulométricos proposto pelo SUPERPAV para uma granulometria máxima de 19mm e 25mm (figura 3.3 e figura 3.4), sendo esse o critério principal para traçar a curva granulométrica. Apesar de serem utilizadas

essas curvas e de forma a adaptar essas curvas à realidade europeia, foram utilizados os peneiros europeus para definir as percentagens de material passado em cada peneiro. Por último, fez-se uma truncagem na curva de 19 mm aos 14 mm, limitando a percentagem de retidos a 10%, de modo a conseguir ajustar as misturas estudadas aos tipos de agregados existentes nas pedreiras em Portugal. Fez-se o mesmo na curva de 25 mm, limitando aos 20 mm (pelas mesmas razões).

Tabela 3.1- Fuso granulométrico proposto pelo SUPERPAV para a curva de granulometria 19mm

Abertura do peneiro (mm)	% passados
19	$p = \left(\frac{19,0}{19,0}\right)^{0,45} = 1,000 (100\%)$
12,5	$p = \left(\frac{12,5}{19,0}\right)^{0,45} = 0,828 (82,2\%)$
9,5	$p = \left(\frac{9,5}{19,0}\right)^{0,45} = 0,732 (73,2\%)$
2,00	$p = \left(\frac{2,00}{19,0}\right)^{0,45} = 0,363 (36,3\%)$
0,300	$p = \left(\frac{0,300}{19,0}\right)^{0,45} = 0,155 (15,5\%)$
0,075	$p = \left(\frac{0,075}{19,0}\right)^{0,45} = 0,083 (8,3\%)$

Tabela 3.2- Fuso granulométrico proposto pelo SUPERPAV para a curva de granulometria 25mm

Abertura do peneiro (mm)	% passados
25	$p = \left(\frac{25}{25}\right)^{0,45} = 1,000 (100\%)$
19	$p = \left(\frac{19}{25}\right)^{0,45} = 0,884 (82,4\%)$
10	$p = \left(\frac{10}{25}\right)^{0,45} = 0,662 (66,2\%)$
2,00	$p = \left(\frac{2,00}{25}\right)^{0,45} = 0,320 (32\%)$
0,300	$p = \left(\frac{0,300}{25}\right)^{0,45} = 0,136 (13,6\%)$
0,075	$p = \left(\frac{0,075}{25}\right)^{0,45} = 0,073 (7,3\%)$

Efeito da composição das misturas betuminosas na sensibilidade à água e resistência à deformação permanente

O SUPERPAV define que para o peneiro anterior ao da dimensão máxima dos agregados da mistura de ter uma percentagem de passados entre 90 e 100%. Verificamos também que o caderno de encargos da EP que a percentagem de passados no peneiro correspondente à máxima dimensão de agregados se deve situar entre 90 e 100%. Optou-se então por utilizar nesta zona mais próxima da dimensão máxima as definições do caderno de encargos da EP (ou equivalente) para a percentagem de passados.

A curva do caderno de encargos português utilizada como referência numa primeira fase de produção das misturas (1 a 3, e 5) foi a curva AC 14 Surf, cujo fuso é apresentado na Figura 3.3.. Também se pode verificar que o fuso português possui mais pontos de controlo do que o que a curva granulométrica definida pela curva continua de máxima compacidade de potência para o fuso granulométrico D=19mm.

Quadro 14.03.2: Camadas de misturas betuminosas a quente									
Camada de desgaste - Requisitos dos fusos granulométricos									
Camada de desgaste									
Tipo de mistura		AC 14 surf (BB)	PA 12,5 (BBd)	AC10 surf (mBB)	AC14 surf (BB)	AC 14 surf (BB) com incrustação de agregados duros ¹			
Peneiros Série Base, Série 2		rubrica 14.03.2.4.1	rubrica 14.03.2.4.2	rubrica 14.03.2.4.3	rubrica 14.03.2.4.4	rubrica 14.03.2.4.5			
Unidade		Porcentagem acumulada do material passado							
31,5		-	-	-	-	-	-	-	-
25		-	-	-	-	-	-	20	100
20		1,4D	100	1,4D	100	-	1,4D	100	-
16		-	-	-	-	-	-	1,4D	98-100
14		D	90-100	-	1,4D	100	D	90-100	-
12,5		-	D	90-100	-	-	-	D	85-99
10		(c1)	67-77	(c1)	55-75	D	90-100	(c1)	62-78
8		-	-	-	-	-	-	-	-
6,3	mm	-	-	(c1)	47-64	-	-	-	-
4		(c1)	40-52	(c1)	12-30	(c1)	30-44	(c1)	27-39
2		2	25-40	2	11-18	2	22-30	2	22-32
1		-	(c2)	6-14	-	-	(c2)	15-28	(c)
0,5		(c2)	11-19	-	(c2)	12-21	(c2)	12-25	-
0,25		-	-	-	-	-	-	-	-
0,125		(c2)	6-10	-	(c2)	7-13	-	-	-
0,063		0,063	5-8	0,063	2-5	0,063	4-9	0,063	7-11
Curva granulométrica						GA _E			
Referência normativa		EN 13108-1 e NP EN 13043				NP EN 13043			

Figura 3.3 – Requisito do fuso granulométrico AC 14 surf (EP, 2008)

Para o cálculo dos fusos inferior e superior, inicialmente determinou-se a variação que existe em cada peneiro que compõe a curva do equivalente português (EP, 2008). No caso do fuso inferior subtraímos metade dessa média à percentagem de material passado em cada peneiro da curva média ou de referência, resultante da aproximação à curva de máxima potência, fazendo o inverso para o fuso superior. Posteriormente definiram-se as curvas com granulometria contínua para a primeira série de misturas a produzir, sendo a primeira a

mistura de referência (14Gm34), e a segunda (14Gi34) e terceira (14Gs34) misturas as correspondentes aos fusos inferior e superior, de acordo com as Figuras 3.4 a 3.6.

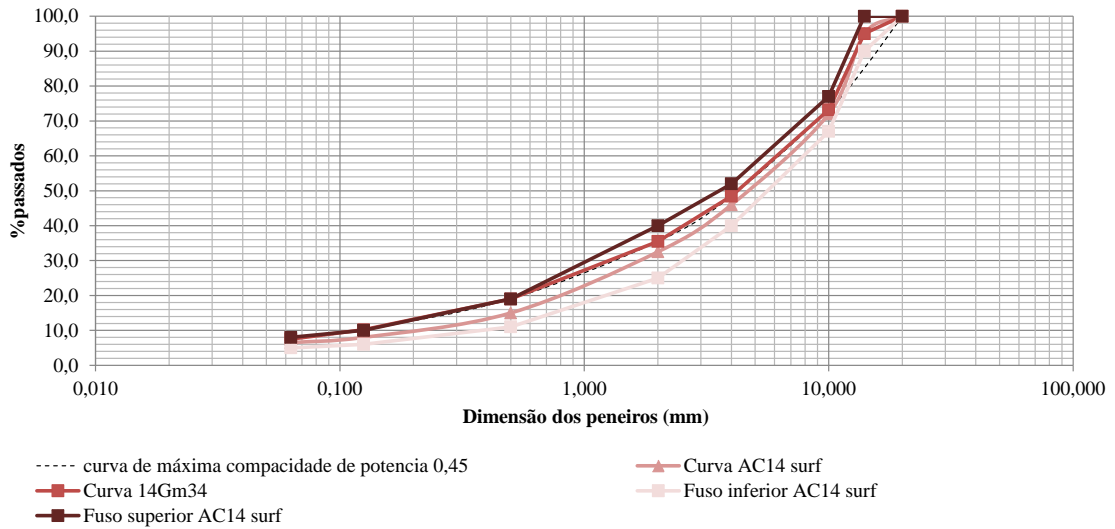


Figura 3.4 – Curva de referência para a mistura 14Gm34

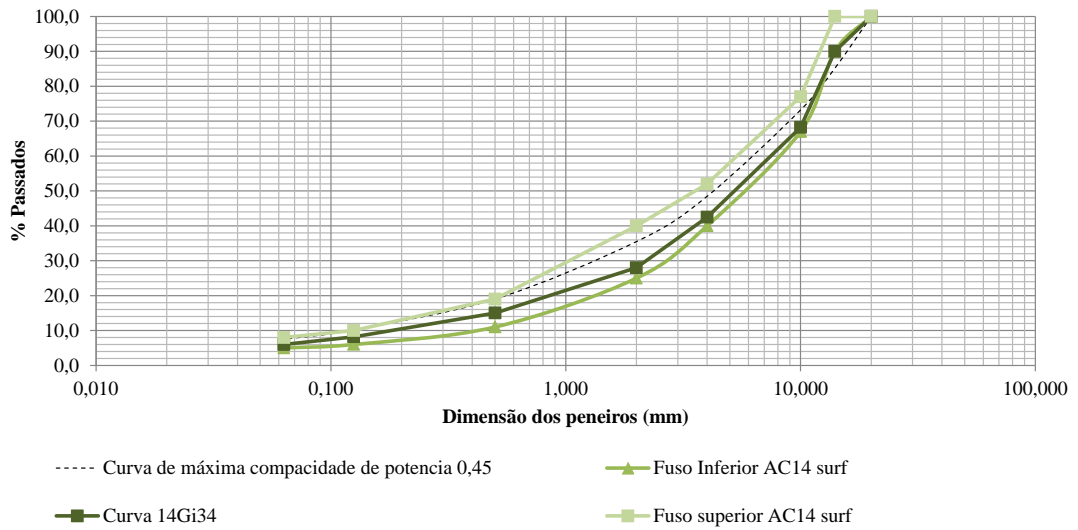


Figura 3.5 – Curva de referência para mistura 14Gi34

Dimensão do peneiro (mm)

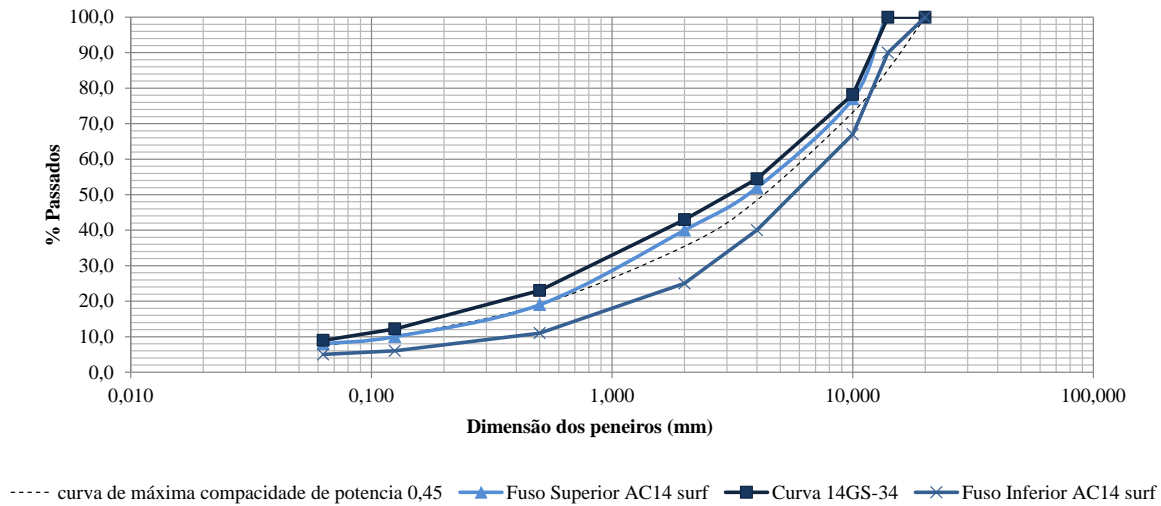


Figura 3.6 – Curva de referência para mistura 14Gs34

Em seguida determinou-se uma nova curva granulométrica para a quarta mistura (20Gm34), que apresenta uma dimensão máxima dos agregados mais elevada do que a utilizada nas primeiras três misturas. Finalmente definiu-se a composição da quinta mistura (14Gm89), que tem a mesma granulometria da mistura 1 de referência (mudando apenas o tipo de betume).

Tal como tinha sido realizado anteriormente, para a curva uma dimensão máxima dos agregados mais elevada verificou-se qual a curva utilizada habitualmente em Portugal para misturas para camadas de base, com uma dimensão máxima dos agregados de 20 mm, e verificou-se que esta é a mistura AC 20 base, cujo fuso é apresentado na Figura 3.7. Esses valores foram comparados com os valores propostos pelo SUPERPAV para uma mistura com granulometria equivalente ($D=25\text{mm}$).

Ao traçar a curva de referência para esta mistura de base, que foi traçada seguindo os mesmos critérios anteriormente descritos, verificou-se que o fuso português não considera o peneiro de 10 mm, passando do peneiro de 4 mm para o peneiro 12,5 mm. Como se pretende que a curva equivalente portuguesa tenha como base a curva de máxima potência 0,45, determinou-se a percentagem passada no peneiro 10 mm por interpolação.

Quadro 14.03.2b: Camadas de misturas betuminosas a quente								
Camada de base								
Tipo de mistura		AC 32 base (MB)	AC 20 base (MB)		AC20 base (MBAM)			
		rubrica 14.03.2.1.1	rubrica 14.03.2.1.2		rubrica 14.03.2.1.3			
Peneiros Série Base + Série 2	Unidade	Percentagem acumulada do material passado						
40	mm	1,4D	100	-	-	-	-	
31,5		D	90 - 100	1,4D	100	1,4D	100	
20		(c1)	68 - 93	D	90 - 100	D	90 - 100	
16		-	-	-	-	-	-	
14		-	-	-	-	-	-	
12,5		-	-	(c1)	57 - 86	-	-	
10		-	-	-	-	(c1)	63 - 81	
6,3		(o1)	40 - 60	-	-	-	-	
4		-	-	(o1)	34 - 49	(o1)	42 - 57	
2		2	26 - 41	2	26 - 41	2	27 - 41	
1		-	-	-	-	-	-	
0,5		(c2)	12 - 26	(c2)	12 - 26	(c2)	11 - 23	
0,125		(o2)	4 - 14	(o2)	4 - 14	(o2)	7 - 13	
0,063		0,063	2 - 7	0,063	2 - 7	0,063	5 - 9	
Referência normativa		EN 12105-1 e NP EN 12043						

Figura 3.7 – Requisito do fuso granulométrico da mistura AC 20 Base (EP, 2008)

Assim, as curvas com granulometria contínua da quarta (20Gm34) e quinta (14Gm89) misturas, correspondentes à mistura com uma dimensão máxima dos agregados mais elevada e à mistura com betume mais mole, são apresentadas nas Figuras 3.10 e 3.11.

