



Ruben Tiago Silva Melo Influência das condições de ensaio na avaliação
da sensibilidade à água de misturas betuminosas

UMinho | 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ruben Tiago Silva Melo

Influência das condições de ensaio
na avaliação da sensibilidade
à água de misturas betuminosas

julho de 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ruben Tiago Silva Melo

Influência das condições de ensaio
na avaliação da sensibilidade
à água de misturas betuminosas

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível devido ao apoio e meios disponibilizados por um conjunto de entidades e pessoas, a quem gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Grupo de Vias de Comunicação da Área Disciplinar de Transportes e Geotecnia, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pelos meios e condições disponibilizados para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Joel Oliveira, quero expressar o meu agradecimento por todo o conhecimento transmitido, apoio e disponibilidade manifestados, bem como pela confiança que depositou no meu trabalho.

Aos Engenheiros, Carlos Palha e Hélder Torres e a todos os colegas que frequentam o Laboratório pelos ensinamentos, ajuda, dedicação demonstrada, troca de ideias ao longo destes meses de trabalho no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Um agradecimento especial à minha família, em particular aos meus pais por todo o apoio, motivação, paciência e força demonstrada ao longo desta etapa e aos meus irmãos, por todo o apoio e disponibilidade em ajudar sempre que possível.

À Dulce, por todo o carinho, paciência, ajuda e pelo apoio incansável, sem ela teria sido mais difícil concluir esta etapa.

Por fim, aos meus amigos pelo companheirismo e amizade, a contribuição deles também foi fundamental.

Influência das condições de ensaio na avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas

RESUMO

No dimensionamento dos pavimentos rodoviários deve-se ter em conta todas as ações a que estes vão estar sujeitos ao longo do seu período de vida. Para além de terem que suportar todas as cargas, também têm que ser capazes de resistir às ações climatéricas. Um dos aspetos a ter em consideração é a sensibilidade à água, que em Portugal e na Europa é estudado através da norma Europeia EN 12697-12.

O principal objetivo deste trabalho é determinar a influência das condições de ensaio na avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas. Para tal, pretendeu-se aferir qual é o parâmetro ou conjunto de parâmetros da norma ao qual os resultados são mais sensíveis. Desse modo, para o estudo foram variadas cinco condições fundamentais da norma Europeia, sendo elas, a temperatura da água aquando aplicação do vácuo, a forma de aplicação de vácuo, a duração e temperatura do condicionamento e, por fim, a temperatura do ensaio de tração indireta. Adicionalmente, estudou-se ainda a influência que um agregado de um lote diferente pode ter nos resultados obtidos, bem como a comparação dos resultados obtidos entre a norma Europeia e a Norma Militar Americana MIL-STD-620A, por se tratar da antiga norma utilizada em Portugal para determinação da resistência conservada das misturas betuminosas.

De todos os parâmetros estudados, concluiu-se que a variação da temperatura da água é um dos principais fatores que mais influencia os resultados finais de sensibilidade à água (ITSR). Foi ainda possível verificar que este ensaio é muito sensível em termos de variação de resultados, pelo que, se não existir um controlo apertado sobre todas as condições de ensaio, produção dos provetes e lote de agregados é provável que os resultados deste ensaio sejam influenciados por outros fatores.

Palavras-Chave

Pavimentos rodoviários; Misturas betuminosas; Sensibilidade à água; Ensaio de tração indireta; Resistência conservada.

Influence of test conditions on the water sensitivity of bituminous mixtures

ABSTRACT

All loading and environmental conditions that road pavements will be subjected throughout their life span should be taken into account in the design process. One of the conditions that should be considered is the water sensitivity, which is studied, both in Portugal and in Europe, through the European Standard EN 12697-12.

The main objective of this work is to determine the influence of the test conditions on the evaluation of water sensitivity of bituminous mixtures. For this, it was intended to measure which is the parameter or set of parameters of the standard to which the results are most sensitive. Thus, for this study, five fundamental conditions of the European standard were altered, these being the water temperature, the method of vacuum application, the conditioning duration and temperature and, finally, the temperature of the indirect tensile test. In addition, the influence that an aggregate of a different lot can have in the results obtained was assessed, as well as a comparison of the results obtained between the European Standard and the American Military Standard MIL-STD-620A, since this is the old standard used in Portugal for the determination of the conserved strength of the bituminous mixtures.

Of all the parameters studied, it was concluded that the variation of water temperature is one of the main factors that most influence the final results of indirect tensile strength ratio (ITSR). It was also possible to verify that this is a very sensitive test, in terms of results variation. Therefore, if there is no tight control over all test conditions, production of test pieces and batch of aggregates, it is likely that the results of the test are influenced by other factors.

Keywords

Road pavements; Bituminous mixtures; Water sensitivity; Indirect tensile tests; Conserved strength.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento temático	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Conteúdo da dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Constituição dos pavimentos rodoviários.....	5
2.2	Tipos de pavimentos.....	6
2.3	Degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis causadas pela água	10
2.4	Misturas betuminosas	11
2.5	Sensibilidade à água de misturas betuminosas	14
2.5.1	Ensaios de sensibilidade à água	14
2.5.2	Mecanismos de degradação em misturas betuminosas devido à presença da água	14
2.6	Parâmetros que influenciam a sensibilidade à água de misturas betuminosas	20
2.6.1	Características do agregado.....	20
2.6.2	Granulometria	21
2.6.3	Volume de vazios	22
2.6.4	Tipo de betume.....	22
2.6.5	Teor em betume.....	24
2.6.6	Método de ensaio	25
2.6.7	Temperatura de ensaio	25
2.6.8	Ensaios realizados por laboratórios diferentes	26
2.7	Considerações finais.....	28
3	CASO DE ESTUDO E METODOLOGIAS UTILIZADAS	31
3.1	Caracterização das misturas betuminosas utilizadas	31
3.2	Preparação dos provetes	32

3.2.1	Considerações iniciais	32
3.2.2	Preparação da mistura.....	32
3.2.3	Compactação dos provetes	33
3.2.4	Baridade máxima teórica (BMT).....	34
3.2.5	Determinação da baridade aparente.....	35
3.3	Metodologias utilizadas no ensaio da sensibilidade à água	39
3.3.1	Ensaio segundo a Norma Europeia EN 12697-12 – Método A	39
3.3.2	Ensaio segundo a Norma Militar Americana MIL-STD-620A.....	41
3.4	Condições de ensaio.....	43
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	49
4.1	Resultados obtidos nas condições de referência	49
4.2	Influência da utilização de agregados provenientes de lotes diferentes.....	50
4.3	Influência da temperatura da água aquando a aplicação de vácuo	51
4.4	Influência das condições de aplicação de vácuo	54
4.5	Influência da temperatura e duração do condicionamento.....	58
4.6	Influência da temperatura do ensaio de tração indireta.....	62
4.7	Resultados obtidos de acordo com a Norma Militar Americana	64
4.8	Resultados complementares.....	65
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS.....	67
5.1	Conclusões	67
5.2	Trabalhos futuros	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Constituição do pavimento, ações, solicitações e respostas (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	6
Figura 2.2 - Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (Azevedo, 2012).....	8
Figura 2.3 - Composição volumétrica duma mistura betuminosa (adaptado de <i>Asphalt institute, 1989</i>).....	12
Figura 2.4 - Resultados obtidos para a mistura AC14-G1 (Batista <i>et al.</i> , 2011).	27
Figura 2.5 - Resultados obtidos para a mistura AC14-D2 (Batista <i>et al.</i> , 2011).	27
Figura 2.6 - Resultados obtidos para a mistura PA1 (Batista <i>et al.</i> , 2011).....	28
Figura 2.7 - Fatores a ter em conta no estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas (adaptado de Copeland, 2007)	29
Figura 3.1 - Ensaio de tração indireta.....	41
Figura 3.2 - Ensaio de compressão de Marshall.....	43
Figura 3.3 - Condições de aplicação de vácuo no ensaio de referência	46
Figura 3.4 - Aplicação de vácuo na condição 7.....	47
Figura 3.5 - Aplicação de vácuo na condição 8.....	47
Figura 4.1 - Variação da temperatura aquando a aplicação de vácuo	53
Figura 4.2 - Variação da aplicação de vácuo (Patamar).....	57
Figura 4.3 - Variação da aplicação de vácuo (Rampas).....	57
Figura 4.4 - Efeito da variação da temperatura do condicionamento.....	61
Figura 4.5 - Efeito da variação da duração do condicionamento	61
Figura 4.6 - Efeito da variação da temperatura do ensaio de tração indireta	63
Figura 4.7 - Norma Militar vs Norma Europeia	65
Figura 4.8 – Absorção de Água vs Volume de Vazios.....	66
Figura 4.9 – ITS vs Volume de Vazios.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário	9
Tabela 3.1 - Percentagem volumétrica dos agregados utilizados na mistura aberta	32
Tabela 3.2 - Percentagem volumétrica dos agregados utilizados na mistura fechada.....	32
Tabela 3.3 - Ensaios realizados	45
Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água obtidos no ensaio padrão para a mistura aberta.....	49
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água obtidos no ensaio padrão para a mistura fechada.	50
Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água obtidos no ensaio padrão II para a mistura fechada.	50
Tabela 4.4 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração da temperatura da água aquando a aplicação de vácuo (mistura aberta)	52
Tabela 4.5 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração da temperatura da água aquando a aplicação de vácuo (mistura fechada).....	52
Tabela 4.6 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração das condições de aplicação de vácuo (mistura aberta)	55
Tabela 4.7 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração das condições de aplicação de vácuo (mistura fechada).....	56
Tabela 4.8 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração da temperatura e duração do condicionamento (mistura aberta).....	59
Tabela 4.9 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração da temperatura de condicionamento (mistura fechada).....	60
Tabela 4.10 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para uma temperatura do ensaio de tração indireta de 25 °C	62

Tabela 4.11 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos pela norma Militar 64

LISTA DE ABREVIATURAS

AC- Asphalt concrete (betão betuminoso);

BMT - Baridade máxima teórica;

CE - Comunidade Europeia;

EN - Norma europeia;

ITSd - Resistência em tração indireta dos provetes sem condicionamento;

ITSR - Resistência conservada em tração indireta;

ITSw - Resistência em tração indireta dos provetes com condicionamento;

NP - Norma portuguesa;

PA- Porous asphalt (mistura betuminosa drenante);

VMA - volume de vazios do esqueleto mineral.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

As estradas são infraestruturas fundamentais para o desenvolvimento de qualquer país, dado que facilitam o transporte de pessoas e de mercadorias. Para tal, é necessário que as estradas apresentem um nível de conforto e segurança elevado, para que o transporte seja feito de forma eficaz e segura promovendo uma melhoria na qualidade de vida e no acesso a bens essenciais. Com as sucessivas solicitações dos vários agentes (tráfego e ações climáticas), os pavimentos começam a perder a sua capacidade de resposta, pondo em causa a eficácia destas vias de comunicação.

Entre os agentes que causam problemas nas infraestruturas rodoviárias e que influenciam o comportamento dos pavimentos encontra-se a resistência à ação da água. A ação da água é um fator fundamental na durabilidade e no desempenho do pavimento. Nesta dissertação irá ser abordado qual é a influência que as condições de ensaio de sensibilidade à água, segundo a norma Europeia, têm nas misturas betuminosas. Trata-se de uma questão revelante e passível de ser investigada pois segundo Vasconcelos *et al.* (2006) a avaliação da resistência à ação erosiva da água de misturas betuminosas é um passo importante no processo de seleção dos materiais e dosagens das misturas. A seleção inadequada de materiais e a incorreta determinação da sensibilidade à água podem resultar em degradações prematuras no pavimento, bem como em custos excessivos em manutenção e reabilitação.