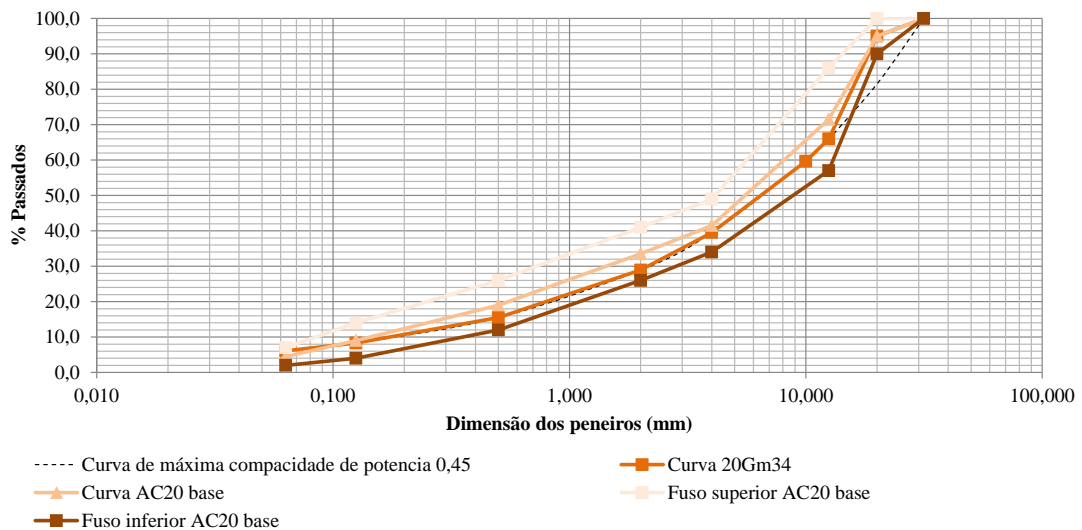


Figura 3.8 – Curva de referência para a mistura 20Gm34

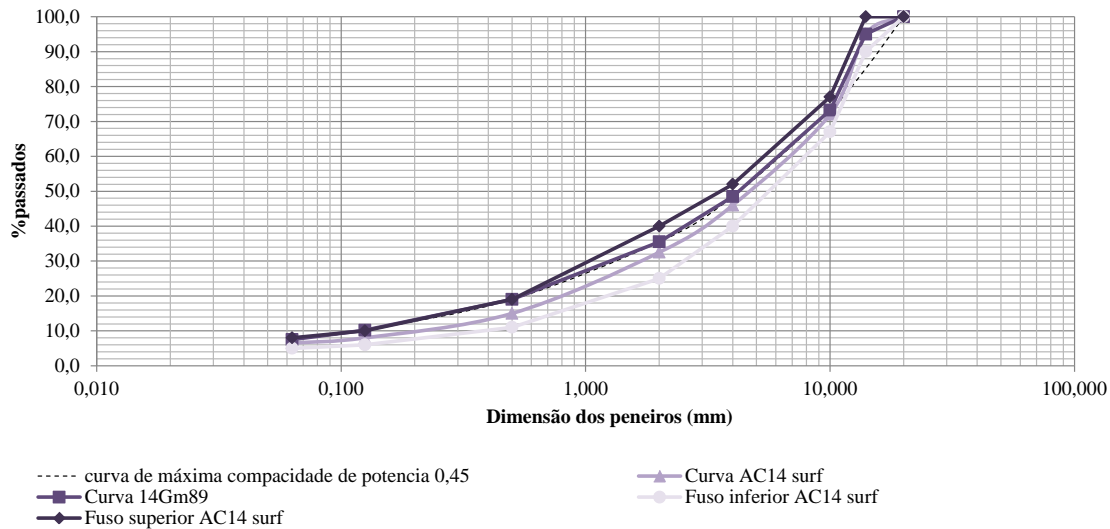


Figura 3.9 – Curva de referência para a mistura 14Gm89

Após definir as cinco curvas de referência a utilizar, nesta fase procedeu-se à definição da curva granulométrica a usar efetivamente no fabrico de cada uma dessas misturas (Figuras 3.10 a 3.13), obtidas por ajuste numérico com base nos agregados disponíveis. Procurou-se que as curvas granulométricas reais ficassem praticamente sobrepostas às curvas de referência para assegurar que se conseguia estudar corretamente os parâmetros em análise. Qualquer tipo de variação no ajuste podia corresponder a uma alteração no comportamento da mistura.

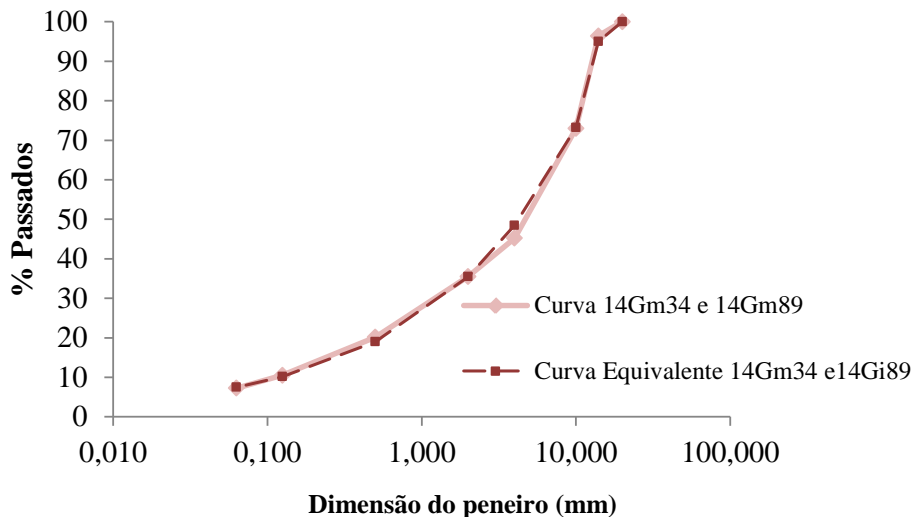


Figura 3.10 – Curva granulométrica efetiva das misturas 14Gm34 e 14Gm89

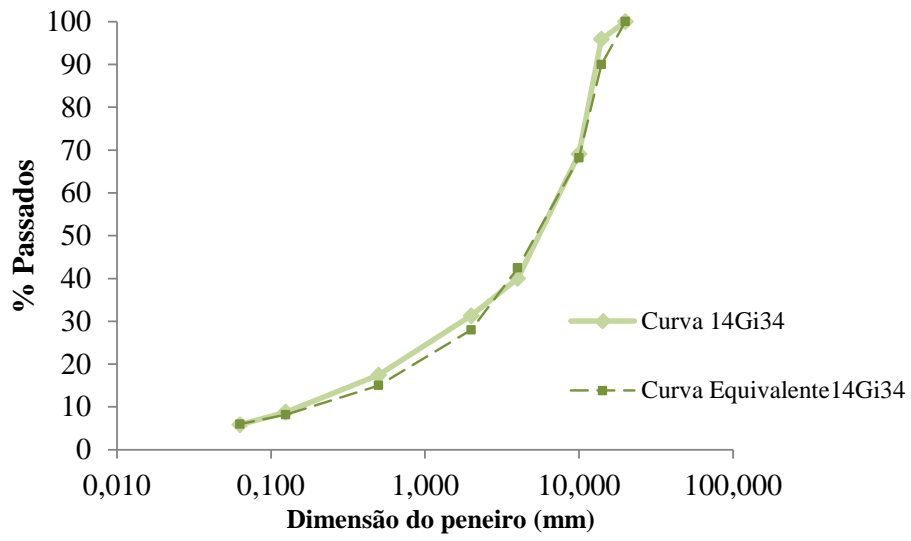


Figura 3.11 – Curva granulométrica efetiva da mistura 14Gi34

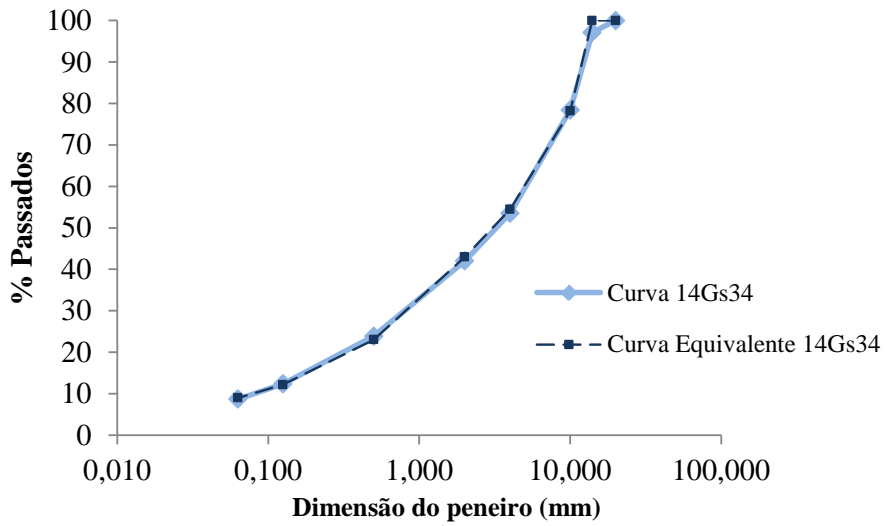


Figura 3.12 – Curva granulométrica efetiva da mistura 14Gs34

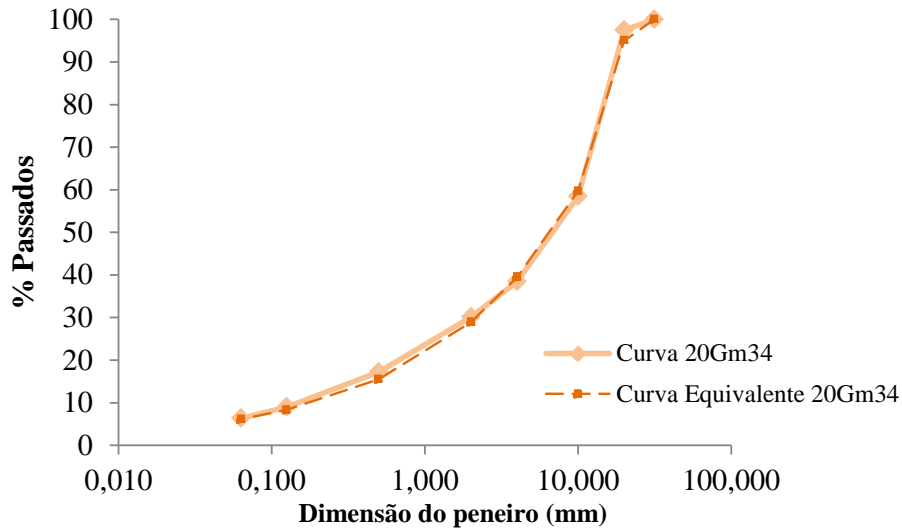


Figura 3.13 – Curva granulométrica efetiva da mistura 20Gm34

Para uma melhor análise comparativa entre as diferentes curvas granulométricas utilizadas, as curvas finais efetivamente utilizadas para as várias misturas são apresentadas em conjunto na Figura 3.14.

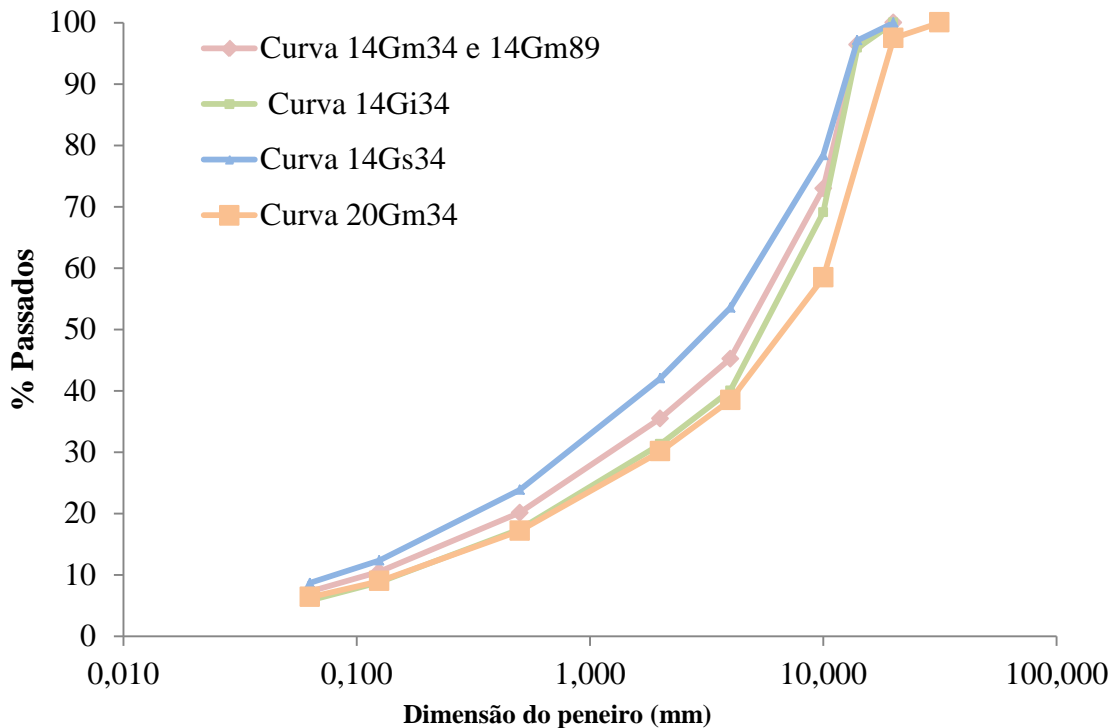


Figura 3.14 – Curvas granulométricas efetivamente utilizadas para as várias misturas

As quantidades de agregados a utilizar em cada mistura, apresentadas na Tabela 3.1, foram obtidas de forma a garantir o melhor ajuste possível da granulometria efetiva às curvas granulométricas de referência, tal como foi explicado anteriormente. Pode verificar-se que houve variações consideráveis nas frações utilizadas para produzir cada mistura.