A suscetibilidade de misturas betuminosas à água é um problema complexo, que depende de fatores ambientais, práticas construtivas e características das misturas betuminosas. Os principais fatores que aceleram o aparecimento dos danos causados pela água são o clima e o tráfego. Os maiores danos ocorrem em condições climáticas extremas, particularmente quando ocorre congelamento combinado com alto volume de tráfego. Os fatores construtivos que influenciam a sensibilidade da mistura à água incluem a qualidade da compactação e as condições climáticas durante o processo de construção do pavimento. As características da própria mistura betuminosa têm impacto no comportamento da mesma sob a ação da água. Como tal, a natureza do agregado, a natureza do betume e o tipo de mistura têm influência na suscetibilidade da mesma à ação da água (Furlan *et al.*, 2004).

De uma forma geral, a avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas é realizada com recurso a ensaios de resistência mecânica realizados sobre dois grupos de provetes de misturas betuminosas com características idênticas, que são previamente acondicionados em condições distintas: um dos grupos é acondicionado em condições mais severas, do ponto de vista da ação da água. O quociente entre a resistência média dos provetes desse grupo e a resistência média dos provetes acondicionados em condições menos severas fornece uma “resistência conservada”, que é utilizada como indicador da sensibilidade à água (Batista e Antunes, 2009).

A sensibilidade à água em misturas betuminosas é avaliada na sua formulação, sendo estabelecidos no caderno de encargos valores mínimos de resistência conservada a cumprir de acordo com o método utilizado. Em Portugal, os valores de referência existentes para avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas foram estabelecidos de acordo com a norma de ensaio Militar Americana MIL-STD-620A (1966), método 104 (APORBET, 1998). No entanto, com o aparecimento da norma Europeia EN 12697-12, relativa à sensibilidade à água de misturas betuminosas, tornou-se necessário efetuar a avaliação desta propriedade através da referida norma. Verificou-se, contudo, que existem diferenças significativas entre os métodos de ensaio preconizados na norma MIL-STD-620A e na norma EN 12697-12, que podem conduzir a resultados muito diferentes para a resistência conservada de uma determinada mistura (Batista *et al.*, 2008).

Para investigar qual a influência das condições de ensaio na sensibilidade à ação da água de misturas betuminosas deve ser feita a variação das condições de ensaio. Espera-se conseguir identificar qual ou quais os parâmetros que têm maior influência nos resultados dos ensaios.

1.2 Objetivos

Com este projeto pretende-se essencialmente perceber até que ponto as condições de ensaio influenciam os resultados de sensibilidade à água de misturas betuminosas. Deste modo pretende apurar-se a necessidade de realizar um controlo mais apertado de alguma etapa do ensaio para que os resultados possam ser consistentes e que as diferenças obtidas tenham a ver com o comportamento de diferentes misturas e não com o facto de o ensaio ser realizado em laboratórios diferentes.

Assim, definiu-se um conjunto de variações das condições de ensaio, nomeadamente, recorrendo a várias formas de aplicar o vácuo e variando o valor de pressão, a temperatura da água aquando a aplicação do vácuo, a temperatura de acondicionamento em água e, por fim, a temperatura de ensaio. Adicionalmente, estudou-se ainda a influência que um agregado de um lote diferente pode ter nos resultados obtidos, assim como, o ensaio de compressão de Marshall, de acordo com uma norma militar americana, onde se obtém valores de resistência conservada com o objetivo de conseguir comparar os valores com o ensaio utilizado pela norma europeia. Com isto pretende-se apurar se os resultados sofrem alterações significativas com a variação de algum destes parâmetros.

1.3 Conteúdo da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos diferentes:

Capítulo 1: “Introdução”. Neste capítulo é feito um enquadramento do tema e apresentam-se os objetivos da dissertação e a estrutura adotada.

Capítulo 2: “Revisão bibliográfica”. Neste capítulo é efetuada uma pesquisa sobre o tema em causa, onde se analisa os principais conceitos relacionados com a sensibilidade à água e se faz referência a estudos já realizados.

Capítulo 3: “Caso de estudo e metodologias utilizadas”. Neste capítulo são descritas as misturas betuminosas utilizadas, os métodos utilizados para preparação/produção dos provetes e as metodologias de ensaio utilizados.

Capítulo 4: “Análise de resultados”. Apresentação e discussão dos resultados obtidos pela realização dos ensaios de sensibilidade à água.

Capítulo 5: “Considerações finais e perspetivas futuras”. Apresentam-se as principais conclusões obtidas pela realização do estudo experimental efetuado, sendo por fim efetuadas sugestões sobre possíveis trabalhos futuros que possam vir a ser desenvolvidos sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Constituição dos pavimentos rodoviários

Os pavimentos rodoviários são constituídos por uma estrutura estratificada, com o objetivo de proporcionar a circulação dos veículos com comodidade e segurança durante um determinado período, designado como vida útil, sob a ação do tráfego e do clima. Por esta razão, um pavimento rodoviário deve possuir duas características essenciais:

- Qualidade funcional - deve constituir uma superfície regular (conforto), com rugosidade suficiente para garantir segurança e com resistência ao desgaste (polimento e/ou arranque dos agregados). Esta é a característica mais exigida pelos utilizadores.
- Qualidade estrutural - deve garantir a capacidade do pavimento suportar as cargas dos veículos sem exceder a capacidade de suporte da estrutura e resistência à fadiga. As camadas ligadas devem resistir às sucessivas solicitações impostas pela passagem de veículos, da mesma forma que deve assegurar que a estrutura não se deforma.

Relativamente ao comportamento do pavimento rodoviário, de acordo com a Figura 2.1, é necessário considerar as seguintes componentes:

- Os materiais constituintes, fundação, camadas granulares e as camadas betuminosas;
- As ações do tráfego e do clima;
- O estado de tensão apresentado pelo pavimento, devido às solicitações;
- O estado de deformação correspondente.

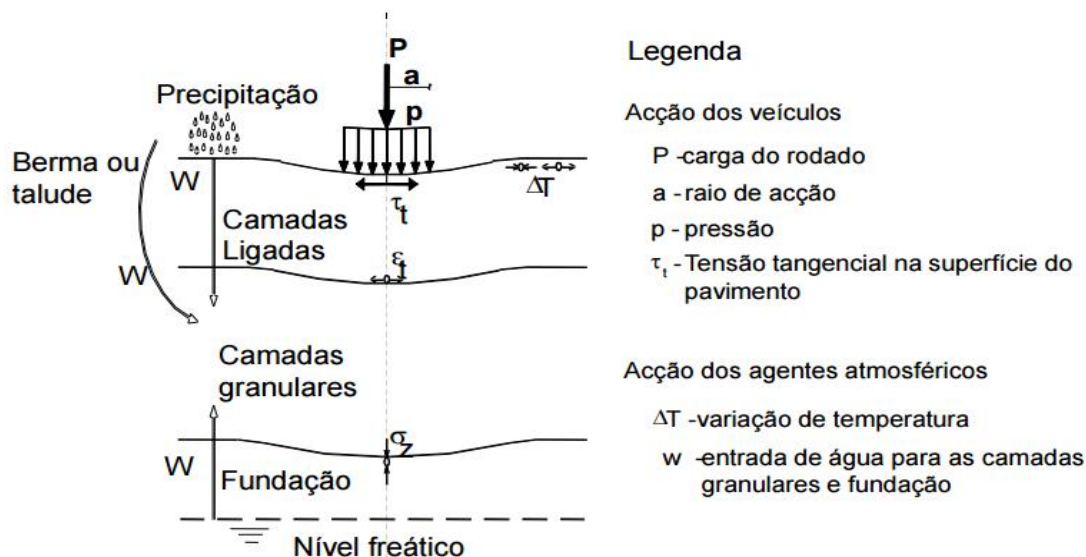


Figura 2.1 - Constituição do pavimento, ações, solicitações e respostas (Branco *et al.*, 2008)

2.2 Tipos de pavimentos

Os pavimentos rodoviários podem ser classificados de três tipos: flexíveis, semirrígidos e rígidos.

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas betuminosas, que se situam na parte superior da estrutura e que, quando comparados com os restantes tipos de pavimentos, possuem elevada deformabilidade, enquanto as camadas inferiores são constituídas por materiais granulares, que assentam na fundação. As camadas betuminosas são constituídas por duas ou três camadas: a camada de desgaste e a camada de regularização constituem o revestimento superficial do pavimento, enquanto a terceira camada betuminosa, quando existe, constitui uma camada de base. As camadas granulares são constituídas por materiais não ligados, estabilizados por meios mecânicos, apresentando apenas resistência à compressão e de maior espessura que as betuminosas, formando uma camada de base e/ou uma camada de sub-base, sendo que esta última assenta diretamente na fundação. Atualmente, estas camadas são constituídas por solos tratados, de forma a aumentar a suas características mecânicas, contudo, a camada de base pode ser constituída por materiais granulares ou betuminosos (Minhoto, 2007).

Os pavimentos rígidos apresentam deformabilidade extremamente reduzida, mesmo quando submetidos a tráfego pesado intenso e lento, devido sobretudo à elevada resistência à flexão do betão. Estes pavimentos são constituídos, na camada superior, por materiais granulares estabilizados com ligantes hidráulicos, formando uma laje de betão de cimento, compactado por vibração, sendo a camada inferior, camada de sub-base, constituída por material granular ou por material granular estabilizado com ligante hidráulico (betão pobre). A camada de sub-base é construída visando mais a componente funcional do que a resistente, visto obter-se uma camada regular que permite a execução da laje em boas condições, e que ao mesmo tempo seja resistente à erosão, evitando o descalçamento da laje, e a ação do tráfego de obra. Neste tipo de pavimentos, as cargas induzidas pelo tráfego são maioritariamente suportadas pela laje de betão (Pereira e Miranda, 1999).

Os pavimentos semirrígidos resultam da combinação dos dois tipos de pavimentos descritos anteriormente: camada superior constituída por materiais betuminosos e camadas subjacentes normalmente constituídas por materiais hidráulicos, tendo o conjunto deformabilidade reduzida (Minhoto, 2007). Neste tipo de pavimentos, é a camada de base que suporta, grande parte das cargas induzidas pelo tráfego, tendo, em certos casos, as camadas betuminosas uma contribuição estrutural importante, em função das respetivas espessuras (Branco *et al.*, 2008).

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas de espessura finita, apoiadas em uma fundação formada pelo terreno natural. A Figura 2.2 ilustra a distribuição das várias camadas que ilustram o pavimento.

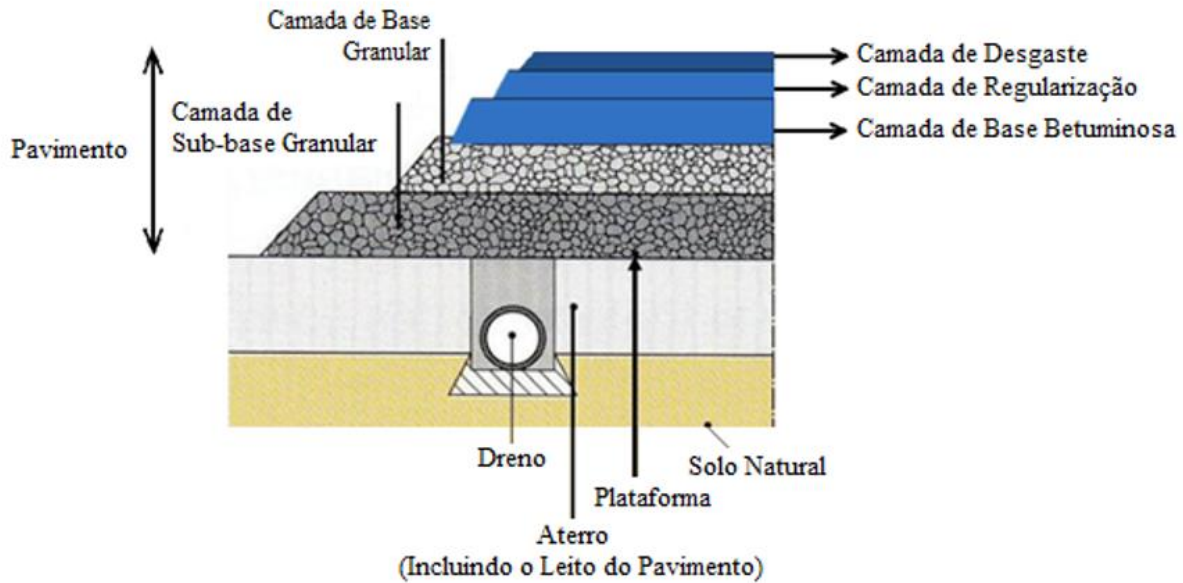


Figura 2.2 - Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (Azevedo, 2012)

A Tabela 2.1 indica a função de cada uma das camadas de um pavimento rodoviário.