Tabela 3.3 – Quantidade de material utilizado para produzir cada mistura

Mistura	14/20	6/14	4/6	0/4	Filer comercial
14Gm34	0,0%	45,0%	9,0%	43,5%	2,5%
14Gi34	0,0%	51,0%	8,0%	39,0%	1,5%
14Gs34	0,0%	36,0%	9,0%	52,0%	3,0%
20Gm34	28,0%	24,0%	9,0%	37,0%	2,0%
14Gm89	0,0%	45,0%	9,0%	43,5%	2,5%

Para se compreender melhor as diferenças de composição resultantes da utilização de cada uma das granulometrias em estudo, na Figura 3.15 pode observar-se o esqueleto mineral que resulta de cada uma dessas granulometrias, neste caso quando se compactaram as misturas e se prepararam os provetes correspondentes para serem ensaiados no ensaio de pista.

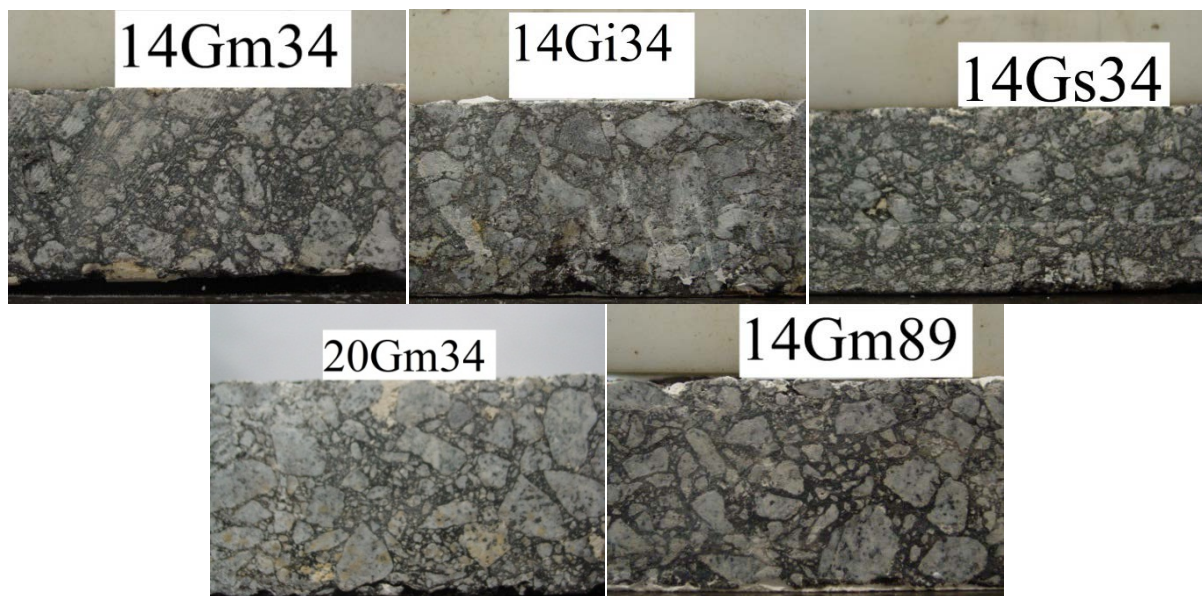


Figura 3.15 – Aspeto do esqueleto mineral obtido com as diferentes granulometrias nas misturas produzidas para o ensaio de pista

Pode-se assim verificar algumas diferenças entre os diferentes tipos de granulometrias. Por exemplo, a mistura 20Gm34 tem os agregados com maior dimensão, e também vemos que a mistura 14Gi34 tem maior quantidade de grossos e vazios, ao contrário da mistura 14Gs34 que tem a maior quantidade de agregados finos e mastique.

3.3.2 Definição e cálculo da percentagem de betume

Após definição das curvas granulométricas dos agregados a utilizar, foi escolhido o betume a utilizar. Foi assim escolhido o betume 35/50 para a primeira série de misturas, ou seja, para as misturas 14Gm34, 14Gi34 e 14Gs34. Este betume foi escolhido por ser um betume usual em Portugal. Este betume foi ainda utilizado para na mistura 20Gm34 da segunda série. Para a mistura 14Gm89 utilizou-se um betume 70/100, usual em vários países. Este betume foi preparado em laboratório com betume 35/50 e 160/220.

Depois de escolhidos os tipos de betume a utilizar e de agregados que compunham as misturas, foram calculadas as amassaduras que iriam ser executadas. Para proceder a esse cálculo foi necessário definir e calcular a percentagem de betume para as misturas.

Para o cálculo dessas percentagens em betume inicialmente foi defendido que esse teor em betume ótimo seria um teor que assegurasse que todos os espaços vazios das misturas estivessem preenchidos com betume. Veio a verificar-se que as misturas com estas características perdiam resistência à deformação permanente. Posteriormente começou a verificar-se que o cálculo de teor em betume ótimo seria o que cobrisse a superfície dos agregados, pois estas asseguravam importantes características, como a impermeabilidade, trabalhabilidade e resistência da mistura (Silva 2002).

Assim, o cálculo dos teores em betume foi efetuado com base na superfície específica dos agregados. Esta forma foi utilizada porque para a execução da formulação Marshall ia ser necessário fazer 25 misturas, o que se traduzia num trabalho que seria inexecutável no tempo disponível para fazer a parte experimental do trabalho. Também se poderia ter utilizado o mesmo teor em betume para todas as misturas, mas como as misturas tinham diferentes quantidades de agregados finos, o que obriga a utilizar diferentes teores de betume para as envolver, isso iria originar resultados insatisfatórios para o estudo em causa.

Assim sendo, para o cálculo da percentagem em betume (Equação 3.2) das misturas betuminosas tem de ser determinado em primeiro lugar o teor em betume, com base na Equação 3.3 (APORBET, 1998).

$$\%b = \frac{P_b}{P_{\text{mistura}}} = \frac{P_b}{P_b + \frac{P_b}{t_b}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{t_b} + 1\right)} \quad (3.2)$$

$$P_b = \alpha * K * \sqrt[5]{\Sigma} \quad (3.3)$$

Sendo:

P_b – teor em betume (em relação ao peso do agregado), em percentagem;

$\alpha = 2,5/\gamma_a$, sendo γ_a a massa volúmica da mistura de agregados, em g/cm^3 ;

K – módulo de riqueza em betume;

Σ – superfície específica dos agregados, em m^2/kg , determinada com base na Equação 3.4.

$$\Sigma = \frac{0.25*G+2.3*S+12*s+135*f}{100} \quad (3.4)$$

Em que:

G – proporção ponderal de elementos superiores a 6,3mm;

S – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,315mm e 6,3mm;

s – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,075mm e 0,315mm;

f – proporção ponderal de elementos inferiores a 0,075mm;

Utilizando então as Equações 3.2 a 3.4 para cada uma das misturas betuminosas utilizadas obteve-se o resultado da percentagem de betume (%b) para cada mistura em estudo, tal como se apresenta na Tabela 3.2. Sendo desejável que a variação do teor em betume tivesse uma influência reduzida no comportamento das misturas, verificou-se que todas as percentagens de betume estavam dentro duma gama de valores próxima, ou seja, ente 5,01% e 5,36%. O cálculo de G , S , s e f foi feito com base em interpolações das curvas granulométricas.

Tabela 3.4 – Teor em betume para cada mistura

Mistura	G	S	s	f	α	K	Σ	P_b	%b
14Gm34	44,1	40,5	7,5	7,9	1	3,3	12,6	5,48	5,19
14Gi34	48,8	38,0	6,8	6,4	1	3,3	10,4	5,28	5,01
14Gs34	36,9	44,9	8,8	9,4	1	3,3	14,9	5,66	5,36
20Gm34	53,9	33,0	6,3	6,9	1	3,3	10,9	5,32	5,05
14Gm89	44,1	40,5	7,5	7,9	1	3,3	12,6	5,48	5,19

Depois de finalizados estes cálculos procedeu-se às amassaduras necessárias para a execução das lajes para os ensaios de pista e de sensibilidade à água. Pelo fato de serem lajes para

Efeito da composição das misturas betuminosas na sensibilidade à água e resistência à deformação permanente

diferentes ensaios, estas também têm diferentes dimensões, estando estas normalizadas nas respetivas normas.

3.3.3 Preparação dos agregados

Os agregados graníticos foram previamente recolhidos numa pedreira da zona Norte de Portugal. Esta pedreira é certificada, o que se traduz numa boa qualidade e homogeneidade dos agregados. Os agregados possuem uma determinada quantidade de água absorvida, pelo que se torna fundamental assegurar que os agregados estão bem secos na altura da pesagem, para assim garantirmos que o peso corresponde apenas aos agregados secos. Assim, todos os agregados foram colocados na estufa (Figura 3.15), pelo menos 24 h antes de serem pesados, para se garantir o cumprimento da formulação desejada durante a pesagem.



Figura 3.16 – Estufa utilizada para manter os agregados secos e manter os materiais às temperaturas de mistura

Depois de secos, os agregados foram pesados numa balança de elevada sensibilidade. A ordem pela qual foram pesados foi a seguinte: o pó 0/4, o filer comercial, a brita 4/6 e depois a brita 6/14 e 14/20. Após esta pesagem o balde com os agregados é colocado de novo dentro da estufa para manter os agregados à temperatura pretendida para a produção das lajes.

3.3.4 Preparação dos betumes

Os betumes utilizados foram o betume 35/50 e o 70/100. O primeiro é um betume comercial mais duro, muito utilizado em Portugal, tornando-se assim uma referência para o estudo uma vez que foi pretendido aproximar o estudo à realidade existente no nosso país. Já a utilização

do betume mais mole 70/100 resulta de este ser muito utilizado em vários países a nível mundial, como países europeus nórdicos ou países africanos.

O primeiro betume foi recolhido diretamente do produtor, sem ter havido misturas com outros ligantes ou aditivos durante o trabalho. Já o betume 70/100 foi produzido neste trabalho pela junção de dois betumes no laboratório. A produção do betume 70/100 foi feita através da junção do betume mais duro usado neste trabalho (35/50) e um betume mole comercializado no nosso país (160/220). Durante a mistura dos ligantes, o betume 35/50 estava a uma temperatura de 165 °C e o betume 160/220 a uma temperatura um pouco superior a 140 °C. Estas temperaturas garantiram que o betume se encontrava em estado líquido, para haver uma correta e homogénea junção dos betumes. O ligante 70/100 foi produzido num recipiente no qual deitamos o betume 35/50, ao qual foi posteriormente adicionado o betume 160/220. Para haver uma correta homogeneização do betume foi utilizado o misturador de baixa rotação representado na Figura 3.17. Este é constituído por um motor equipado com uma hélice helicoidal e um balde que permite controlar o betume a uma temperatura constante.

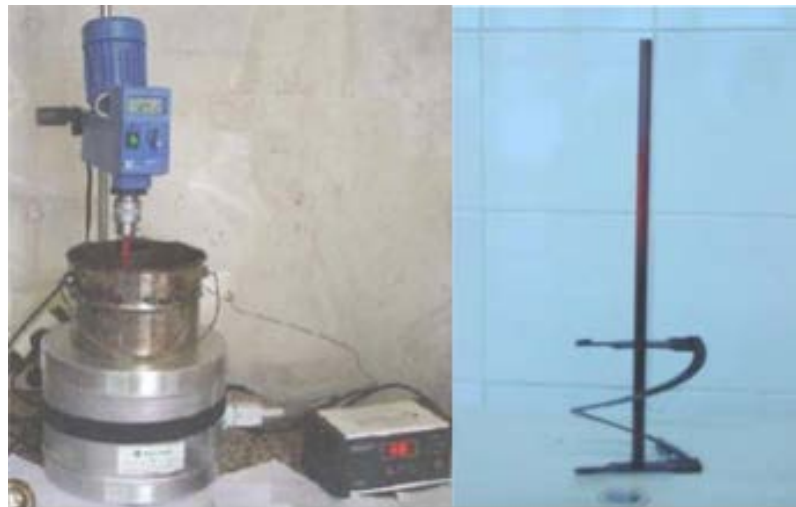


Figura 3.17 – Equipamento para aquecimento do betume e produção do betume 70/100

Foi feita uma primeira tentativa de produção do betume 70/100 com 42% de betume 35/50 e com 58% de betume 160/220, valores que foram definidos matematicamente para ajustar as penetrações conhecidas dos dois betumes à penetração pretendida do novo betume. No entanto, quando se caracterizou o betume verificou-se que a penetração obtida era muito elevada para o pretendido. Assim, alteraram-se as percentagens anteriores subindo a quantidade de betume 35/50 para 45% e descendo a quantidade de betume 160/220 para 55%,

e quando se caracterizou este novo betume verificamos que os valores obtidos estavam dentro da gama de valores pretendidos.

Ambos os betumes foram caracterizados para determinação das propriedades base, com os ensaios normalizados pelas normas EN 1426 (ensaio de penetração) e EN 1427 (ensaio de anel e bola), tal como se descreve posteriormente.

Depois de caracterizados, e antes da produção das lajes, estes betumes foram colocados numa estufa para assegurar que todo o betume estava em estado líquido. Posteriormente o betume foi colocado no equipamento da Figura 3.17 onde se continuou o aquecimento para atingir de forma homogénea as temperaturas pretendidas (que foram controladas através de uma sonda colocada no betume para melhor controlo). As temperaturas a que os betumes devem ser aquecidos para produção de misturas betuminosas estão normalizadas na norma EN 12697-33 e são 160 °C para o betume 35/50 e 140 °C para o betume 70/100.

3.3.5 Ensaio de penetração

Branco *et al.* (2005) disseram que a penetração é uma medida indireta da viscosidade do betume e que é representada pela profundidade, em décimos de milímetros, a que uma agulha com uma determinada medida penetra no betume, sob um certo peso (100 gramas), por um período de tempo definido (5 segundos) e a uma certa temperatura (25 °C), como referido na Figura 3.18. Os betumes convencionais, produzidos por destilação direta, são caracterizados pelos seus limites de penetração. Assim, um betume 35/50 é aquele em que, nas condições de ensaio referidas, a agulha penetra no ligante entre 3,5 e 5,0 mm (35 e 50 décimos de mm).