As ações do tráfego são resultantes da passagem de veículos que, de uma forma básica, se podem considerar como sendo uma força vertical (uniforme e aplicada numa área circular), e uma tensão tangencial na superfície do pavimento que se deve ao contacto entre o pneu e o pavimento (Silva, 2006).

Quanto às ações provocadas pelo clima, são essencialmente constituídas por dois tipos: hídricas, provocadas pela ação da água, que diminui a capacidade de carga das camadas granulares e do solo de fundação; ou térmicas, ação da temperatura, que provoca o envelhecimento do betume e propicia deformações permanentes e fendilhamento térmico.

Tabela 2.1 - Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário

Camadas do Pavimento		Função
Camadas Superiores	Desgaste	<ul style="list-style-type: none"> - Garantir circulação do tráfego com conforto e segurança; - Drenagem ou impermeabilização; - Distribuir as tensões induzidas pelo tráfego.
	Regularização	<ul style="list-style-type: none"> - Camada estrutural; - Regularizar a superfície da camada de base.
	Base Betuminosa	<ul style="list-style-type: none"> - Camada estrutural.
Camadas Granulares	Base	<ul style="list-style-type: none"> - Camada estrutural; - Degradação das cargas induzidas pelo tráfego.
	Sub-Base	<ul style="list-style-type: none"> - Proteger durante a fase construtiva as camadas inferiores; - Proteger a base da subida de água capilar; - Drenagem interna do pavimento; - Camada estrutural; - Resistência à erosão.
Fundação	Leito do Pavimento	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar deformação do solo; - Homogeneidade das características mecânicas da fundação; - Plataforma construtiva; - Possibilidade de compactação das camadas sobrejacentes em adequadas condições.
	Solo de Fundação	<ul style="list-style-type: none"> - Suporte do pavimento: São as suas características que condicionam o dimensionamento.

2.3 Degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis causadas pela água

A presença de água nos pavimentos faz com que estes fiquem deteriorados. A água fará com que o ligante não adira ao agregado, e uma vez que este é o componente que os mantém unidos, pode dar origem a uma diminuição da rigidez ou da resistência da mistura betuminosa ou causar a perda de ligação entre a emulsão betuminosa e os agregados (Torres *et al.*, 2010).

O estudo deste fator é importante quando se pretende fazer a seleção das misturas betuminosas 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).

Segundo Silva (2006), outra consequência da presença de água nas misturas betuminosas é a redução da sua rigidez. Com a redução da rigidez, um pavimento está mais sujeito ao aparecimento de degradações, como resultado do aumento das extensões nas diversas camadas do pavimento, quando se aplica o mesmo nível de tensão.

Segundo Pereira (2009), existem três origens distintas para a água presente no pavimento:

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

De acordo com Kandhal (1992), citado por Copeland (2007), o movimento mais comum da água é o movimento ascendente a partir do lençol freático, por capilaridade. Este comportamento pode ocorrer devido à falta de características adequadas dos materiais que constituem as camadas de sub-base e de base, com uma elevada permeabilidade, que podem levar a uma drenagem inadequada. Deste modo, as camadas granulares ficam com muita água na sua constituição, fazendo migrar no sentido, ascendente, em direção às camadas betuminosas.

É essencial conhecer as várias patologias associadas à presença de água numa mistura betuminosa para se perceber a sua origem. As principais consequências da presença da água numa mistura betuminosa são a desagregação e a subida de finos.

Desagregação

A desagregação resulta de uma perda de adesividade e caracteriza-se pelo deslocamento da película de ligante do agregado. O processo de desagregação tem início na base das camadas betuminosas pode ocorrer devido a várias causas, como a seleção inadequada de materiais, falhas na construção, ou pela presença de água e/ou pelo vapor de água na mistura. Este fenómeno é difícil de detetar, uma vez que começa na base das camadas betuminosas e manifesta-se através de outros mecanismos de falha nomeadamente a fadiga, suporte estrutural, fendas longitudinais ou deformação permanente (Pereira, 2009).

A desagregação com início na camada de desgaste resulta da deficiente ligação entre os diferentes componentes de uma mistura betuminosa, ou da falta de estabilidade dessa ligação. Quando existe um desgaste rápido do mástique, que envolve o agregado grosso, este fica à vista originando uma desagregação designada por “cabeça de gato” (Branco *et al.*, 2008).

Subida de finos

A subida de finos ocorre em pavimentos com problemas de drenagem e com excesso de água nas camadas que constituem o pavimento. Devido a solicitação do tráfego, esses pavimentos são sujeitos uma pressão de compressão e a água tende a atravessar as camadas e transportar os materiais mais finos para à superfície, originando a subida de finos (Francisco, 2012).

2.4 Misturas betuminosas

Segundo Silva (2006), a composição das misturas betuminosas é fundamental para um bom desempenho em serviço. O comportamento das misturas betuminosas no pavimento depende, para além das características dos seus componentes, da sua composição volumétrica.

Na Figura 2.3, podemos observar que os agregados e o betume constituem quase na totalidade uma mistura betuminosa. No entanto, após a compactação, há sempre um volume que é ocupado por ar, designado por volume de vazios.

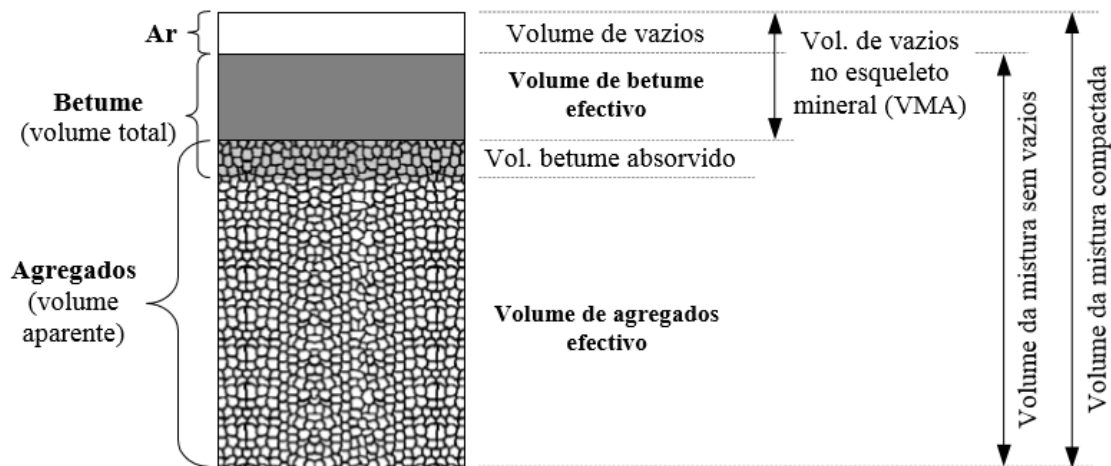


Figura 2.3 - Composição volumétrica duma mistura betuminosa (adaptado de *Asphalt institute, 1989*)

De acordo com Branco *et al.* (2008) as misturas betuminosas devem ter as seguintes características:

- Estabilidade;
- Durabilidade;
- Flexibilidade;
- Resistência à fadiga;
- Aderência;
- Impermeabilidade;
- Trabalhabilidade.
-

Estabilidade

Esta característica está relacionada com a capacidade da mistura resistir às deformações permanentes produzidas pelas cargas impostas pela passagem de veículos. São necessárias duas características fundamentais para que uma mistura possua esta característica: atrito interno dos materiais e coesão. O atrito interno é função do agregado e depende da granulometria, da textura, da forma ou da densidade. A coesão é uma característica do betume que assegura uma ligação entre as partículas de agregado. Quanto maior for a quantidade de betume na mistura, maior será a coesão entre as partículas de agregado, mas só até um determinado valor, a partir daí esse valor baixa. Quantidade excessiva de ligante também diminui o atrito interno entre as partículas.

Durabilidade

A durabilidade de uma mistura está relacionada com a resistência às solicitações causadas pelo tráfego e pelo clima. Quanto maior for esta resistência maior será a durabilidade do pavimento. O betume tem uma função fundamental nesta característica, pois quanto maior for a quantidade de betume, maior será a durabilidade da mistura. Elevada quantidade de betume na mistura faz com que esta tenha uma redução no volume de vazios e deste modo torna mais difícil a entrada da água na mistura. Uma granulometria contínua e agregados bem compactados também garante uma mistura impermeável. No entanto, uma mistura com elevada quantidade de betume pode reduzir a estabilidade da mistura, desta forma, na sua formulação deve-se determinar a quantidade de betume ótima.

Flexibilidade

Uma mistura deve ter a capacidade de se adaptar gradualmente aos movimentos do seu suporte. De um modo geral, o aumento da quantidade de betume proporciona à mistura uma maior flexibilidade.

Resistência à fadiga

A resistência à fadiga consiste na capacidade que as camadas ligadas que compõem o pavimento devem suportar. De forma geral, o aumento do teor de betume também melhora esta característica.

Aderência

Esta propriedade é fundamental para a segurança dos utentes, pois caso não exista aderência entre o pneu-pavimento a probabilidade de existir acidentes é superior. Para contrariar esta situação os agregados usados na mistura devem possuir uma textura superficial rugosa. Em zonas de muita precipitação devemos usar misturas com maior volume de vazios e deste modo garantir o escoamento das águas.

Impermeabilidade

É uma característica fundamental na análise da sensibilidade à água. Uma mistura deve ser capaz de oferecer resistência à passagem de água e de ar. Quanto menor for o volume de vazios da mistura, maior será a sua impermeabilidade. Como abordado anteriormente, maior quantidade de betume diminui o volume de vazios, logo melhora esta característica.

Trabalhabilidade

Para além das características ideais, já abordadas, uma mistura betuminosa deve garantir uma boa compactação e facilidade de compactação. Por vezes, ter uma maior estabilidade da mistura dificulta a sua trabalhabilidade. O respeito pelas regras de operação dos equipamentos e uma correta formulação da mistura são também fatores importantes para boas condições de trabalhabilidade.

2.5 Sensibilidade à água de misturas betuminosas

2.5.1 Ensaio de sensibilidade à água

Existem vários tipos de ensaios de sensibilidade à água, nomeadamente os realizados de acordo com a norma Europeia EN 12697-12, a norma Militar Americana MIL-STD-620A, a norma Espanhola NLT-162/84 e a norma Americana ASTM D 1075-96. Estas metodologias têm como base o mesmo conceito, onde um grupo de provetes é submetido a determinadas condições de condicionamento em água, enquanto que o outro grupo de provetes é submetido a condições muito pouco severas. Todas elas se baseiam em determinar a resistência conservada da mistura através da divisão dos valores de resistência obtidos para o grupo de provetes condicionados pelos valores do grupo não condicionado. A principal diferença entre estas normas reside no tipo de condicionamento dos provetes. Neste estudo apenas serão utilizadas a norma Europeia, que vigora atualmente em Portugal, e a norma Militar Americana, norma utilizada antigamente.

2.5.2 Mecanismos de degradação em misturas betuminosas devido à presença da água

De acordo com Terrel e Al-Swailmi (1994), existem três mecanismos que provocam a degradação de misturas betuminosas:

- Perda de adesividade;
- Perda de coesão;
- Degradação ou fratura de partículas de agregado quando sujeitos a congelamento.