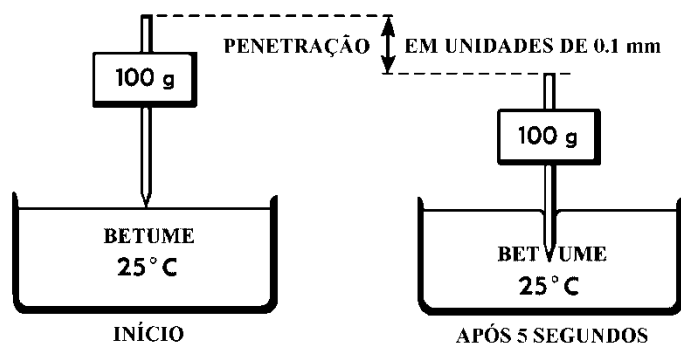


Figura 3.18 – Imagem do equipamento do ensaio de penetração

A norma europeia EN 1426 refere que este ensaio deve ser realizado nas condições referidas anteriormente, e especifica que a posição da ponta da agulha no momento em que se inicia o ensaio deve ser a superfície do betume, garantindo que a posição zero é a superfície do betume. Segundo a mesma o ensaio deve ser repetido pelo menos três vezes em três locais diferentes, garantindo que estes locais estão afastados, no mínimo, 10 mm entre si e do bordo do copo.

Para realizar esta caracterização recolheu-se dois copos de amostras, dos dois betumes em estudo. Esperou-se que o betume atingisse a fase sólida, e depois de esta fase ser atingida os copos foram colocados em banho-maria a 25 °C, do qual foram retirados apenas na altura em que o ensaio de penetração começou. Foram feitas quatro penetrações para cada betume, e fixou-se como valor de penetração o valor médio, como está normalizado.

3.3.6 Ensaio de anel e bola para determinação do ponto de amolecimento

O ensaio de anel e bola é realizado para determinar a temperatura de amolecimento do betume, que tem uma correlação mais próxima com o desempenho das misturas betuminosas às deformações permanentes, em estudo neste trabalho. O ensaio consiste na recolha de amostras de betume para dois anéis de latão, onde se espera que o betume arrefeça. Depois, estes anéis são colocados num suporte e este conjunto (Figura 3.19) é colocado num copo com água, que é colocado numa superfície que vai aquecer a água a uma razão de 5 °C por minuto (Figura 3.20), o que faz com que o betume aqueça e comece a amolecer e a fluir de forma mais rápida. Quando a bola e o betume amolecido toquem numa base que esta colocada a 25 mm regista-se a temperatura de amolecimento do betume.

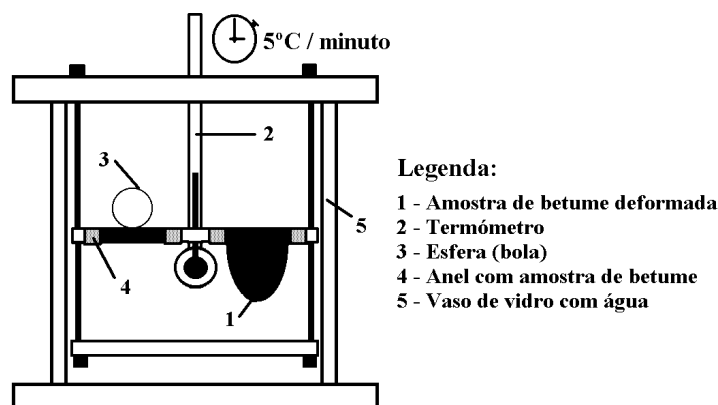


Figura 3.19 – Esquema representativo do ensaio de anel e bola



Figura 3.20 – Ensaio de anel e bola realizado no laboratório

A norma europeia para a determinação do ponto de amolecimento é a EN 1427. Uma das principais diferenças desta norma em relação às anteriores, incluindo a ASTM D36-95, é o facto de a norma não incluir um agitador para que o líquido que envolve as amostras seja agitado, embora esse agitador tenha sido utilizado por uma questão de homogeneizar a temperatura em toda a água existente no copo.

3.3.7 Produção e compactação das misturas betuminosas

Após a definição das curvas granulométricas a serem usadas durante a execução dos trabalhos, e já com as percentagens de agregados, teor em betume e tipo de betume seleccionados, procedeu-se ao cálculo das amassaduras a realizar para compactação das lajes.

Foi necessário produzir dois tipos de lajes, uma para o ensaio de pista (WTT) e outra para o ensaio de sensibilidade à água (SA). As alturas das lajes foram definidas recorrendo à norma europeia EN 12697-22 para o ensaio de pista e à norma EN 12697-12 para o ensaio de sensibilidade à água.

Assim, para as lajes “WTT” das misturas com o $D=14\text{mm}$ definiu-se uma altura de 4,0cm, comprimento 75,2 cm e largura 49,2 cm. Devido à maior dimensão dos agregados da mistura 20Gm34, e de acordo com a norma EN 12697-22, foi necessário usar dimensões diferentes para compactação da laje “WTT”, definindo-se uma altura de 6,0 cm, comprimento 75,2 cm e largura 49,2 cm. Em seguida, para as lajes de sensibilidade à água foi utilizada uma altura de

8,0 cm (para ser possível retirar carotes com altura ligeiramente inferior, de 6,3), sendo o comprimento das lajes 37,5 cm e a sua largura 49,2 cm.

Após a definição destas medidas, e com as informações obtidas anteriormente relativas às percentagens de cada um dos agregados e de betume a utilizar, foram definidas e calculadas as amassaduras, que contemplam o peso de cada tipo de agregado e de betume (Tabela 3.3).

Como já foi referido todos os materiais foram devidamente aquecidos à temperatura que a norma EN 12697-35 indica para cada uma das misturas. Essas temperaturas dependiam do tipo de betume utilizado, e assim a mistura que usou betume 70/100 na sua constituição pode utilizar os agregados e o betume a uma temperatura muito mais baixa, o que baixou também a temperatura de mistura e de compactação.

Tabela 3.5 – Quantidades em gramas que compõe as diferentes amassaduras/lajes

Mistura	Brita 14/20	Brita 6/14	Brita 4/6	Pó 0/4	Filer comercial	Betume 35/50	Betume 70/100
14Gm34 (WTT)	-	12708	2542	12284	706	1546	-
14Gm34 (SA)	-	15692	3138	15169	872	1909	-
14Gi34 (WTT)	-	14606	2269	11601	213	1496	-
14Gi34 (SA)	-	18036	2802	13658	525	1847	-
14Gs34 (WTT)	-	10127	2532	14628	844	1593	-
14Gs34 (SA)	-	12505	3126	18063	1042	1967	-
20Gm34 (WTT)	14464	12397	4649	19113	1033	2747	-
20Gm34 (SA)	9820	8417	3156	12977	701	1865	-
14Gm89 (WTT)	-	12708	2542	12284	706	-	1546
14Gm89 (SA)	-	15692	3138	15169	872	-	1909

Para a produção da mistura betuminosa utilizou-se uma misturadora (Figura 3.21) cuja bacia onde se procedeu à mistura foi colocada antes na estufa para minimizar as perdas de temperatura dos agregados e do betume durante a produção. Após isto os agregados foram colocados na panela, os quais foram mexidos antes de adicionar o betume para que houvesse uma homogeneização dos materiais. Posteriormente foi adicionado o betume e toda a mistura foi agitada durante 2 minutos, de acordo com EN 12697-35, de modo a garantir um adequado envolvimento dos agregados pelo betume.



Figura 3.21 – Misturadora com mistura betuminosa

De cada amassadura retirou-se uma amostra (Figura 3.22) com aproximadamente dois quilogramas para se realizar a determinação da baridade máxima teórica (BMT), de acordo com a norma EN 12697-5. Esta mistura foi mexida várias vezes para evitar a agregação dos materiais antes de se realizar o ensaio indicado.



Figura 3.22 – Amostra retirada para determinação da baridade máxima teórica

Antes de a amassadura começar a ser executada foi preparado o molde onde a mistura iria ser colocada. Assim, foi necessário considerar a dimensão das lajes a produzir para se colocar o molde com a largura e altura desejada. Além disto, a placa de metal onde a mistura foi depositada e compactada foi colocada dentro da estufa para não existir uma diferença térmica muito elevada entre a superfície onde iria se ia efetuar a compactação e a mistura. A mesma placa foi também pincelada com um material de desconfrangem para a mistura não aderir à placa após a produção da laje.

A compactação da mistura (Figura 3.23) ocorreu de acordo com a norma EN 12697-35. Para a compactação foi utilizado um cilindro de rastos liso e um molde metálico já existente no laboratório. O cilindro utilizado é um cilindro que se encontra normalizado pela norma EN 12697-33 que é utilizada para compactações laboratoriais com este equipamento. Na compactação das misturas considerou-se que a mesma não poderia ser muito demorada, porque após a mistura arrefecer já não se consegue adensar da mistura, além de se poder impor fendilhamento causado pela elevada rigidez do cilindro.

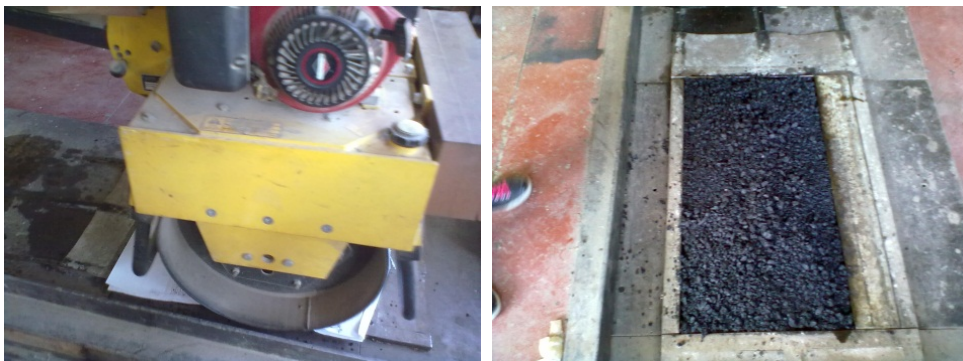


Figura 3.23 – Cilindro de rasto liso e mistura a compactar

3.3.8 Baridade máxima teórica e volume de vazios das misturas

Como anteriormente referido, quando se efetuaram as amassaduras das misturas foram retirados dois quilos que mistura para o cálculo da baridade máxima teórica (BMT) de cada uma das misturas. Para determinar os valores da BMT de cada mistura utilizou-se o procedimento experimental da norma EN 12697-5.

Este procedimento consiste em colocar os dois quilos de amostra num picnómetro, e de seguida obtém-se o peso da mistura e do picnómetro em conjunto. Após isto coloca-se água até cobrir todos os materiais da mistura, e coloca-se na parte de cima do picnómetro um tubo que aplica vácuo ao picnómetro, ficando este a vibrar deste modo durante 15 minutos (para retirar todo o ar existente na amostra). No final deste processo acaba de se encher o picnómetro com água, e este é novamente pesado (medindo-se a temperatura de ensaio).

Em seguida calculou-se o volume de vazios (V_v) dos diversos provetes de ensaio (Equação 3.6) para as diferentes misturas betuminosas em estudo. Para isso foi necessário determinar inicialmente a baridade aparente (BA) de cada carote ou lajeta, com base na Equação 3.7,

Efeito da composição das misturas betuminosas na sensibilidade à água e resistência à deformação permanente

após determinar o peso seco e o volume de cada provete (lajetas do ensaio de pista e carotes do ensaio de sensibilidade à água).

$$V_v = \frac{BMT - Ba}{BMT} \quad (3.6)$$

$$BA = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volume}} \quad (3.7)$$

3.3.9 Ensaio de pista

Para compreender melhor o fenómeno da deformação permanente é utilizado habitualmente o ensaio de pista ou *wheel tracking* (WTT). Este ensaio permite uma aproximação ou simulação da realidade a que um pavimento está sujeito em termos de deformação permanente.

O ensaio de pista permite variar a forma como é realizado. Assim, neste ensaio pode alterar-se a dimensão do equipamento, o tipo de carga, a forma como a carga é aplicada, qual a intensidade de aplicação da carga, diâmetro e tipo de roda, a velocidade a que é ensaiado e a temperatura a que se realiza este ensaio.

Existem vários tipos de equipamentos que permitem efetuar estes ensaios de pista, sendo que neste trabalho foi utilizado o equipamento de ensaio pequeno com condicionamento em ar. Este equipamento foi utilizado para ensaiar segundo o método B da norma EN 12697-22. Possui na parte inferior um motor que transmite um movimento circular a uma placa, que transforma o movimento circular num movimento linear do tipo “vai e vem” correspondente a cada ciclo de carga para ensaio das lajetas. De facto, durante o movimento “vai e vem” da lajeta, esta é solicitada por uma roda com um determinado peso colocada sobre a superfície da lajeta e que vai provocando uma deformação permanente crescente da mistura, simulando o que acontece na estrada. Essa roda tem a superfície em borracha para que a mistura esteja sujeita a condições que simulem o efeito do contacto pavimento/pneu.

As lajetas que foram utilizadas neste trabalho tinham altura compreendida entre os 4 e os 6 centímetros de altura, em função da dimensão máxima dos agregados (tal como indicado na norma EN 12697-22). A mesma norma também diz que as lajetas devem ter como medidas

laterais $300 \times 300 \text{ mm}^2$. Assim, foram retiradas por serragem de cada laje compactada dois provetes de ensaio (lajetas) com as dimensões normalizadas.

Antes de serem ensaiadas, as nas lajetas foram colocadas na mesa de ensaio, á qual ficaram perfeitamente aderentes pelo preenchimento das interfaces com gesso. Esse procedimento está contemplado na norma 12697-22, onde se verifica que a correção das imperfeições deve ser feita em todas as faces laterais das lajetas (Figura 3.24). O facto de se fazer este acondicionamento causa menores deformações e menos dispersão dos resultados dos ensaios.



Figura 3.24 – Laje acondicionada e preparada para o ensaio de pista

Efetuiu-se uma alteração no acondicionamento da laje de seis centímetros de altura, pois o prato onde é colocado a lajeta está habitualmente reparado para lajetas de 4 centímetros de altura, o que impedia um correto acondicionamento da lajeta. Foi então necessário acrescentar uma peça em metal às duas cantoneiras que se encontram na parte da frente e de trás do molde da mesa de ensaio (Figura 3.25), pois estas não permitiam o acondicionamento correto da lajeta. Essa peça foi segura com auxílio de uma cola epóxida.



Figura 3.25 – Pormenor do aumento nas cantoneiras para a laje com 6 cm de altura

A realização do ensaio de pista para determinação da deformação permanente das misturas betuminosas (Figura 3.26), tal como foi anteriormente referido, vai seguir a metodologia

Efeito da composição das misturas betuminosas na sensibilidade à água e resistência à deformação permanente

indicada na norma EN 12697-22. Assim, a frequência aplicada durante os ensaios aos provetes será de 21 ciclos por minuto, o ensaio de deformação terá uma duração de 10000 ciclos. A temperatura a que se vai realizar o ensaio pode variar, mas neste trabalho será de 50 °C, enquanto a roda aplica uma tensão de contacto com a lajeta de 700N.



Figura 3.26 – Imagem do ensaio de pista realizado

3.3.10 Ensaio da sensibilidade à água

A sensibilidade à água é uma propriedade que é determinada de acordo com a norma europeia EN 12697-12. Esta norma veio substituir, em parte, um método já utilizado em Portugal e que servia para calcular a resistência conservada, que era a MIL-STD-602A.

Para a realização deste ensaio foram necessários seis provetes. Como referido anteriormente, a compactação dos provetes foi feita com um cilindro, produzindo-se uma laje de cada mistura de onde foram retirados os provetes por carotagem. Estes provetes poderiam ter sido compactados através do método de compactação por impacto de Marshall, mas por uma questão de se simular de forma mais próxima a compactação que se aplica efetivamente em obra optou-se por este método.

Após a compactação das lajes deu-se a extração de todos os carotes (Figura 3.27). Os carotes foram extraídos com uma broca que tem como diâmetro interior 10,16 cm, tal como indicado na norma EN 12697-12. Estes provetes devem ter como dimensões 10,16 cm de diâmetro e 6,3 cm de altura. Como foram extraídos de lajes com 8,0 cm de altura, foi necessário retirar

1,7 cm de altura nos topos dos provetes (no total), ao mesmo tempo que se conseguiu obter com esse processo carotes com faces muito mais regulares e lisas.



Figura 3.27 – Preparação dos carotes para os ensaios de sensibilidade à água

Os seis provetes foram divididos em dois grupos de três provetes cada um, com características volumétricas (volume de vazios) semelhantes. O grupo de três provetes que vão ser mergulhados em água são colocados sobre vácuo para que todos os poros sejam saturados com água, maximizando o seu efeito negativo, e esse vácuo é aplicado durante trinta minutos a uma pressão de vácuo de 670 Mbar. Depois disto os mesmos provetes são colocados em água a 40 °C durante 72 horas, e no final deste tempo são colocados em banho-maria durante 2 horas a 15 °C. Os três provetes que não são acondicionados em água são apenas colocados no frigorífico durante 2 horas, à mesma temperatura de 15 °C (para que os resultados de ambos os conjuntos sejam comparáveis).

Após os carotes terem sido colocados sobre estas condições, procedeu-se ao ensaio de tração indireta (Figura 3.28), normalizado pela norma EN 12697-23, para se calcular a resistência à tração indireta (ITS), e respetiva deformação na rotura, de cada provete ensaiado.

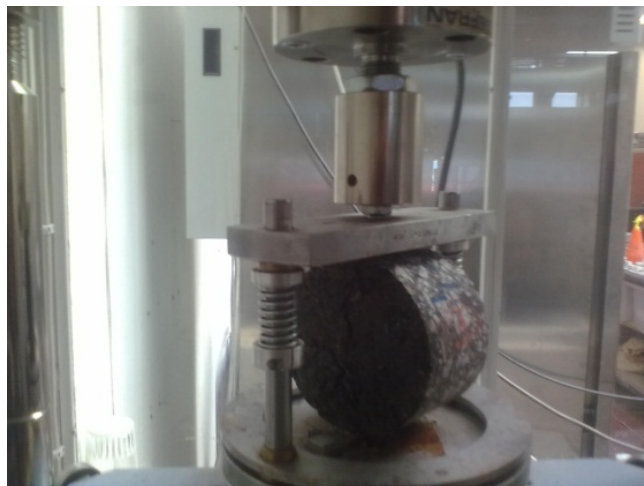


Figura 3.28 – Ensaio de tração indireta

Assim, é possível determinar a sensibilidade à água das misturas, definida pelo índice de tração indireta (ITSR), que é a razão entre a resistência à tração indireta média do grupo de provetes acondicionados em água (ITS_w) e do grupo de provetes que foram acondicionados a seco (ITS_d).

3.4 Caracterização do betume com base nas normas europeias

A norma europeia EN 12591 (1999) apresenta um resumo sobre os betumes que mais se utilizam em pavimentação, onde estão incluídos os betumes utilizados neste trabalho (35/50 e 70/100), tal como a Tabela 4.1 demonstra.

Tabela 3.6 – Resumo da norma EN 12591 para classificação de betumes

Ensaio	Penetração 25°C (0,1mm)		Ponto de amolecimento (°C)		
	EN 1426		EN 1427		
Normas	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
Limites					
	20/30	20	30	55	63
	30/45	20	35	52	60
Designação do betume	35/50	35	50	50	58
	40/60	40	60	48	56
	50/70	50	70	46	54
	70/100	70	100	43	51

100/150	100	150	39	47
160/220	160	220	35	43
250/330	250	330	30	38

Para caracterização dos betumes utilizados, e também para verificação da sua classificação, realizaram-se os ensaios já anteriormente descritos, penetração e anel e bola, com os procedimentos normalizados nas normas EN 1426 e EN 1427.

Os valores obtidos nos ensaios aos betumes, segundo os procedimentos anteriormente referidos, são apresentados na Tabela 4.2, onde se pode comparar com os valores referidos na norma EN 12591 para classificação de cada tipo de betume.

Tabela 3.7 – Penetração e ponto de amolecimento dos betumes 35/50 e 70/100 utilizados

Betume	Penetração 25 °C (0,1mm)		Ponto de Amolecimento (°C)	
	Valores obtidos	Valores de referência	Valores obtidos	Valores de referência
35/50	34	35-50	54,1	50-58
70/100	89	70-100	47,2	43-51

Os valores obtidos nos ensaios básicos de caracterização situam-se dentro dos valores definidos como valores de referência, exceção feita para o betume 35/50 em que a penetração dá um valor um pouco mais baixo. Isto pode ser devido ao facto de o betume estar armazenado há algum tempo e ter envelhecido durante esse período. Como a diferença não é muito significativa, considerou-se este valor aceitável e o betume foi utilizado como referência do betume 35/50 habitualmente utilizado em Portugal.

Salienta-se ainda os valores de penetração obtidos para cada betume (34 e 89), que deram origem à parte final da nomenclatura usada para distinguir cada mistura em estudo. Por último verifica-se uma diferença de 7 °C entre os pontos de amolecimento de ambos os betumes, sendo um dos valores inferior e outro superior a 50 °C. Sendo esta a temperatura a que se realiza o ensaio de pista, será de esperar que a deformação permanente da mistura com o betume 70/100 seja consideravelmente superior à obtida com o betume 35/50.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 Estudo da deformação permanente

As temperaturas das misturas betuminosas imediatamente após a produção, bem como antes da compactação, são as apresentadas na Tabela 4.3. Apesar do controlo rigoroso, estas temperaturas são um pouco inferiores à temperatura ótima definida na norma EN 12697-35, pelo facto de não se conseguir evitar totalmente perdas de temperatura em amassaduras pequenas.

Tabela 4.1 – Temperaturas de fabrico de mistura o seu fabrico e antes compactação

Mistura	Temperatura mistura após produção (°C)	Temperatura da mistura antes da compactação (°C)
14Gm34	143,9	128,2
14Gi34	144,5	129,7
14Gs34	143,6	128,8
20Gm34	142,1	127,6
14Gm89	138,6	123,7

Chama-se à atenção para a temperatura da mistura 14Gm89, produzida com o betume 70/100, que apresenta uma temperatura mais baixa pelo facto de usar um betume mais mole, razão pela qual se definiu que os agregados e o betume seriam aquecidos a uma temperatura mais baixa, o que se refletiu nas temperaturas de produção e compactação medidas.

O volume de vazios é um parâmetro muito importante para o perceber o comportamento de cada mistura à deformação permanente. Assim, foi necessário calcular a baridade aparente (BA), a baridade máxima teórica (BMT) e o volume de vazios (Vv) de cada mistura em estudo, que são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.2 – Valores da baridade aparente, baridade máxima teórica e do volume de vazios das lajetas utilizadas no ensaio de pista

Mistura	BA (g/m ³)	BMT (g/m ³)	Vv (%)
14Gm34	2330,1	2460,7	5,3
14Gi34	2285,1	2452,9	6,8
14Gs34	2311,1	2432,1	5,0
20Gm34	2365,8	2466,3	4,1
14Gm89	2299,9	2486,0	7,5

Tabela 4.3 – Dimensões de cada lajeta do ensaio de pista

Mistura	Espessura de cada canto (mm)				Dimensão de cada lado (mm)			
					Lado de referência		Lado perpendicular	
14Gm34A	41,5	41,4	41,6	41,0	301	299	300	301
14Gm34B	41,3	41,4	41,0	40,7	300	301	301	301
14Gi34A	42,0	41,2	41,4	41,6	300	300	300	300
14Gi34B	41,0	41,0	40,8	41,5	300	301	301	300
14Gs34A	42,0	42,0	42,4	42,0	300	298	299	299
14Gs34B	40,7	41,4	42,0	41,3	300	300	297	299
20Gm34A	62,6	60,8	60,4	62,0	300	301	301	301
20Gm34B	62,6	62,7	62,1	62,8	301	301	300	301
14Gm89A	41,4	41,3	41,6	41,6	304	302	300	300
14Gm89B	41,6	41,6	41,8	42,2	301	301	300	301

Genericamente, o volume de vazios das misturas correspondem ao valor esperado, exceto o valor da mistura 14Gm89 que tem um valor de volume de vazios muito alto e diferentes do esperado (embora também fosse esperado um volume de vazios mais alto para a mistura 20Gm34). Isto pode dever-se à reduzida temperatura de produção, que impediu a compactação e provocou um maior volume de vazios, mas também pode ter resultado de alguma irregularidade dessas lajetas que influenciou o cálculo da sua baridade aparente. As dimensões das lajetas utilizadas no cálculo da BA são apresentadas na Tabela 4.5.

No ensaio de pista existem três resultados que podem ser obtidos para avaliar o desempenho das misturas relativamente à deformação, que são a variação da deformação permanente em ar – *Wheel Tracking Slope in air* (WTS_{air}), a média proporcional da rodeira nas duas lajetas ensaiadas – *Mean Proportional Rut Depth in air* (PRD_{air}) e a média da profundidade da rodeira nas duas lajetas ensaiadas – *Mean Rut Depth in air* (RD_{air}). Destes resultados, aquele que tem sido mais utilizado em Portugal para distinguir as misturas, como consequência da sua maior importância na marcação CE das misturas, é o valor de WTS_{air} .

No ensaio de pista são ensaiadas duas lajetas de cada mistura, embora se utilize como resultado final de desempenho a média dos resultados obtidos. Assim, para exemplificação desse princípio, na Figura 4.1 apresenta-se a variação da deformação obtida para as duas

lajetas de uma das misturas em estudo (14Gi34), bem como o resultado equivalente médio considerado para comparação das várias misturas.

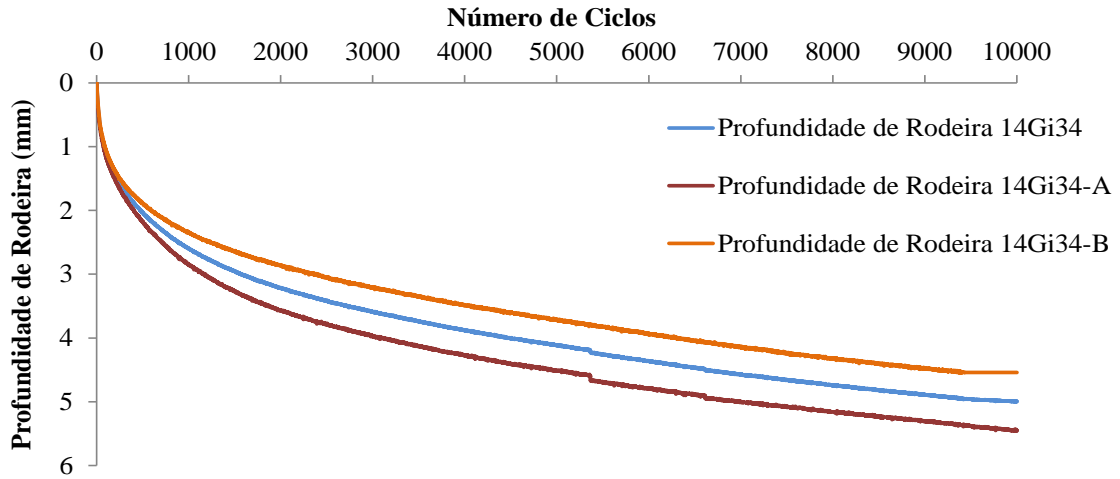


Figura 4.1 – Variação da deformação permanente das duas lajetas da mistura 14Gi34 no ensaio de pista e representação do resultado médio equivalente da mistura

Com base nos resultados médios equivalentes de cada mistura em estudo, na Figura 4.2 foi possível representar de forma comparativa os resultados da variação da deformação permanente para as diferentes misturas em estudo durante o ensaio de pista.

Com base nos gráficos da Figura 4.2 é possível determinar os valores médios para cada um dos parâmetros de deformação acima referidos (WTS_{air} , PRD_{air} e RD_{air}), cujos resultados são apresentados na Tabela 4.5 após realização do ensaio de pista nas várias misturas em estudo.