A coesão refere-se à interação entre o mástique betuminoso e a água. A presença da água pode enfraquecer o betume, levando a uma severa perda de durabilidade e força. A adesão refere-se à quebra da ligação entre o betume e o agregado. Esta quebra de ligação também

pode existir devido aos agregados serem fracos, podendo danificar a mistura betuminosa e conseqüentemente perda de força, segundo Stuart (1990) citado por Copeland (2007). A degradação ou fratura de partículas de agregados quando sujeitos a congelamento não vai ser abordado visto que, em Portugal não são comuns este tipo de degradações.

Perda de adesividade

Vários autores (Khandal e Parker Jr., 1998; Roberts *et al.*, 1991; Yoon e Tarren, 1988), citados por Furlan *et al.* (2004) consideram que embora as características do betume e o tipo de mistura possam influenciar a sensibilidade à água de misturas betuminosas, as propriedades dos agregados são as principais responsáveis pela resistência adesiva entre o betume e o agregado.

São várias as características dos agregados que influenciam no fenômeno de adesividade, das quais se destacam:

- Composição mineralógica e polaridade;
- Porosidade;
- Absorção;
- Forma;
- Textura;
- Angularidade.

Para além dos agregados, o tipo de betume presente nas misturas betuminosas é outro dos fatores responsáveis pela adesividade entre o betume e o agregado.

Composição Mineralógica e Polaridade

Segundo Furlan *et al.* (2004) os agregados apresentam composições mineralógicas e estruturas cristalinas específicas, podendo ser classificados em ácidos e básicos, de acordo com a quantidade de sílica (SiO₂) presente. O aumento do teor de sílica num agregado aumenta sua afinidade com a água e, por isso, são chamados agregados hidrofílicos. Por outro lado, agregados básicos como basaltos, diabásios, gabros e alguns tipos de calcários, devido à menor concentração de sílica em suas composições, tendem a desenvolver melhores ligações ao betume que à água e, por isso, são chamados hidrofóbicos.

A maioria dos agregados silicosos tais como arenito, quartzo e cascalho torna-se negativamente carregada na presença de água, enquanto materiais calcários conduzem carga positiva na presença de água. Muitos agregados contêm ambas as cargas porque são compostos de minerais tais como sílica com carga negativa e também cálcio, magnésio, alumínio ou ferro com carga positiva. Agregados típicos que apresentam essa condição incluem basaltos e calcários silicosos. A dolomita é um exemplo de caso extremo de agregado eletropositivo e o quartzito um exemplo de agregado eletronegativo. Os agregados de rochas classificadas como ácidas costumam apresentar problemas de adesividade, enquanto os de rochas classificadas como básicas normalmente apresentam melhor adesividade ao ligante betuminoso (Bernucci *et al.*, 2008).

Porosidade e Absorção

Os poros em rocha são descritos como cavidades formadas irregularmente, que podem estar conectadas por capilares que têm forma e diâmetro variados. O menor diâmetro interno do poro é usado como a medida que caracteriza o seu tamanho.

A porosidade é uma relação entre o volume de vazios e o volume total de um material. Alguma porosidade no agregado é desejável, pois pode beneficiar a ligação betume/agregado. No entanto, se o agregado for muito poroso, ele pode absorver quantidades excessivas de betume. Basicamente, a consequência direta de uma absorção alta é a diminuição da espessura do filme de betume que envolve as partículas do agregado, ou seja, menor quantidade de betume efetivo na mistura. Essa diminuição torna a mistura frágil e mais suscetível às ações do clima, da água, do envelhecimento e do tráfego (Furlan *et al.*, 2004).

O tamanho e a distribuição dos tamanhos dos poros podem determinar a quantidade e o mecanismo de absorção. Alguns poros pequenos, que podem ser penetrados pela água, podem não apresentar absorção de betume, devido à maior viscosidade do betume comparada à da água. A distribuição do tamanho do poro é um dos fatores que influencia na diferença entre a absorção de água e betume (Gouveia *et al.*, 2004).

Lee (1969) citado por Gouveia *et al.* (2004), em estudos sobre absorção, ao determinar as curvas de distribuição dos tamanhos dos poros, notou que os agregados possuem poros de tamanhos distintos e que estes variam de maneira desigual. O autor verificou ainda que tamanhos de poros maiores que 0,5 μm influenciam diretamente a absorção de betume e que

poros menores que 0,1 μm não absorvem betume, evidenciando que a absorção depende não somente da porosidade, mas também da frequência de ocorrência dos tamanhos dos poros.

Angularidade, Forma e Textura

A angularidade, a forma e a textura superficial das partículas dos agregados são características muito importantes para o bom desempenho da mistura betuminosa, inclusive quanto à resistência aos danos causados pela presença de água na mistura, de acordo com Mazidjاده e Brovold, (1968) citado por Furlan *et al.*, 2004.

A forma ideal dos agregados, para uso em misturas betuminosas, é a cúbica. A utilização de partículas de forma plana ou alongada, ou ainda, plana e alongada (lamelar) em misturas betuminosas pode causar vários problemas, entre eles a quebra de partículas durante a compactação, fazendo com que o filme de betume que cobre o agregado se rompa, também possibilitando a entrada de água na interface agregado-ligante (Furlan *et al.*, 2004). Agregados angulares, ou seja, com cantos agudos, proporcionam maior intertravamento e atrito entre partículas, formando uma estrutura granular mais resistente e proporcionando maior estabilidade às misturas. Por outro lado, os cantos agudos podem ser responsáveis pela perfuração do filme de betume, possibilitando a entrada de água na interface betume/agregado.

De acordo com Kim et al. (1992) citado por Furlan *et al.*, 2004, apurou que misturas contendo agregados com textura superficial rugosa promovem melhor ligação entre betume/agregado. Ensaios nas superfícies de rotura, após os ensaios de fadiga, revelam que a rotura ocorrida nas misturas contendo agregados de textura superficial lisa se dá na interface betume/agregado, enquanto que em misturas contendo agregados de superfície rugosa ela progride através das partículas, até nos agregados mais grossos, indicando uma ligação mais forte entre betume/agregado.

Propriedades do Betume na Adesividade

Ao betume cabe o papel de envolver os agregados através da adesividade desenvolvida entre os dois materiais, ele deve ligar-se aos agregados, não se descolar com o objetivo de resistir às ações do clima e da água. De todos os fatores relacionados com o betume, a viscosidade é a característica ligada ao fenômeno de adesividade e absorção.

Segundo Gouveia *et al.* (2004), a viscosidade do betume “indica” o grau de mobilidade molecular e a magnitude das forças atrativas em líquidos e é influenciada diretamente pela temperatura. Com o aumento da temperatura, as forças intermoleculares diminuem, aumentando o poder de molhagem do betume, possibilitando o aumento da área de recobrimento na superfície do agregado. Essa diminuição da viscosidade pode contribuir para que ocorra uma pequena absorção de betume pelo agregado, melhorando assim o intertravamento.

No que se refere à adesividade, ao longo dos anos vários autores verificaram que betumes mais viscosos resistem mais ao deslocamento da película de betume pela ação da água que os menos viscosos (Majidzadeh e Brovold, (1968); Taylor e Khosla, (1983), Hicks, (1991), citados por Gouveia *et al.* (2004)). Um comportamento semelhante é esperado com o envelhecimento dos ligantes que, de acordo com o autor referido anteriormente, através do processo de envelhecimento tornam-se mais viscosos. Entretanto, deve-se destacar que o envelhecimento altera as propriedades mecânicas das misturas betuminosas, tornando-as mais quebradiças e frágeis, podendo este processo acarretar danos prematuros nas camadas betuminosas, sobretudo nas de desgaste. O envelhecimento pode afetar o grau de absorção de betume pelo agregado, pois ela está diretamente relacionada ao tempo de exposição das misturas a temperaturas que propiciem diminuição da viscosidade.

Huang *et al.* (2003), citado por Gouveia *et al.* (2004), afirmaram que a perda da resistência adesiva das misturas betuminosas corresponde à perda de componentes resultantes da ligação na interface betume/agregado da mistura. Como um par único, a “química” da interface betume/agregado determina o grau de adesividade e de sensibilidade à água. A partir da avaliação das misturas betuminosas com grupos funcionais similares àqueles formados no envelhecimento, concluíram que alguns compostos formados no processo de oxidação do betume aumentam a resistência da mistura à ação da água.

Outro tipo de alteração na composição dos betumes pode ocorrer devido à absorção seletiva, que causa modificações no betume absorvido e no não absorvido (ou efetivo). Alguns componentes do betume podem penetrar nos poros de forma diferenciada, dependendo do tamanho do poro. Por exemplo, grandes moléculas, como as dos asfaltenos, ficam concentradas no filme de betume efetivo, enquanto moléculas menores, como as dos maltenos, são preferencialmente absorvidas dentro do poro. Portanto, o filme de betume que

cobre o agregado pode ter as suas propriedades reológicas, físicas, químicas e de envelhecimento diferentes das do betume original adicionado à mistura (Lee *et al.*, 1990, citado por (Gouveia *et al.*, 2004).

Perda de coesão

Segundo Terrel and Al-Swailmi (1990), citados por Copeland (2007) coesão é definida como a força intermolecular que mantém as moléculas de um sólido ou de um líquido unidas. A nível macroscópico numa mistura betuminosa compactada, as forças coesivas constituem a integridade do material.

No que diz respeito a um nível microscópico, considerando a película de betume que envolve o agregado, a coesão pode ser definida como deformação sob uma carga que ocorre a uma distância do estrato de agregado, para além da influência do intertravamento mecânico e da orientação molecular (Terrel e Al-Swailmi, 1994).

As forças coesivas desenvolvem-se no mástique betuminoso e são influenciadas pela viscosidade do betume. A viscosidade do ligante betuminoso é dependente da temperatura e as forças coesivas desenvolvidas na mistura betuminosa são inversamente proporcionais à temperatura. A perda de coesão devido à presença de água ocorre, normalmente, no mástique betuminoso (Copeland, 2007).

A presença de água pode afetar a coesão de uma mistura betuminosa de várias formas, deterioração do mástique devido à saturação e aumento de volume de vazios. A água pode-se comportar como um solvente no betume e daí resultar uma redução da resistência, aumentando a deformação permanente. Os betumes que retêm maior quantidades de água demonstraram acumular danos a um ritmo mais elevado (Cheng, et al., 2002 citado por Copeland, 2007).

Segundo ASTM (1997) citado por Copeland (2007), em casos extremos, a presença de água (saturação) pode resultar em emulsão betuminosa, que se trata de uma da suspensão de pequenos glóbulos de material betuminoso em água. Segundo Miknis *et al.*, 2005, uma tendência maior é a ocorrência de uma emulsão invertida onde a água fica suspensa dentro do ligante betuminoso em esferas.

2.6 Parâmetros que influenciam a sensibilidade à água de misturas betuminosas

2.6.1 Características do agregado

Os agregados formam cerca de 85 % do volume das misturas betuminosas, fazendo com que assumam um papel de extrema importância no que concerne à promoção da resistência e absorção de grande parte dos esforços impostos pelos veículos (Mahmoud, 2005).

De acordo com Miranda (2008), citado por Pereira (2009), afirma que uma mistura betuminosa é composta por agregados de três dimensões diferentes, agregado grosso, 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.

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

Kandhal et al. (1998), citado por 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 da mistura 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.

Os agregados utilizados na mistura betuminosa não devem ser muito porosos, deste modo a quantidade de betume a utilizar irá ser muito elevada, nem totalmente impermeáveis pois a adesividade do betume aos agregados será reduzida (Silva, 2006).

Segundo Pereira (2009), e de acordo com os estudos realizados, uma mistura produzida com agregado basáltico e calcário apresenta melhores resultados de sensibilidade à água quando comparado com uma mistura produzida com granito.

2.6.2 Granulometria

Segundo Miranda (2008), citado por Pereira (2009), os agregados, quando incorporados como elementos estruturantes numa mistura, deverão obedecer a um fuso granulométrico pré-estabelecido para a respetiva mistura betuminosa, determinado pelo Caderno de Encargos. A granulometria vai influenciar a resistência obtida, assim como as propriedades das misturas betuminosas nas várias fases da sua vida.