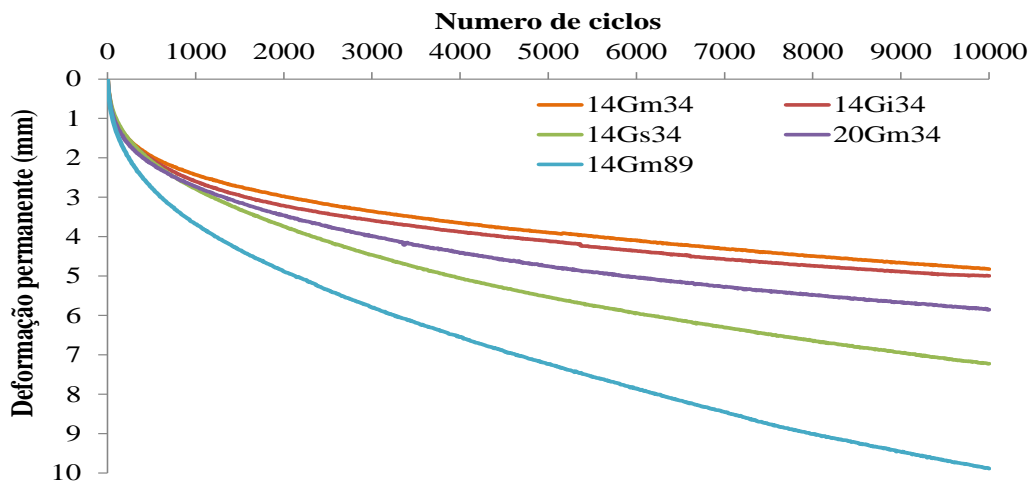


Figura 4.2 – Variação da deformação permanente durante os ensaios de pista

Tabela 4.4 – Resultados de deformação permanente no ensaio de pista

Mistura	WTS _{air} (mm/10 ³ ciclos)	PRD _{air} (%)	RD _{air} (mm)
14Gm34	0,18	11,67	4,82
14Gi34	0,18	12,07	4,94
14Gs34	0,34	17,30	7,81
20Gm34	0,22	9,41	5,84
14Gm89	0,52	23,67	9,85

Por último, a Figura 4.3 apresenta fotos da profundidade de rodeira obtida no ensaio de pista, numa das lajetas ensaiadas para cada mistura betuminosa em estudo.

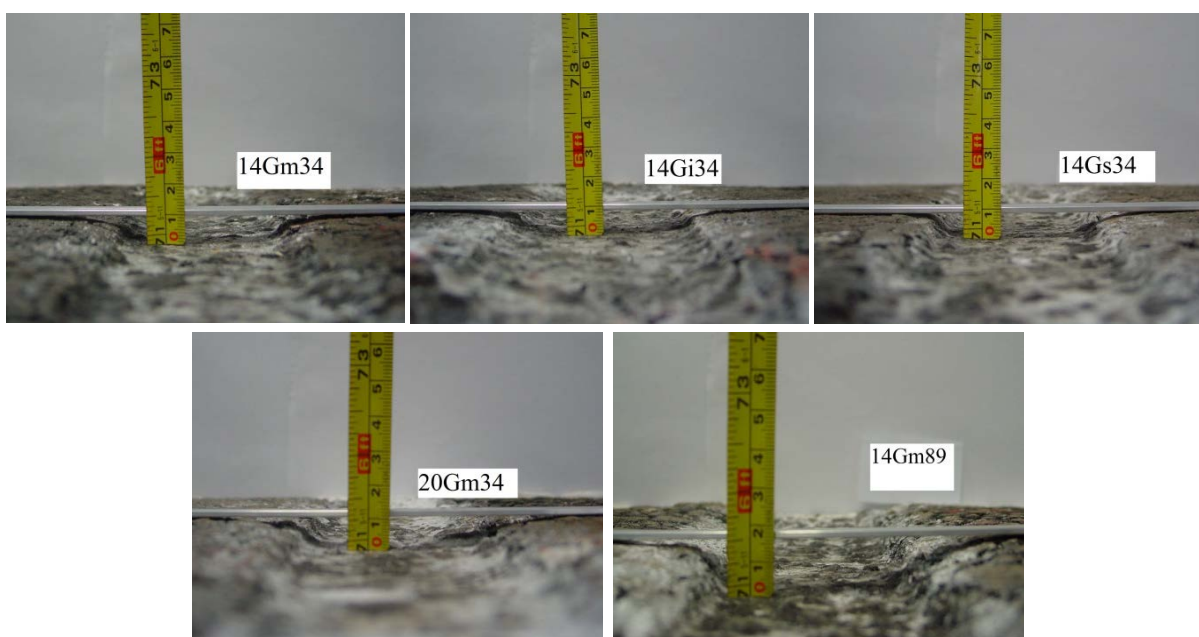


Figura 4.3 – Profundidade de rodeira de cada mistura em estudo no ensaio de pista

Na Figura 4.3 pode observar-se a profundidade de rodeira atingida em cada mistura, verificando-se que a mistura 14Gm89 (com betume 70/100) é aquela que atingiu a maior profundidade, comprovando os resultados de WTS da Tabela 4.6.

Ao analisar o conjunto dos resultados anteriores verifica-se que a mistura que apresenta melhores resultados à deformação permanente é a mistura 14Gm34, o que significa que a utilização da curva intermédia do fuso (com máxima densidade) melhora a estabilidade da mistura. Em contrapartida verifica-se uma elevada deformação para a mistura 14Gm89 com o betume mais mole (70/100), o que já seria de esperar.

Entre as três misturas que possuem a mesma dimensão máxima de agregados e o mesmo tipo de betume (14Gm34, 14Gi34 e 14Gs34), alterando apenas o fuso granulométrico (médio, inferior e superior), verifica-se que a mistura com o fuso médio apresenta os melhores resultados (como foi referido) e que a mistura que corresponde ao fuso granulométrico superior (com mais agregados finos) apresenta os piores resultados. Este pior comportamento deve-se ao facto de a mistura ter um teor em betume maior, de modo a envolver a maior quantidade de elementos finos, o que leva a uma maior deformação.

A mistura com maior dimensão máxima dos agregados (20Gm34) apresenta uma taxa de deformação (WTS) mais elevada do que a mistura de referência (14Gm34), mas apesar disso apresenta uma deformação percentual total menor. Este bom comportamento acontece devido ao menor teor em betume e à maior resistência dos agregados que a mistura 20Gm34 possui, mas que não prejudicaram a sua trabalhabilidade devido ao bom controlo de compactação conseguido em laboratório.

Para uma melhor compreensão da influência do volume de vazios na deformação permanente das misturas, a Figura 4.4 relaciona esse parâmetro com o valor de WTS_{air} no ensaio de pista.

Na Figura 4.4 pode verificar-se que há algum tipo de relação entre o aumento do volume de vazios e a diminuição do WTS, principalmente nas misturas que possuem o mesmo diâmetro máximo de agregados (14Gm34, 14Gi34 e 14Gs34). Isto acontece devido ao facto de as misturas com um baixo volume de vazios não permitirem uma compactação adequada (porque é mais difícil para as partículas acomodarem-se e constituírem um esqueleto mineral correto), além de serem mais instáveis por terem mais betume e finos de enchimento.

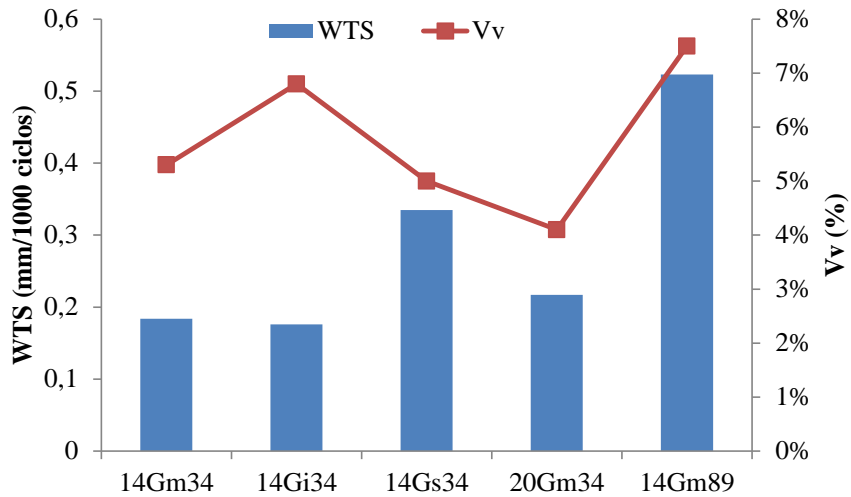


Figura 4.4 – Resultados de deformação WTS_{air} no ensaio de pista vs. volume de vazios

A mistura que possui um menor volume de vazios (20Gm34) não corresponde à mistura que possui o maior WTS, o que acontece pelo facto de a dimensão máxima dos agregados ser maior, o que ajuda obter melhores resultados em termos de WTS. Os piores resultados de deformação obtidos pelas misturas 14Gs34 e 14Gm89 resultam de outros dois fatores. No caso da mistura 14Gs34, esta apresenta um teor em finos e betume superior, aumentando a instabilidade da mistura à deformação. Quanto à mistura 14Gm89, o pior desempenho desta resulta do facto do betume 70/100 utilizado na sua produção ser um betume mais mole e conduzir a maiores deformações.

Para compreender melhor do efeito da granulometria, diâmetro máximo dos agregados e tipo de betume na deformação medida no ensaio de pista, as Figuras 4.5 a 4.7 fazem a comparação dos resultados obtidos por misturas em que apenas varia cada uma destes parâmetros.

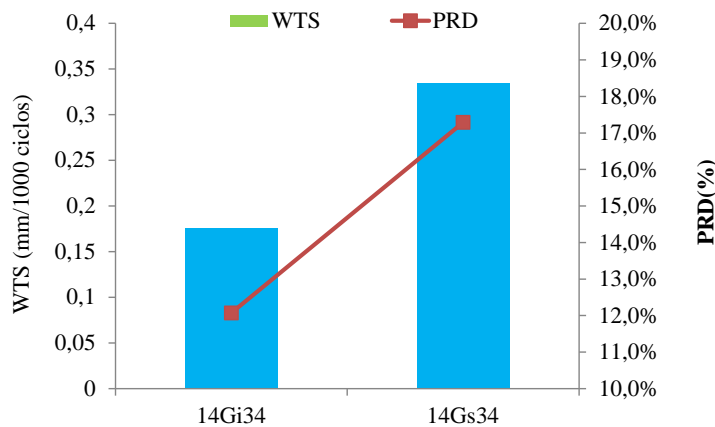


Figura 4.5 – Efeito da granulometria dos agregados nos resultados do ensaio de pista

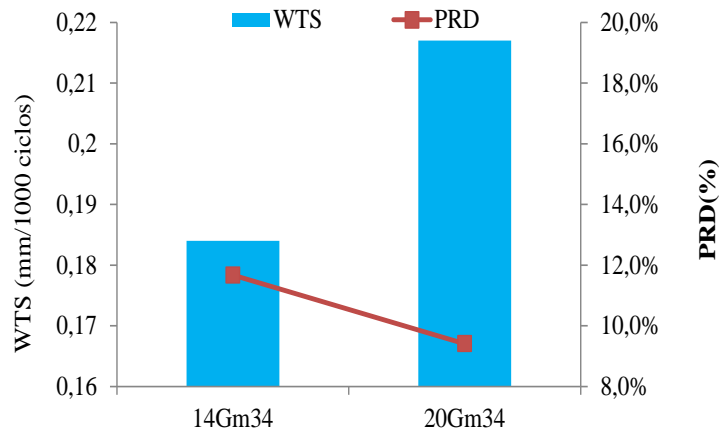


Figura 4.6 – Efeito do diâmetro máximo dos agregados nos resultados do ensaio de pista

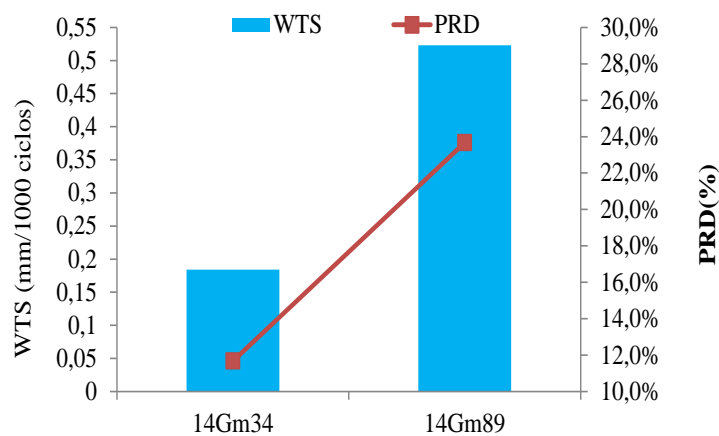


Figura 4.7 – Efeito do tipo de betume nos resultados do ensaio de pista

Nestes gráficos pode verificar-se que o parâmetro que mais influencia o comportamento da mistura à deformação permanente, e o que provoca uma maior profundidade de rodeira, é o tipo (e o teor) de betume utilizado. A granulometria também tem uma influência elevada na deformação, porque a utilização de granulometrias com mais material fino obrigam a utilizar mais betume para garantir um bom envolvimento dos agregados e uma trabalhabilidade adequada, e dessa forma também se aumenta a deformação permanente.

A característica que apresenta menos variação em termos de deformação permanente é a alteração da dimensão máxima dos agregados, pois nesta situação pode verificar-se que existe uma maior profundidade de rodeira quando o diâmetro é menor, mas o resultado de WTS apresenta uma tendência inversa. Isto deve-se ao facto de a altura da lajeta ser maior, pois apesar de esta ter uma maior profundidade de rodeira, isso não se traduz em percentagem devido à altura da lajeta.

4.2 Sensibilidade à água

As misturas betuminosas produzidas para os ensaios de sensibilidade à água apresentaram, tal como já havia acontecido anteriormente, temperaturas um pouco abaixo do preconizado pela norma EN12697-35, apesar de todas as tentativas para manter a temperatura de produção o mais próximo possível dos valores desejados. As temperaturas de produção e compactação das misturas betuminosas foram as apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.5 – Temperaturas das misturas usadas no ensaio de sensibilidade à água

Mistura	Temperatura da mistura após produção (°C)	Temperatura da mistura antes da compactação (°C)
14Gm34	144,9	129,2
14Gi34	143,5	128,7
14Gs34	144,6	129,8
20Gm34	141,1	126,6
14Gm89	139,2	124,7

Por sua vez, a Tabela 4.8 apresenta os valores da baridade máxima teórica (BMT), da baridade aparente (BA) e do volume de vazios das mesmas misturas. Estas propriedades vão ser importantes para ajudar a compreender os resultados da sensibilidade à água, que depende muito do volume de vazios das misturas betuminosas.