De acordo com Pereira (2009), na fase de construção a granulometria influencia a trabalhabilidade da mistura, devendo o agregado manter as suas características intactas. Para tal, é necessário que este ofereça resistência à fragmentação aquando da sua aplicação e também ao choque térmico, dadas as elevadas temperaturas de fabrico e de aplicação das misturas. Por sua vez na fase de serviço, a granulometria adotada condiciona o tipo de estrutura que se vai obter, assim como o nível de imbricamento entre as partículas do agregado.

A granulometria influencia todas as características de comportamento da sua mistura betuminosa. Na prática, uma mistura adequada de elementos finos, médios e grossos, com uma densidade elevada, é aquela que permite obter melhores características de comportamento para a mistura betuminosa (Curtis *et al.*, 1993).

A utilização de uma curva granulométrica contínua dá origem a uma mistura fechada ou densa, que impedirá a penetração da água no pavimento dada a sua compactidade. Consequentemente, a utilização de uma mistura de granulometria descontínua dá origem a uma mistura aberta ou drenante, que permitirá a penetração da água no pavimento. Estas misturas betuminosas, designadas como drenantes, são utilizadas apenas em camadas de desgaste e têm como principal função a rápida extração da água da superfície do pavimento com o intuito de evitar fenómenos de “*aquaplaning*” ou redução do ruído, entre outras (Pereira, 2009).

2.6.3 Volume de vazios

De acordo com Silva (2006), o volume de vazios desempenha um papel importante nas misturas betuminosas. Assim sendo, misturas com maior volume de vazios são mais permeáveis, no entanto são menos duráveis e têm menor resistência às deformações que ocorrem com a passagem do tráfego. Quando o volume de vazios é demasiado baixo (inferior a 3%), aparecem problemas relacionados com a estabilidade da mistura betuminosa, existindo grande probabilidade para a ocorrência de deformações permanentes e para exsudação do ligante.

A ação da água é mais prejudicial em misturas com maior porosidade devido à maior zona de contato 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.*, 2010).

Estudos realizados por Martins (2012), demonstram que 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.

2.6.4 Tipo de betume

Para além dos agregados, o outro componente base das misturas betuminosas é o betume que é o ligante mais usado em trabalhos de pavimentação rodoviária (Branco *et al.*, 2008).

De acordo com Silva (2006), o ligante betuminoso desempenha as seguintes funções na mistura betuminosa:

- permitir a ligação entre os agregados, de modo a que a mistura betuminosa tenha resistência à tração;
- garantir flexibilidade à mistura betuminosa (resistência ao fendilhamento sob a ação das cargas);
- assegurar a impermeabilidade e durabilidade à mistura betuminosa (resistência à ação dos agentes climáticos);
- conferir trabalhabilidade à mistura betuminosa, garantindo condições adequadas de produção em central e compactação *in situ*.

Ensaio de sensibilidade à água realizados por Pereira (2009), com dois tipos de betume, de penetração nominal 35/50 e 50/70, apurou que o betume com penetração nominal 35/50 apresentou melhores valores de resistência conservada. Deste modo, pode-se concluir que os betumes menos rígidos apresentam uma maior sensibilidade à água, logo menor durabilidade.

Partl *et al.* (2010) 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.

Ensaio realizados por Batista *et al.* (2011), apresentaram resultados interessantes em relação a uma mistura betuminosa porosa. Foram feitos cinco ensaios de sensibilidade à água numa mistura betuminosa porosa em cinco laboratórios diferentes, e o valor médio de resistência conservada foi cerca de 80 %. Como se trata de uma mistura betuminosa porosa este resultado deve ser alvo de interesse, devido ao facto do ligante utilizado ser um betume modificado. Deste modo misturas betuminosas produzidas com betume modificado tem tendências a apresentar melhores resultados de sensibilidade à água.

Martins (2012) através ensaios de sensibilidade à água concluiu que:

- 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.

2.6.5 Teor em betume

A quantidade de betume influencia o comportamento das misturas betuminosas em serviço. Como já referido foi abordado, um aumento do teor de betume aumenta a resistência à fadiga, a trabalhabilidade, a impermeabilidade e a durabilidade. No entanto, em contrapartida, diminui a resistência às deformações permanentes e a aderência pneu-pavimento. Assim sendo, na formulação das misturas betuminosas deve-se determinar um teor de betume ótimo de modo a que todas as características fiquem otimizadas e assim se obter uma mistura com um bom desempenho.

Segundo Pereira (2009), parte do betume é absorvido pelo agregado e outra parte fica a envolvê-lo, resultando no volume total de betume. O volume de betume juntamente com o volume de vazios é igual ao valor do VMA. Se a quantidade de betume absorvido pelo agregado for muito elevada, diminuindo a espessura de betume que envolve as partículas de agregado, a sensibilidade à água das misturas aumenta, conseqüentemente, a mistura betuminosa torna-se 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 a ocorrência desse fenómeno, a quantidade de betume utilizada é muito importante, pois fornece uma resistência maior da mistura para a entrada da água. Outro fator que se deve ter em consideração, deve ser a percentagem de betume, uma vez que esta 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 um fator muito importante para assegurar não só uma menor sensibilidade à água como uma resistência à deformação.

2.6.6 Método de ensaio

Pereira (2009) realizou ensaios de sensibilidade à água, para a mesma mistura, de acordo com duas normas, ensaiados pelo método 104 da norma militar MIL-STD-620A e o método A da norma europeia EN 12697-12. Através dos ensaios realizados, o autor apurou que os resultados obtidos pela norma Militar apresentam maiores valores de resistência conservada quando comparados com os resultados obtidos através da norma Europeia.

Batista *et al.* (2011) realizou a mesma comparação entre as duas normas, norma militar MIL-STD-630A método 104 e norma europeia EN 12697-12, em todos os ensaios realizados pela norma militar, para diferentes misturas, diferentes tipos de betumes e diferentes tipos de agregados, os valores de índice de resistência conservada foram superiores a 85%. Em apenas um dos cinco ensaios realizados pela norma Militar apresentou pior resultado quando comparado com a norma Europeia, sendo que se trata de uma diferença mínima. Concluíram, então, que regra geral a norma Europeia conduz a valores de resistência conservada inferiores aos obtidos pela norma militar. Assim, pela norma Europeia é possível diferenciar melhor os comportamentos de diferentes misturas, oferecendo assim resultados mais conclusivos sobre a sensibilidade à água.

2.6.7 Temperatura de ensaio

De acordo com o método A da norma europeia EN 12697-12:2008 o condicionamento dos provetes pode ser efetuado a uma temperatura de ensaio de tração indireta compreendida entre os 5 °C e os 25 °C. No entanto, a norma inclui uma nota onde recomenda que seja adotada uma temperatura de ensaio de 25 °C, tanto para se obter a influência máxima da adesividade do ligante, como para minimizar a influência dos agregados partidos na linha de rotura do provete. Observa-se, no entanto, que a norma EN 13108-20, preconiza uma temperatura de 15 °C para efeitos de ensaios tipo iniciais de misturas betuminosas abrangidas pela marcação CE.

Pereira (2009), através de ensaios realizados, concluiu que os valores obtidos de resistência conservada em tração indireta à temperatura de ensaio de 15 °C são inferiores aos que se obtiveram à temperatura de 25 °C. Os valores de resistência oferecida (em kN), foram substancialmente superiores aos ensaios realizados à temperatura de 25 °C. No mesmo contexto, e desta vez segundo Batista e Antunes (2009) os seus testes apuraram a mesma conclusão, que os valores de resistência conservada à temperatura de 25 °C são superiores quando comparados com o ensaio a 15 °C. De acordo com os mesmos autores, também o valor médio da resistência à tração indireta (em kN) foi superior no ensaio realizado à temperatura de 15 °C.

2.6.8 Ensaios realizados por laboratórios diferentes

Batista *et al.* (2011) realizaram um estudo que consistiu em 5 laboratórios diferentes fazerem o ensaio de resistência conservada à tração indireta a três misturas diferentes nas mesmas condições de ensaio. As misturas betuminosas utilizadas foram, duas misturas convencionais (AC 14 surf), com diferentes composições e uma mistura drenante (PA 14 surf). A primeira mistura convencional usou um tipo de agregado granítico e um tipo de betume 35/50, sendo designada por AC14-G1. A segunda mistura convencional usou um tipo de agregado doleritos (brita) e calcário (pó) e o tipo de betume utilizado foi 50/70, sendo designada por AC14-D2. A mistura drenante, tipo de agregado granito e com um betume modificado, sendo designada por PA1. Os provetes foram preparados pelo mesmo laboratório e distribuídos pelos restantes laboratórios que iam participar, deste modo foi possível minimizar erros que podiam vir a existir caso cada laboratório produzisse a sua própria mistura. Os resultados obtidos do ensaio de sensibilidade à água (EN 12697-12 – método A), a 15°C para a mistura AC14-G1 seguem-se na Figura 2.4. Os resultados apresentados nessa figura, demonstram uma grande variabilidade dos resultados. Os valores de ITSR variaram entre 53% e 86%, ou seja, apresentam uma variabilidade de 33% sendo que a principal responsabilidade recai sobre os provetes condicionados em água (ITSw).

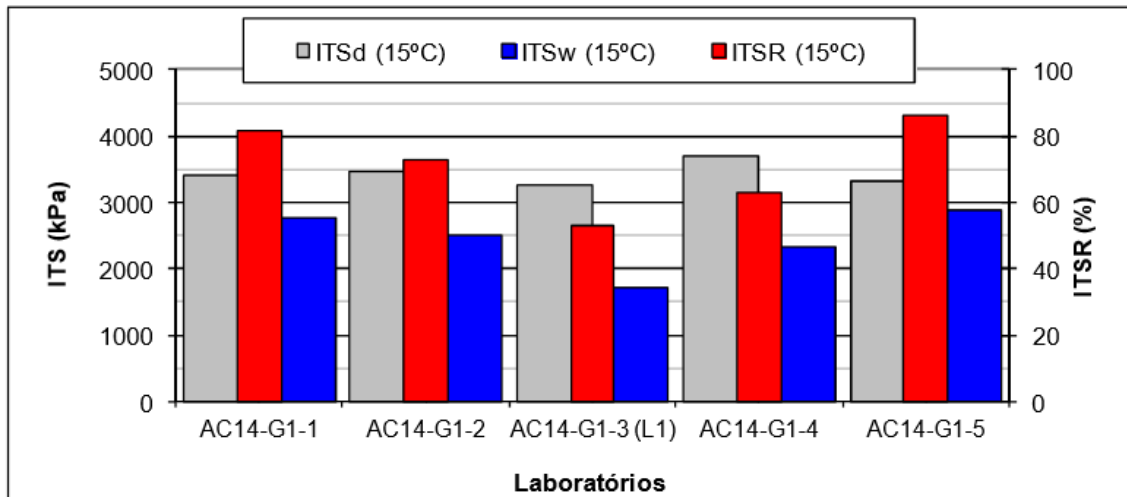


Figura 2.4 - Resultados obtidos para a mistura AC14-G1 (Batista et al., 2011).

Na Figura 2.5 observam-se os resultados para a mistura AC14-D2. Para esta mistura os resultados obtidos apresentaram uma discrepância muito menor, 93% a 100%, e apresentando bons valores de ITSR.

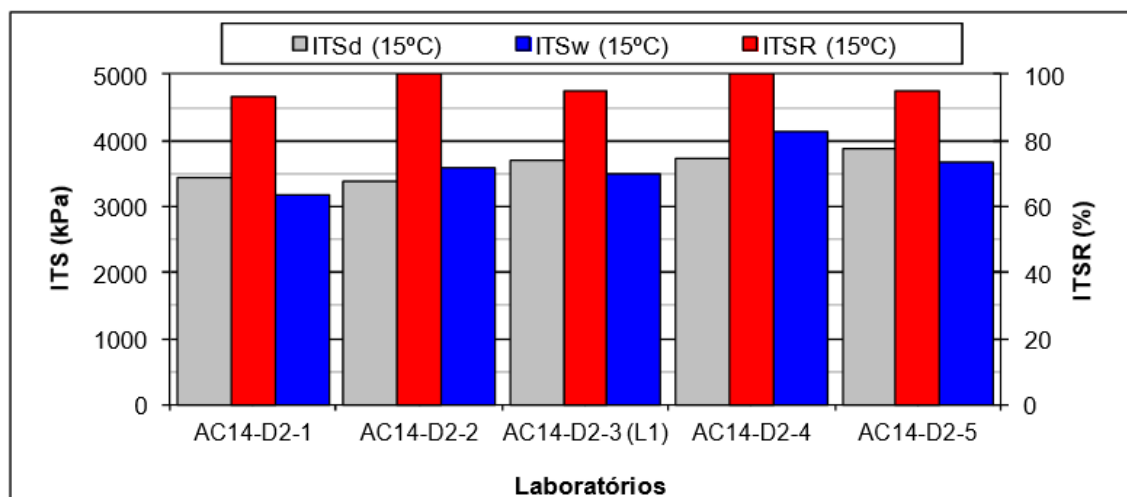


Figura 2.5 - Resultados obtidos para a mistura AC14-D2 (Batista et al., 2011).

Por fim, para mistura drenante, obtiveram os resultados apresentados na Figura 2.6. Estes resultados obtidos, assim como na mistura AC14-G1, apresentam uma variabilidade de resultados muito elevada, 71% a 93%. No entanto neste caso a discrepância deve-se à resistência dos provetes secos (ITSd).

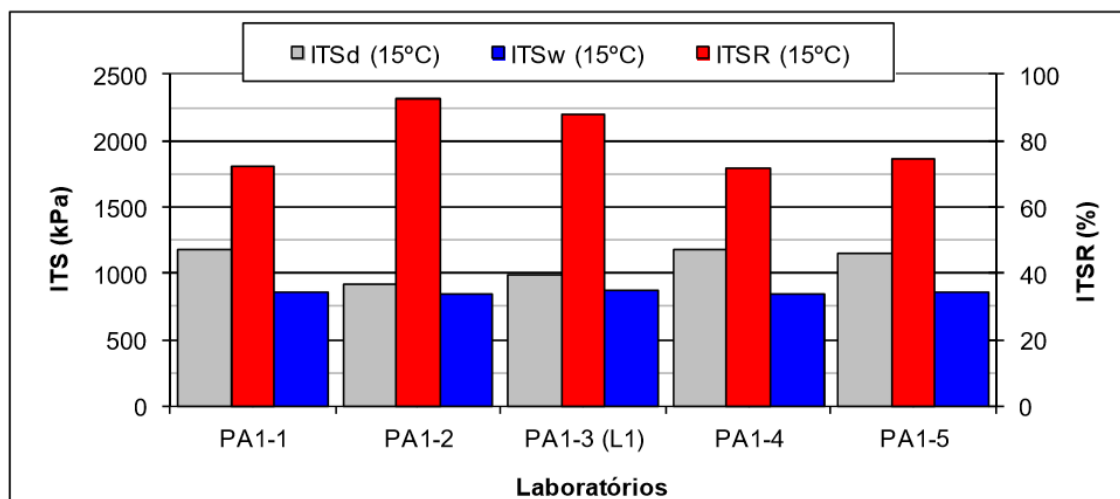


Figura 2.6 - Resultados obtidos para a mistura PA1 (Batista et al., 2011).

2.7 Considerações finais

Com base nos estudos anteriormente realizados relativamente ao impacto da água nas misturas betuminosas, constatou-se que a presença da água nas misturas betuminosas pode causar uma série de problemas, quer a nível estrutural quer a nível superficial, que podem levar à precoce degradação do pavimento. A presença da água no pavimento é inevitável, no entanto é necessário minimizar os danos que esta pode causar. Os principais responsáveis pela impermeabilização das misturas betuminosas são os agregados finos e o betume, que formam o mástique betuminoso. A elevada quantidade de betume faz com que os agregados fiquem bem envolvidos proporcionando não só uma melhor impermeabilidade, mas também o aumento da resistência à fadiga, trabalhabilidade e a durabilidade. No entanto a partir de uma certa quantidade de betume, designada por “teor ótimo de betume”, a estabilidade da mistura diminui assim como as deformações permanentes e a aderência pneu-pavimento.

Os pavimentos rodoviários são constituídos por misturas betuminosas, na Figura 2.7 é possível observar que estão sujeitos a várias ações entre elas, a água que é uma das mais prejudiciais. A água pode entrar no pavimento através da superfície, da berma ou através do solo (águas subterrâneas). Uma vez presente, ela pode-se movimentar por difusão, movimentação por pressão, migração térmica, adsorção, sucção por capilaridade e osmose. Associado à presença da água e aos seus movimentos, os pavimentos começam a degradar-se pela perda de adesividade e da coesão entre o betume e os agregados. Estas degradações

originam patologias nos pavimentos, sendo as mais usuais devido à presença da água, a desagregação e a subida de finos.

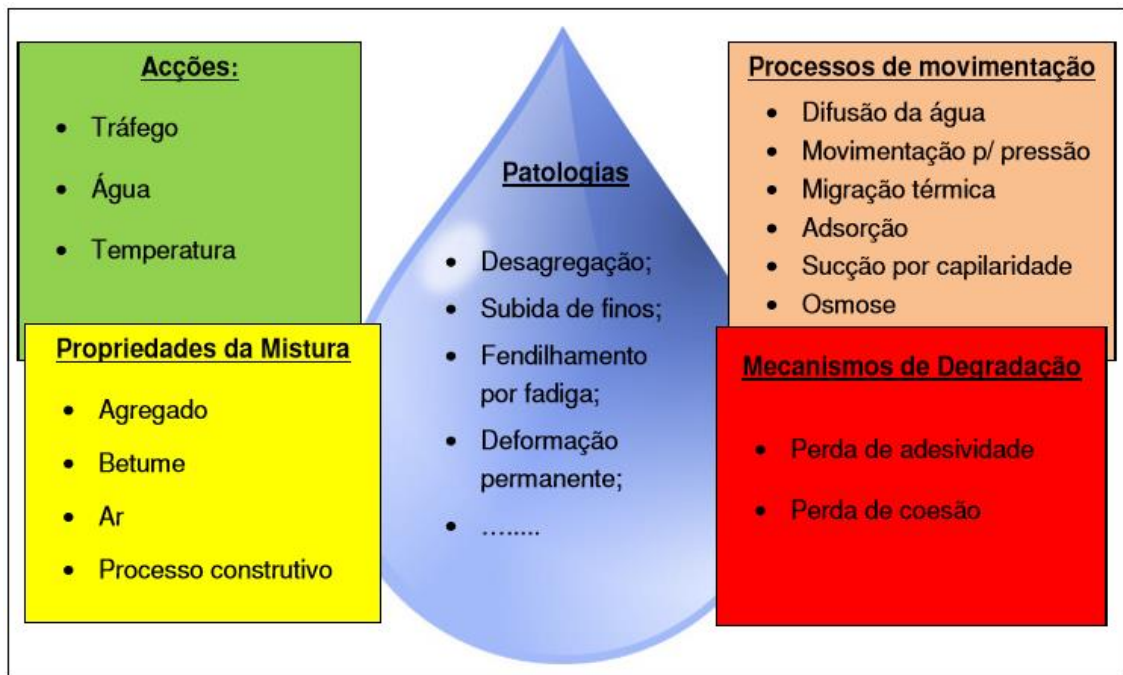


Figura 2.7 - Fatores a ter em conta no estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas (adaptado de Copeland, 2007)

Em relação aos ensaios de resistência conservada já realizados foi possível concluir que existem vários aspetos relacionados com a composição da mistura que influenciam os resultados, tais como:

- Tipo de agregados;
- Granulometria;
- Volume de vazios existente na mistura;
- Tipo de betume;
- Teor em betume

Todas estas condições alteram as propriedades das misturas betuminosas, influenciando deste modo os resultados obtidos nos ensaios de resistência conservada.

Em relação às condições de ensaio, foi possível apurar que ao realizar o ensaio de sensibilidade à água, pela norma europeia, a uma temperatura de 25°C os valores de resistência conservada são superiores quando comparados com os valores de resistência conservada a uma temperatura de 15°C. Também se apurou que o ensaio de sensibilidade à

água realizado pela norma Militar obtém melhores resultados de resistência conservada do que pela norma Europeia, isto deve-se ao facto das condições de condicionamento na norma Militar não serem tão severas quanto as da norma Europeia.

Por fim, foi possível apurar que ao realizar o mesmo ensaio, em diferentes laboratórios, a provetes com características idênticas, observa-se uma discrepância enorme nos resultados o que nos faz pensar acerca da veracidade deste tipo de ensaios. Neste sentido, surge o estudo que se segue, com o objetivo de saber quais as condições de ensaio que influenciam os valores finais de resistência conservada, de modo a identificar as variáveis, que alteradas, fazem variar os resultados finais.

3 CASO DE ESTUDO E METODOLOGIAS UTILIZADAS

A escolha das misturas utilizadas neste trabalho baseou-se no que é usualmente mais utilizado nos pavimentos rodoviários em Portugal. Assim, foram escolhidas duas misturas previamente formuladas, uma mistura aberta (PA 12,5 Surf) e uma mistura fechada (AC 14 Surf), para que se possa concluir sobre quais são as condições de ensaio que mais influenciam os resultados para cada tipo de mistura.

Para a realização dos ensaios foram realizados provetes de acordo com as normas EN 12697-35 e EN 12697-30.

Os ensaios de sensibilidade à água foram realizados de acordo com a norma que vigora nos países da União Europeia, EN 12697-12, bem como pela norma Militar Americana MIL-STD- 620A – Método 104.

3.1 Caracterização das misturas betuminosas utilizadas

As duas misturas betuminosas a utilizar diferem entre elas no volume de vazios. Os agregados utilizados em ambas as misturas são graníticos e o filer é calcário. O betume utilizado no estudo é um betume normalmente usado em Portugal, com penetração nominal de $35/50 \times 10^{-1}$ mm. Para não existir mais uma variável em estudo, optou-se por não se utilizar um betume modificado na mistura aberta.

Na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 pode-se observar a composição da mistura aberta e da mistura fechada tendo em conta os estudos realizados anteriormente por Costa *et al.* (2015b) e por Costa *et al.* (2015a).

Tabela 3.1 - Percentagem volumétrica dos agregados utilizados na mistura aberta

Fração 0/4	Fração 4/6	Fração 6/14	Fração 6/12,5	Filer
14,0%	20,0%	25,0%	40,0%	1,0%

Tabela 3.2 - Percentagem volumétrica dos agregados utilizados na mistura fechada

Fração 0,5/2	Fração 2/4	Fração 0/4	Fração 4/6	Fração 6/14	Fração 10/14	Filer
3,0%	8,0%	36,0%	11,0%	29,0%	10,5%	2,5%

Segundo os autores dos estudos de composição destas misturas, a percentagem de ligante a utilizar deverá ser de 5% para ambas as misturas.

3.2 Preparação dos provetes

3.2.1 Considerações iniciais

Os provetes a utilizar no estudo da sensibilidade à água, quer de acordo com a norma Europeia, quer de acordo com a norma militar americana, devem ser cilíndricos. No caso da norma EN 12697-12, o diâmetro dos provetes deve ser 100 ± 3 mm, porque a dimensão máxima do agregado das misturas não excede os 22 mm. Para a norma militar, os provetes devem ter um diâmetro de $101,6 \pm 0,1$ mm e 63,5 mm de altura.

3.2.2 Preparação da mistura

A preparação da mistura começa pela secagem dos agregados. Estes são colocados numa estufa, em quantidades superiores às necessárias, para que fiquem totalmente secos, uma vez que os agregados podem conter água e isso pode influenciar as dosagens das diferentes frações. Após a secagem total dos agregados, retiram-se da estufa e espera-se que arrefeçam, para se poderem começar a manusear. De seguida procede-se à pesagem das quantidades exatas que vão ser utilizadas para fazer a mistura betuminosa, voltando a colocar os agregados na estufa para estarem à temperatura ideal (que pode atingir os 180 °C), aquando a realização da mistura.