Tabela 4.6 – Baridade máxima teórica, baridade aparente e volume de vazios dos carotes ensaiados à sensibilidade à água

Mistura	BA (g/m ³)	BMT(g/m ³)	Vv (%)
14Gm34	2381,8	2448,9	2,7
14Gi34	2373,8	2453,2	3,2
14Gs34	2377,2	2434,2	2,3
20Gm34	2429,1	2470,9	1,7
14Gm89	2401,3	2478,7	3,1

O resultado utilizado para estudar a sensibilidade à água das misturas betuminosas, através da aplicação da norma EN 12697-12, é o índice de resistência à tração indireta (ITSR). Este índice consiste na razão entre a resistência à tração indireta média do grupo de provetes condicionados em água (ITS_w) e o grupo de provetes secos (ITS_d). Assim, a Tabela 4.9 apresenta os índices de resistência à tração indireta (ITSR) das misturas em estudo, obtidos a partir dos resultados de resistência à tração indireta de todos os provetes ensaiados.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de sensibilidade à água (ITSR)

Mistura	Grupo	Provete	Força máxima (KN)	ITS (KPa)	ITS médio (KPa)	ITSR (%)
14Gm34	ITS _d (seco)	1	20,32	1960	1917	74%
		2	18,69	1820		
		3	20,24	1967		
	ITS _w (húmido)	1	14,05	1359	1419	
		2	16,03	1566		
		3	13,73	1332		
14Gi34	ITS _d (seco)	1	18,13	1759	1860	64%
		2	20,42	1961		
		3	19,25	1860		
	ITS _w (húmido)	1	11,98	1145	1196	
		2	12,19	1179		
		3	13,01	1265		
14Gs34	ITS _d (seco)	1	18,97	1836	1946	80%
		2	21,57	2077		
		3	20,13	1924		
	ITS _w (húmido)	1	16,71	1602	1561	
		2	16,77	1608		
		3	15,26	1472		
20Gm34	ITS _d (seco)	1	20,01	1958	1924	90%
		2	19,90	1894		
		3	19,89	1921		
	ITS _w (húmido)	1	18,20	1753	1730	
		2	18,58	1778		
		3	17,37	1658		
14Gm89	ITS _d (seco)	1	10,61	1028	1027	75%
		2	10,81	1030		
		3	10,74	1022		
	ITS _w (húmido)	1	8,46	816	767	
		2	7,61	749		
		3	7,71	734		

A mistura mais sensível à água (com menor valor de ITSR) é a mistura 14Gi34, que é uma mistura que corresponde ao fuso inferior, tendo mais material grosso e menos betume. A mistura com melhor comportamento de resistência à ação da água é a mistura 20Gm34, que possui uma maior dimensão máxima dos agregados (20 mm). Este resultado é inesperado porque seria expectável que esta mistura tivesse maior sensibilidade à água, pois tem um teor em betume reduzido, mas conseguiu obter um volume de vazios muito reduzido que ajudou a proteger a mistura da ação da água. Além desta mistura, a mistura que corresponde ao fuso

superior (14Gs34) também conseguiu ter bons resultados, visto que o elevado teor em finos e betume tornam a mistura menos sensível à ação da água. Salienta-se ainda a semelhança entre os valores de ITSR apresentados pelas misturas 14Gm34 e 14Gm89, o que demonstra que o tipo de betume utilizado não tem uma grande influência na sensibilidade à água desde que a produção seja feita à temperatura adequada para cada tipo de betume.

A análise conjunta dos resultados de sensibilidade à água e de deformação permanente demonstram que é prejudicial ter excesso ou falta de material fino na mistura, sendo a granulometria média aquela que melhor evita maus resultados simultaneamente em ambos os ensaios. A utilização de diferentes valores para a dimensão máxima dos agregados também não prejudica o desempenho das misturas em ambos os ensaios, enquanto a utilização de betumes moles resulta em problemas de deformação permanente.

O volume de vazios tem uma grande influência na sensibilidade à água das misturas. Assim, a Figura 4.8 apresenta um gráfico comparativo entre o volume de vazios e o valor de ITSR.

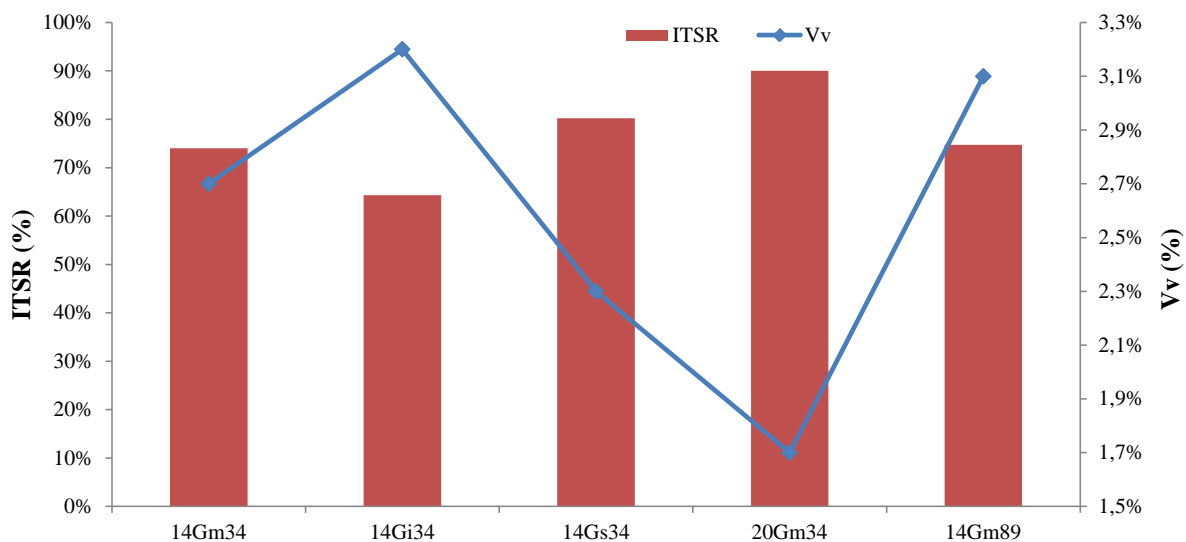


Figura 4.8 – Gráfico comparativo entre o volume de vazios e o valor de ITSR

Tal como se esperava, verifica-se que as misturas com menor volume de vazios (14Gs34 e 20Gm34) são aquelas que possuem uma menor sensibilidade à água (maiores valores de ITSR). O contrário também é verdade, porque as misturas com maior volume de vazios (14Gi34 e 14Gm89) apresentam a maior sensibilidade à água (maiores valores de ITSR). Isto é explicado pelo facto das misturas com menor volume de vazios serem mais protegidas da

ação da água no seu interior, enquanto as misturas mais porosas têm uma área de contacto com a água superior que aumenta a degradação que esta causa nestas misturas.

Os ensaios de tração indireta (EN 12697-23) realizados também serviram para compreender o tipo de rotura (mais frágil ou mais flexível) de cada mistura betuminosa (Figura 4.9), bem como a deformação efetiva a que cada mistura está sujeita na rotura (Figura 4.10), que resulta da diferença entre a deformação de pico e a deformação nula na interseção da linha de tendência da Figura 4.10 com o eixo das abcissas.

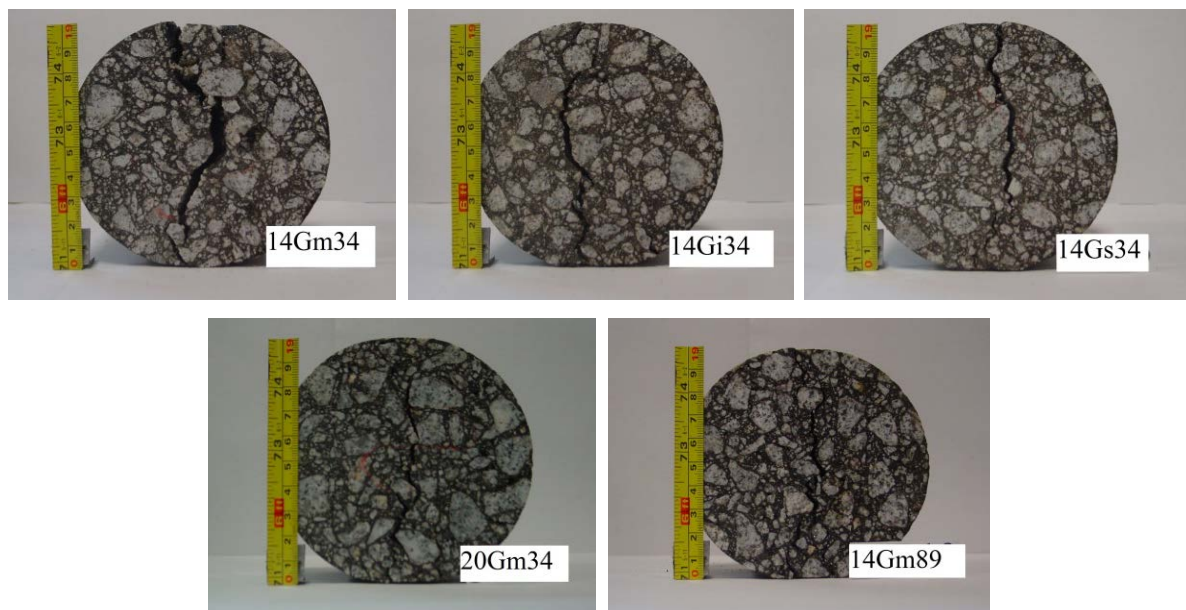


Figura 4.9 – Tipo de rotura observada nos ensaios de tração indireta

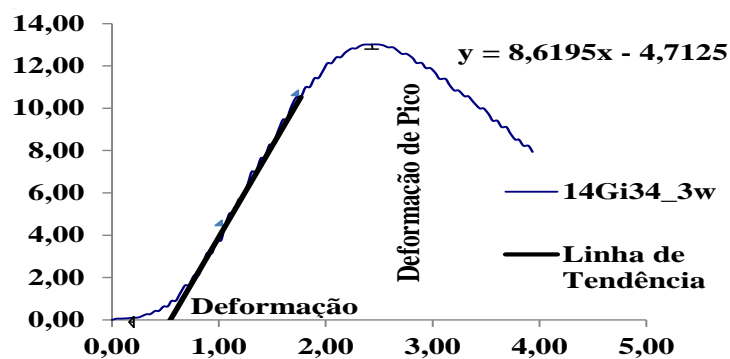


Figura 4.10 – Esquema utilizado para cálculo da deformação efetiva na rotura

Com base na deformação efetiva na rotura de cada um dos carotes ensaiados, determinada como indicado na Figura 4.10, procedeu-se ao cálculo da deformação média sofrida por cada mistura betuminosa, cujos valores são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.8 – Deformação efetiva na rotura de cada mistura em estudo

Mistura	Grupo	Provete	Deformação de pico (mm)	Deformação efetiva (mm)	Deformação média por grupo (mm)	Deformação média (mm)
14Gm34	ITS _d (seco)	1	4,2	2,3	2,4	2,3
		2	3,1	2,5		
		3	2,6	2,3		
	ITS _w (húmido)	1	2,6	2,3	2,3	
		2	2,9	2,5		
		3	2,5	2,1		
14Gi34	ITS _d (seco)	1	4,1	2,3	2,4	2,3
		2	3,1	2,5		
		3	3,7	2,4		
	ITS _w (húmido)	1	2,9	2,4	2,2	
		2	3,4	2,5		
		3	2,4	1,9		
14Gs34	ITS _d (seco)	1	3,1	2,4	2,7	2,5
		2	2,8	2,4		
		3	3,6	3,2		
	ITS _w (húmido)	1	2,8	2,4	2,4	
		2	3,2	2,6		
		3	3,4	2,0		
20Gm34	ITS _d (seco)	1	3,2	2,7	2,6	2,5
		2	3,3	2,7		
		3	3,1	2,5		
	ITS _w (húmido)	1	2,7	2,2	2,4	
		2	2,8	2,4		
		3	3,3	2,6		
14Gm89	ITS _d (seco)	1	5,3	2,8	3,1	3,1
		2	3,2	2,9		
		3	4,3	3,6		
	ITS _w (húmido)	1	3,7	3,3	3,1	
		2	3,8	3,1		
		3	3,3	3,0		

Ao analisar a Figura 4.9 verifica-se que a mistura 14Gm89 teve uma rotura mais flexível do que as restantes misturas, isto devido ao tipo de betume utilizado (70/100). Quanto mais mole o betume, mais tendência tem para originar uma rotura flexível, o que pode ser uma vantagem caso se consiga garantir uma suficiente resistência à tração indireta. Assim, o ideal é garantir uma maior deformação na rotura (rotura flexível), mas ao mesmo tempo conseguir uma elevada resistência à tração indireta, o que pode ser atingido, por exemplo, com betumes modificados.

Na Tabela 4.10 pode verificar-se que os carotes com o mesmo tipo de betume (35/50) deformaram-se todos aproximadamente o mesmo valor médio (2,3 a 2,5 mm). Os carotes da mistura 14Gm89 têm um tipo de betume diferente (70/100) e, como seria espectável, foram os que mais se deformaram pelo facto de serem produzidos com um betume mais mole. Além disso pode verificar-se que os carotes que não foram condicionados em água apresentam uma maior deformação na rotura (sendo por isso mais flexíveis). Isto, conjugado com a maior resistência destes provetes, demonstra um melhor comportamento quando submetidos ao ensaio de tração indireta, o que também ajuda a salientar o efeito negativo da água.

Para compreender melhor do efeito da granulometria, diâmetro máximo dos agregados e tipo de betume na resistência à tração indireta, as Figura 4.11 a 4.13 fazem a comparação dos resultados obtidos por misturas em que apenas varia cada uma destes parâmetros.