À temperatura ambiente, o betume não se encontra em estado líquido, como tal, para realizar a mistura é necessário aquecê-lo. Este processo é feito, colocando um recipiente com betume

na estufa, para o tornar trabalhável. Posteriormente, para que o betume fique a uma temperatura constante e consistência homogênea, foi utilizado um aparelho de aquecimento específico para recipientes cilíndricos, com uma resistência elétrica que envolve o recipiente, e um misturador de baixa rotação com uma hélice helicoidal colocada no interior do betume.

Todo o material que vai entrar em contacto com a mistura será colocado na estufa de modo a que quando utilizados, não levem a uma diminuição de temperatura da mistura betuminosa, afetando posteriormente a compactação. Assim, foram colocados na estufa os moldes, recipientes (onde se coloca a quantidade de mistura que vai constituir cada provete), uma espátula para espalhar a mistura no molde, o braço da misturadora, o balde da misturadora e as colheres para enchimento dos recipientes.

Deste modo, estão reunidas as condições necessárias para se dar início à realização da mistura. Coloca-se os agregados e o betume na misturadora, que procede ao envolvimento dos agregados pelo betume, e em cerca de 2 minutos está pronta a mistura. Segue-se o processo de compactação, conforme se descreve de seguida.

3.2.3 Compactação dos provetes

Realizada a mistura, colocam-se as quantidades previamente calculadas, para cada provete, dentro de recipientes apropriados, colocando-os novamente na estufa, de modo a não perderem temperatura. A quantidade da mistura é calculada com aproximadamente mais 2 kg para que se possa calcular a baridade máxima teórica (BMT), de acordo com a norma EN 12697-5. Após estes procedimentos é possível realizar a compactação dos provetes.

Retira-se um recipiente de cada vez e coloca-se a mistura no molde. Esta é espalhada com recurso a uma espátula, para que se possa dar início à compactação. De forma a evitar que a mistura adira ao compactador, deve-se colocar papel de filtro na base e no topo do molde.

A compactação dos provetes é efetuada com recurso a um compactador de impacto e a um pilão de compactação. O procedimento consiste em deixar cair o pilão a partir de uma determinada altura, com aplicação de 50 e 75 pancadas, respetivamente, para a mistura aberta e para a mistura fechada, de acordo com o caderno de encargos.

Após a compactação os provetes devem arrefecer para posterior desmoldagem. Posto isto, todos os provetes devem ser caracterizados, determinando a baridade aparente e altura de cada um deles, para posteriormente se agruparem de forma a que possam ser considerados representativos da mistura. Para tal, a altura média dos grupos não deve diferir em mais de 5 mm e a diferença entre baridade média de cada grupo deve ser inferior a 30 kg/m³.

3.2.4 Baridade máxima teórica (BMT)

A baridade máxima teórica (BMT), juntamente com a baridade aparente, são utilizadas para calcular a porosidade de uma mistura betuminosa compactada. Para a determinação da BMT, utilizaram-se os 2 kg extra de mistura, que não foi compactada, os quais são remexidos constantemente de forma a evitar a agregação dos materiais. Neste estudo foi necessária uma grande quantidade de provetes, pelo que foi preciso determinar mais do que uma BMT para cada mistura, visto que houve misturas produzidas em momentos diferentes, o que pode resultar no uso de agregados de lotes diferentes. Para determinar a BMT utilizou-se o procedimento experimental da norma EN 12697-5.

Procedimento volumétrico de ensaio

1. Pesar o picnómetro vazio com tampa (m_1), de volume conhecido (V_p);
2. Colocar a amostra seca dentro do picnómetro, à temperatura ambiente, e depois pesar novamente com a tampa (m_2);
3. Encher o picnómetro com água desionizada, até ao máximo de 30 mm abaixo da junta da tampa;
4. Evacuar o ar do interior do picnómetro, aplicando uma pressão de vácuo residual de 4 kPa, ou menos, durante (15 ± 1) minutos. A evacuação do ar deve ser auxiliada colocando o picnómetro numa mesa vibratória;
5. Colocar o picnómetro no banho-maria a uma temperatura conhecida (± 1 °C) (temperatura de ensaio) durante pelo menos 30 minutos, de modo a que o picnómetro e a amostra fiquem à temperatura da água do banho-maria. O nível da água do banho-maria deve estar aproximadamente 20 mm abaixo do topo do picnómetro;
6. Encher o picnómetro até à marca de referência na tampa com água desionizada. Essa água desionizada deve ser colocada à temperatura de ensaio, em banho-maria, antes de ser adicionada;

7. Retirar o picnómetro do banho-maria, secar a parte exterior e pesar imediatamente (m_3).

Procedimento de cálculo

A baridade máxima teórica da mistura betuminosa, determinada através do procedimento volumétrico, deverá ser calculada com aproximação a 1 kg/m^3 de acordo com a Equação 1:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times \left(V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w} \right)} \quad (1)$$

Em que:

ρ_{mv} – baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada pelo procedimento volumétrico (kg/m^3);

m_1 – massa do picnómetro vazio (g);

m_2 – massa do picnómetro mais amostra (g);

m_3 – massa do picnómetro mais amostra e água (g);

V_p – volume do picnómetro, cheio até à marca de referência (m^3);

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

3.2.5 Determinação da baridade aparente

Para determinar a baridade aparente recorreu-se à norma EN 12697-6, que define os métodos para determinação da massa volúmica de um provete betuminoso compactado. Os métodos de ensaio são aplicáveis à utilização de provetes compactados fabricados em laboratório ou de carotes retirados do pavimento após colocação e compactação.

Métodos de ensaio

A norma descreve quatro métodos, em que a escolha depende do volume de vazios estimado e da sua acessibilidade no provete.

- **Método A** – Baridade a seco (para provetes com superfície muito fechada);
 1. Determinação da massa do provete seco (m_1). No caso do ensaio de provetes húmidos, a etapa 1 deverá ser efetuada após as etapas 2 e 4.

2. Determinação da massa da água à temperatura de ensaio arredondada até $0,1 \text{ kg/m}^3$ (ρ_w), de acordo com o quadro 1 desta norma.
 3. Imersão do provete no banho de água a uma determinada temperatura de ensaio.
 4. Determinação da massa do provete imediatamente após a água ter estabilizado após a imersão (m_2).
- **Método B** – Baridade a provete saturado com superfície seca (para provetes com uma superfície fechada);
 1. Determinação da massa do provete seco (m_1). No caso do ensaio de provetes húmidos, a etapa 1 deverá ser efetuada após as etapas 2 e 6.
 2. Determinação da massa da água à temperatura de ensaio arredondada até $0,1 \text{ kg/m}^3$ (ρ_w), de acordo com o quadro 1 desta norma.
 3. Imersão do provete no banho de água a uma determinada temperatura de ensaio. Deixar a água saturar o provete durante um período de tempo suficiente até a massa do provete não sofrer alterações.
 4. Determinação da massa do provete saturado quando imerso (m_2), tomando as precauções necessárias para evitar a aderência de bolhas de ar à superfície do provete.
 5. Remoção do provete da água e secar as gotas da superfície.
 6. Determinação da massa do provete saturado com a superfície limpa ao ar, imediatamente após a secagem (m_3).
 - **Método C** – Baridade a provete selado (para provetes com uma superfície aberta ou grosseira);
 1. Determinação da massa do provete seco (m_1).
 2. Determinação da massa da água à temperatura de ensaio arredondada até $0,1 \text{ kg/m}^3$ (ρ_w), de acordo com o quadro 1 desta norma.
 3. Selar o provete de forma a evitar que a água penetre nos vazios internos do provete e que façam parte da composição do material volumétrico e por forma a evitar o aparecimento de vazios adicionais entre o selante e o provete ou nos vincos do selante.
 4. Determinação da massa do provete seco (m_2).
 5. Mergulhar o provete no banho de água conservado a uma determinada temperatura de ensaio.

6. Determinação da massa do provete selado debaixo de água (m_3), tomando as precauções necessárias para evitar a adesão de bolhas de ar ao selante durante a pesagem.
- **Método D** – Baridade por dimensões (para os provetes com formas geométricas, regulares, ou seja, prismas, cilindros, entre outros).
 1. Determinação das dimensões do provete em milímetros, em conformidade com a EN 12697-29.
 2. Determinação da massa do provete seco (m_1).

Para os primeiros três métodos, o volume do provete é obtido com base na massa ao ar e na sua massa em água. No método A, a massa em água é determinada sem tratamento prévio. No método com o provete saturado com superfície seca (método B), o provete é primeiramente saturado com água, e, em seguida, a sua superfície é seca. No método com o provete selado (método C), o provete é selado antes da sua imersão em água para evitar o acesso da mesma aos vazios do provete. No quarto método por dimensões (método D), o volume do provete é obtido a partir da medição das suas dimensões.

Para cada mistura utilizada foram utilizados dois métodos para a sua caracterização. Na mistura aberta, foram usados os métodos C e D e para a mistura fechada, recorreu-se aos métodos A e D. Para ambas as misturas, utilizou-se o procedimento de cálculo D, que apenas se baseia nas dimensões do provete. Para a mistura aberta utilizou-se também o procedimento C, uma vez que a mistura tem um volume de vazios elevado e é necessário selar o provete para impedir a entrada de água. Por sua vez, para a mistura fechada, para além do método D utilizou-se o método A, porque trata-se de uma mistura com um volume de vazios reduzido, o que faz com que a água não entre na mistura. Como se tratam de misturas diferentes, o único método que é possível utilizar para as caracterizar é o método D, que é o único que permite obter valores de baridade por análise dos mesmos parâmetros (dimensão e massa dos provetes). Verificou-se também que, o volume de vazios obtido pelo método D era mais próximo do volume de vazios esperado.

Os procedimentos de cálculo para cada um destes métodos são:

- **Método A:** A seco

Calcular a massa volúmica a seco do provete (ρ_{bdry}), arredondada até 1 kg/m³, através da Equação 2:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w \quad (2)$$

Onde:

ρ_{bdry} é a massa volúmica seca (kg/m³);

m_1 é a massa do provete seco (g);

m_2 é a massa do provete em água (g);

ρ_w é a massa da água à temperatura de ensaio (1 kg/m³).

- **Método B:** Provete saturado com superfície seca (SSS)

A baridade dos provetes de mistura betuminosa ρ_{bsss} deve ser calculada, com uma precisão de 1 kg/m³, de acordo com a Equação 3:

$$\rho_{bsss} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (3)$$

Onde:

ρ_{bsss} é a massa volúmica SSS (kg/m³);

m_1 é a massa do provete seco (g);

m_2 é a massa do provete em água (g);

m_3 é a massa do provete saturado com a superfície seca (g);

ρ_w é a massa da água à temperatura de ensaio (1 kg/m³).

- **Método C:** Provete selado

Calcular a massa volúmica do provete seco e selado (ρ_{bsea}), arredondada até 1 kg/m³, através da Equação 4:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\left(\frac{m_2 - m_3}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}\right)} \quad (4)$$

Onde:

$\rho_{b,sea}$ é a massa volúmica selada (kg/m³);

m_1 é a massa do provete seco (g);

m_2 é a massa do provete em água (g);

m_3 é a massa do provete selado em água (g);

ρ_w é a massa da água à temperatura de ensaio (1 kg/m³).

ρ_{sm} – densidade do material selante à temperatura de ensaio, com uma precisão de 10 kg/m³.

- **Método D:** Dimensões geométricas

Calcular a massa volúmica por dimensões de um provete cilíndrico ($\rho_{b,dim}$), arredondada até 1 kg/m³, com recurso à Equação 5:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad (5)$$

Onde:

$\rho_{b,dim}$ é a massa volúmica do provete geométrico (kg/m³);

m_1 é a massa do provete seco (g);

h é a altura do provete (mm);

d é a diâmetro do provete (mm).

3.3 Metodologias utilizadas no ensaio da sensibilidade à água

3.3.1 Ensaio segundo a Norma Europeia EN 12697-12 – Método A

A Norma Europeia EN 12697-12 preconiza três métodos de ensaio introduzidos em 2008. Até essa data apenas existia um método para avaliação da sensibilidade à água, baseado na resistência à tração indireta de provetes cilíndricos (método A). Em Portugal, sempre se utilizou este método, além disso, segundo Batista e Antunes (2009), o método A é também o mais utilizado a nível europeu. Por esses motivos foi esta a metodologia utilizada neste trabalho.

Em 2008, com a nova edição da norma ficaram disponíveis mais dois métodos de ensaio (B e C). Note-se que o método C não é aplicável às misturas betuminosas que são produzidas em Portugal. O método B baseia-se na resistência à compressão simples de provetes cilíndricos.

Método de ensaio

Segundo esta metodologia, são preparados dois conjuntos 3 de provetes, sendo que a sua dimensão é condicionada pela dimensão máxima do agregado. A dimensão do provete a utilizar para este método é de 100 ± 3 mm de diâmetro, uma vez que a dimensão máxima do agregado não excede os 22 mm. Os conjuntos são obtidos através das características dos provetes (altura e baridade médias), sendo estabelecidas diferenças máximas de 5 mm para a altura média e 30 kg/m^3 para as baridades médias. Antes do período de acondicionamento, os provetes devem ter um período de cura de 16 h a 24 h.

O primeiro grupo de provetes, designado por provetes “secos” ou sem condicionamento, é acondicionado ao ar a uma temperatura de 20 ± 5 °C.

O segundo grupo, designado por provetes “imersos” ou com condicionamento, é primeiramente submetido a vácuo em água, a 20 ± 5 °C, e mantido durante 30 ± 5 min a uma pressão absoluta de $6,7 \pm 0,3$ kPa, de forma a garantir que a água penetra de forma adequada nos poros dos provetes. De seguida, os provetes são novamente medidos com o intuito de verificar a sua variação de volume. Se a variação for superior a 2 %, então o provete está inapto para a realização do ensaio exigindo a preparação de um outro. Após esta verificação os provetes são acondicionados em banho-maria a 40 ± 1 °C, por um período de 68 h a 72 h.

Uma vez terminado o período de condicionamento, os provetes são sujeitos a ensaios para determinar a resistência à tração indireta (ITS), a uma temperatura de ensaio selecionada na gama de 5 °C a 25 °C. Existe uma nota na norma EN 12697-12 que recomenda a adoção de uma temperatura de ensaio de 25 °C, para se obter influência máxima da adesividade do ligante e para minimizar a influência dos agregados partidos na linha de rotura do provete. Observa-se, no entanto, que a norma EN 13108-20 aconselha uma temperatura de 15 °C para efeitos de ensaios tipo iniciais de misturas betuminosas abrangidas pela marcação CE (Batista e Antunes, 2009).

Os provetes “secos” devem ser colocados ao ar à temperatura de ensaio, enquanto os provetes “imersos” devem ser colocados num recipiente com água à mesma temperatura. Estas condições de acondicionamento devem ser mantidas por um período de pelo menos 2 h.

Por fim, os provetes são submetidos ao ensaio de tração indireta (Figura 3.1), após o qual se obtém o índice de resistência conservada em tração indireta (ITSR).



Figura 3.1 - Ensaio de tração indireta

A partir dos valores médios das resistências à tração indireta dos provetes com condicionamento (ITS_w) e sem condicionamento (ITS_d), é calculada a resistência conservada em tração indireta (ITSR) através da Equação 6:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} (\%) \quad (6)$$

3.3.2 Ensaio segundo a Norma Militar Americana MIL-STD-620A

Para que se possa comparar os resultados obtidos, foram utilizadas duas metodologias diferentes. Para além dos ensaios realizados de acordo com a Norma Europeia EN 12697-12 também se realizaram ensaios de sensibilidade à água com recurso à Norma Militar Americana MIL-STD-620A (1966), Método 104.

Em Portugal, antes de se adotar a norma Europeia, os ensaios de sensibilidade à água eram realizados por esta norma, que se baseia na comparação entre as forças de rotura de Marshall dos provetes condicionados e não condicionados.

Método de ensaio

Tal como na norma Europeia, na norma Militar também são formados dois grupos de provetes: provetes “secos” e provetes “imersos”, com características idênticas. No entanto, as dimensões, o tipo ensaio e as condições de condicionamento são diferentes. Os provetes devem ter 101,6 mm de diâmetro e aproximadamente 63,5 mm de altura. Caso a altura do provete seja diferente de 63,5 mm então a força de rotura deve ser ajustada multiplicando-a pelo fator de correção, de acordo com a Equação 7:

$$c = 5.2e^{-0,0258h} \text{ ou } c = 5.24e^{-0,0032v} \quad (7)$$

Onde:

c - é o fator de correção;

h - é a altura em milímetros (mm);

v - é o volume em mililitros (ml).

O grupo dos provetes “secos” é imerso em água durante cerca de 20 a 40 minutos, num banho-maria a uma temperatura de 60 °C. Os restantes três provetes são imersos em água durante 24 horas num banho-maria à mesma temperatura. Após o período de condicionamento os provetes são submetidos ao ensaio de compressão de Marshall (Figura 3.2) determinando-se assim a força de rotura e posteriormente o índice de resistência conservada.

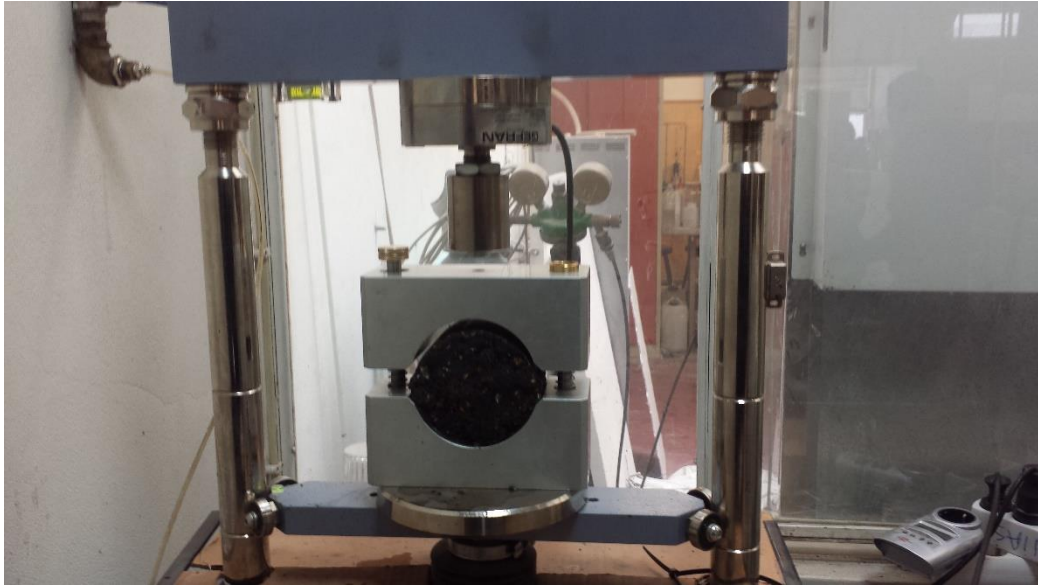


Figura 3.2 - Ensaio de compressão de Marshall

O índice de resistência conservada (IRC) é obtido recorrendo à Equação 8:

$$IRC = \frac{F_2}{F_1} \times 100 (\%) \quad (8)$$

Sendo:

F₁- Força de rotura média dos provetes sem condicionamento;

F₂- Força de rotura média dos provetes com condicionamento.

3.4 Condições de ensaio

O objetivo deste trabalho é verificar qual a influência que eventuais variações nas condições de ensaio podem ter nos resultados de sensibilidade à água de misturas betuminosas, pela norma Europeia. Assim apresentam-se de seguida as variáveis consideradas na realização dos processos de condicionamento e ensaio de diferentes provetes e misturas betuminosas. Para evitar combinações de diferentes efeitos, em cada ensaio realizado apenas se alterou uma condição, mantendo as restantes iguais às da referência usada em Portugal.

Pela norma Militar apenas foram realizados dois ensaios, um ensaio para os provetes sem condicionamento e outro para os provetes com condicionamento, apenas para obter um valor de resistência conservada e compará-lo com os resultados de referência obtidos, pela norma

Europeia. Por sua vez, pela norma Europeia, foram realizados 13 ensaios, dois deles foram ensaios de provetes “secos” (sem condicionamento), a duas temperaturas diferentes, 15 °C e 25 °C. Nos restantes 11 ensaios, os provetes foram sujeitos a condicionamento, sendo que em cada ensaio era alterada uma condição, em relação ao “ensaio padrão”.

Inicialmente foram definidas as condições de referência, de acordo com a norma Europeia, para que todos os outros ensaios realizados possam ser comparados e se possa verificar se a condição alterada tem influência nos resultados. Deste modo, o “ensaio padrão”, para os provetes sem condicionamento, foi realizado a 15 °C. Já para os provetes condicionados, as condições de referência utilizadas foram:

1. Aplicação de vácuo com água à temperatura de 20 °C;
2. Aplicação de vácuo à pressão de $6,5 \pm 0,1$ kPa;
3. Banho-maria à temperatura de 40 °C (72 h);
4. Ensaio de tração indireta à temperatura de 15 °C.

Mediante os resultados obtidos sob estas condições, foi possível comparar os valores de resistência conservada determinados com a realização dos ensaios com variação das condições de ensaio/acondicionamento.

Os resultados obtidos para o estudo dos provetes sem condicionamento dizem respeito a um único grupo de provetes. Contudo, para analisar a influência que diferentes lotes de agregados podem provocar nos resultados finais, realizou-se um novo “ensaio padrão”, apenas para a mistura fechada, com agregados de lotes distintos e assim aferir sobre a influência de diferentes tipos de agregados. Os provetes sem condicionamento realizados neste novo “ensaio padrão”, serviram também para determinar a influência do tempo de condicionamento, isto porque os provetes condicionados foram produzidos em conjunto.

O condicionamento dos provetes foi feito por 4 grupos, cada um deles referente a uma das condições acima referidas. Sempre que uma condição de um grupo é alterada os outros 3 grupos usam a condição de referência.

Deste modo, na Tabela 3.3, apresentam-se as condições sob as quais cada ensaio foi realizado. Note-se que o “ensaio padrão” foi realizado sob as condições de referência (1, 4, 9 e 13). Por sua vez, por exemplo, nos provetes do grupo 1, foi alterada a condição “Aplicação de vácuo

com água à temperatura de 20 °C”, o ensaio 1.A utilizou a temperatura da água a 15 °C e o 1.B utilizou a temperatura de 25 °C. Os grupos 2, 3 e 4, para essa condição, seguem a condição de referência.

Tabela 3.3 - Ensaio realizados

Ensaio	CONDIÇÕES DE ENSAIO													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Padrão	x			x					x				x	
1.A		x		x					x				x	
1.B			x	x					x				x	
2.A	x				x				x				x	
2.B	x					x			x				x	
2.C	x						x		x				x	
2.D	x							x	x				x	
3.A	x			x						x			x	
3.B	x			x							x		x	
3.C	x			x								x	x	
4.A	x			x					x					x

Onde as condições de ensaio são as seguintes:

- 1 - Aplicação de vácuo com água à temperatura de 20 °C (Referência utilizada);
- 2 - Aplicação de vácuo com água à temperatura de 15 °C;
- 3 - Aplicação de vácuo com água à temperatura de 25 °C;
- 4 - Aplicação de vácuo à pressão de $6,5 \pm 0,1$ kPa (Referência utilizada);
- 5 - Aplicação de vácuo à pressão de $6,7 \pm 0,1$ kPa;
- 6 - Aplicação de vácuo à pressão de $7,0 \pm 0,1$ kPa;
- 7 - Aplicação de vácuo, rampa instantânea;
- 8 - Aplicação de vácuo, rampa muito lenta;
- 9 - Banho-