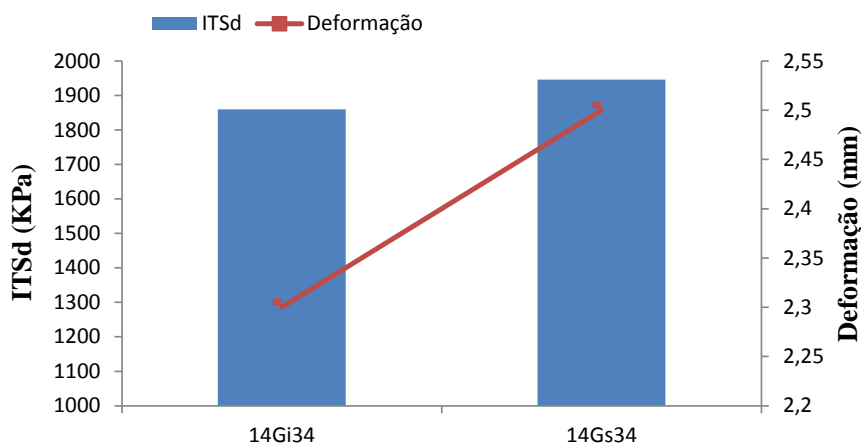


Figura 4.11 – Efeito da granulometria dos agregados na resistência à tração indireta

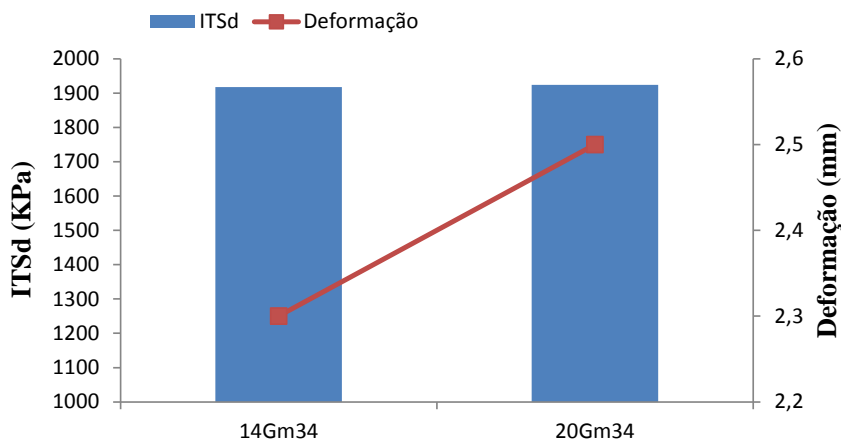


Figura 4.12 – Efeito da dimensão máxima dos agregados na resistência à tração indireta

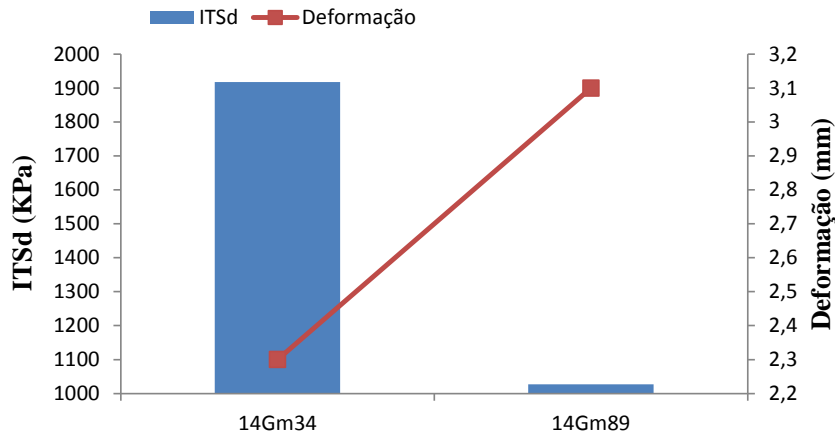


Figura 4.13 – Efeito do tipo de betume na resistência à tração indireta

Da análise destes gráficos pode verificar-se que o fator que mais influencia a resistência à tração indireta dos provetes secos (ITSd) é o betume, pois quando se utiliza um betume mais mole verifica-se que o valor de ITSd é muito menor (o que significa que a mistura 14Gm89 tem uma reduzida resistência à tração indireta). Apesar deste mau resultado à tração indireta, a mistura com betume mais mole apresenta uma maior deformação na rotura, sendo por isso mais flexível.

Por outro lado, as restantes misturas apresentam exatamente o comportamento contrário, que é semelhante entre as quatro misturas com betume 35/50. Isto deve-se ao facto de as misturas com um betume mais duro serem mais rígidas e terem por isso uma melhor resistência à tração indireta, embora a deformação na rotura destas misturas seja menor, originando uma rotura mais frágil.

Quanto à influência da granulometria na resistência à tração indireta, constata-se que quando o fuso passa do inferior para o superior (ao usar-se mais material fino), tanto o valor de ITSd como a deformação na rotura aumentam.

No caso da dimensão máxima dos agregados, a variação no valor de ITSd é quase nula, enquanto no caso da deformação na rotura há um ligeiro aumento desta ao usar uma maior dimensão nas misturas. Porém, estas duas misturas tiveram um comportamento quase idêntico neste ensaio, pelo que este parâmetro teve pouca influência na resistência à tração indireta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Sendo o objetivo deste trabalho o estudo da influência da granulometria na deformação permanente e na sensibilidade à água, foi verificado que dificilmente as misturas apresentam um bom comportamento, ao mesmo tempo, em relação à sensibilidade à água e à deformação permanente.

No entanto, neste estudo pode confirmar-se que a granulometria intermédia definida no caderno de encargos das Estradas de Portugal, quer para misturas com dimensão máxima de 14 mm ou 20 mm, foi aquela que permitiu obter um resultado simultâneo em ambos os ensaios mais satisfatório. Este aspeto é muito positivo porque vem confirmar que o método de formulação tipo receita utilizado em Portugal origina misturas com boa qualidade. Também se confirmou que o betume 35/50, habitualmente utilizado em Portugal, tem um melhor desempenho do que o utilizado noutros países, em especial no que diz respeito à deformação permanente.

Por último, pode verificar-se haver semelhanças na forma de definir as curvas granulométricas das misturas nos métodos de formulação português (EP, 2008) e americano (SUPERPAVE).

Relativamente à resistência das misturas à deformação permanente, foi possível concluir que:

- A mistura com betume mole apresentou o pior resultado em relação aos fatores estudados com o ensaio de pista, ao caraterizar a resistência à deformação permanente;
- A mistura correspondente ao fuso granulométrico inferior é a mistura que apresenta um melhor resultado em relação à deformação permanente;
- A mistura com o fuso superior apresenta um resultado pior devido ao teor em finos e em betume elevado, que tornam a mistura instável;
- Quando o volume de vazios aumenta, a taxa de deformação (WTS) diminui, principalmente nas misturas com a mesma dimensão máxima dos agregados;
- O fator que mais influencia a profundidade de rodeira é o tipo de betume;
- A menor variação de profundidade de rodeira é verificada quando se varia apenas a dimensão máxima dos agregados.

Os ensaios para o estudo da sensibilidade à água demonstram que:

- A mistura com granulometria inferior apresenta o pior resultado de sensibilidade à água, sendo que a mistura que apresenta um melhor resultado é a mistura correspondente à mistura com diâmetro máximo;
- A sensibilidade à água diminui (ITSR aumenta) quando o volume de vazios diminui, pelo facto de as misturas porosas permitirem um dano maior da água através dos poros;
- Mantendo a mesma dimensão máxima dos agregados, ao mudar o tipo de betume de duro para mole, isso traduz-se num aumento do ITSR (menor sensibilidade à água);
- O ensaio de tração indireta demonstra que as misturas com o mesmo tipo de betume têm uma deformação com aproximadamente o mesmo valor, mas quando o betume da mistura é mais mole a deformação é maior (mistura mais flexível);
- O fator que mais influencia a resistência à tração indireta nos carotes secos é o tipo de betume, e a mistura com o betume mole é a que apresenta o pior resultado, apesar de ser a que tem maior deformação (o que é positivo pois significa que é mais flexível);
- As misturas com betume mais duro têm uma melhor resistência à tração indireta, embora a deformação na rotura destas misturas seja menor, originando uma rotura mais frágil;
- Quando o fuso granulométrico passa de inferior para superior, usando mais material fino e betume, a resistência à tração indireta e a deformação aumentam em simultâneo.

5.2 Estudos futuros

No futuro seria interessante estudar estes dois fatores em diferentes tipos de misturas, para se conseguir verificar se existe um melhor comportamento de uma mistura a estes dois fatores em simultâneo, por exemplo utilizando betumes modificados. Outra proposta seria estudar misturas com granulometrias mais abertas ou mais fechadas.

Também se poderá estudar se a variação dos fusos granulométricos nas misturas será sempre proporcional, nas misturas com betumes modificados e com diferentes dimensões de agregados. Outros estudos viáveis passariam por caracterizar estas misturas com outros ensaios, para avaliar a ação de gelo-degelo, o módulo e a resistência à fadiga.

Finalmente, também poderá proceder-se ao estudo destas misturas num trecho a construir para comparar os resultados obtidos em laboratório e *in situ*, que também serviria para verificar

como se comportam as misturas quando já estão sujeitas aos esforços reais de utilização durante os vários anos em que a estrada estivesse em serviço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APORBET (1998). Misturas Betuminosas. Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação. APORBET – Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas
- Archilla, A.R., Madanat S. (2000). Development of Pavement Rutting Model from Experimental Data. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 126, pp. 291-299.
- Azevedo, M.C. (1993). Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, IST.
- Baptista, A. (2006). Misturas betuminosas recicladas a quente em central e contribuição para o seu estudo e aplicação. Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Branco, F., Pereira, P., Picado Santos, L. (2005). Pavimentos Rodoviários. Coimbra, Portugal.
- Brown, E., Kandhal, P., Zhang, J. (2001). Performance Testing for Hot Mix Asphalt. Transportation Research E-Circular N° E-C016, NCAT Report N° 01-05, November.
- Brown, E.R., Basset, C.E. (1990). Effects of Maximum Aggregate Size on Rutting Potential and Other Properties of Asphalt-Aggregate Mixtures. *Transportation Research Record* 1259, pp 107-119.
- Cooper, K. (1985). The Design of Aggregate Gradings for Asphalt Base Courses, *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*. Volume 54, pp. 324-346.
- Cooper, K. (1994). Bituminous Materials – Permanent Deformation, Residential Course on Bituminous Pavements: materials, design and evaluation. Lecture I, University of Nottingham.
- Cooper, K. (1997). Permanent Deformation, *Proceedings of the Workshop on Performance related test procedures for bituminous mixtures*. Dublin 6-7 November. M. D. Gilchrist & A. M. Hartman (Editors), pp. 108-124.
- Copeland, A.R. (2007). Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems. PhD Thesis, Vanderbilt University, Nashville – Tennessee, USA.
- EN 12591 (1999). Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 12697-12 (2003). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. European Committee for Standardization, Brussels.

- EN 12697-22 (2003). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 12697-33 (2003). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 33: Specimen prepared by roller compactor. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 12697-35 (2004). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 35: Laboratory mixing. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 12697-5 (2002). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1426 (1999). Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1427 (1999). Bitumen and bituminous binders – Determination of softening point – Ring and Ball method. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- EP (2008). Caderno de encargos tipo Obra Volume V: 03 – Pavimentação – Capítulo 14.03. Estradas de Portugal.
- Erkens, S. (2002). Asphalt Concrete Response (ACRe) – Determination, Modeling and Prediction. Delft University Press, Delft.
- Fontes, L.P.T.L., Trichês, G., Pais, J.C., Pereira, P.A.A. (2010). Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. Construction and Building Materials, Volume 24, July 2010, pp 1193-1200.
- Freire, A. (2002). Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Furlan, A.P., Gouveia, L.T., Fabbri, G.T.P., Fernandes Jr., J.L. (2004). Influência de características dos agregados na susceptibilidade ao dano por umidade de misturas asfálticas. Anais do 17º Encontro de Asfalto. (IBP). Rio de Janeiro, 8p.
- Gardete, D. (2006). Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Kandahal, P.C., Lyon, C., Parker Jr., F. (1998). Characterization Teste for Mineral Filler Related to Performance os Asphalt Paving Mixtures. National Center for Asphalt Technology of Auburn University Report No 98-2, Alabama, USA.

- Little, D. N., Button, J.W., Youssef, H. (1993). Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential. *Transportation Research Record*, no. 1417, p. 49-57.
- Monismith, C., Eppes, J., Finn, F. (1985). Improved Asphalt Mix Design, *Proceedings. Association of Asphalt Paving Technologists. Volume 54*, pp. 347-406.
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A. (2006). Reabilitação de Pavimentos Utilizando Misturas Betuminosas com Betumes Modificados. Universidade do Minho.
- Partl, M.N., Pasquini, E., Canestrari, F., Virgili, A. (2010). Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, Volume 24, March 2010, pp 283-291.
- Pereira, F.J.Q. (2009). Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Poulikakos, L.D., Partl, M.N. (2009). Evaluation of Moisture Susceptibility of Porous Asphalt Concrete Using Water Submersion Fatigue Tests. *Construction and Building Materials* volume 23, December 2010, pp. 3475–3484.
- Previtera Filho, J. (1974). Efeito da temperatura na deformabilidade dos pavimentos asfálticos. Dissertação de M. SG., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Silva, H.M.R.D. (2006). Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Matique. Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.
- Sousa, J., Weissman, S. (1994). Modelling Permanent Deformation of Asphalt-Aggregate Mixes, *Proceedings. Association of Asphalt Paving Technologists, St. Louis, Missouri*, 21-23, volume 63, pp. 224-257.
- Sousa, J.B., Craus, J., Monismith, C.L. (1991). Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. Strategic Highway Research Program, report no. SHRP-A/IR-91-104, Washington DC, USA.
- Taner, A., Mehmet Y., Baha V.K., Aykut F.K. (2011). Comparison of permanent deformation and fatigue resistance of hot mix asphalts prepared with the same performance grade binders. *Construction and Building Materials*, Volume 30, pp 66–72.
- Ugé, P., Van de Loo, P.J. (1974). Permanent Deformation and Asphalt Mixes. Koninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdam.

Vasconcelos, K.L., Bashin, A., Little, D.N., Soares, J.B. (2006). Avaliação do dano por umidade induzida e da recuperação de trincas de mástique. Anais do 18º Encontro de Asfalto. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP). Rio de Janeiro, 8p.

Zaniewski, J.P., Harsha, S. N. (2003). Evaluation of Binder Grades On Rutting Performance. Asphalt Technology Program, Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia.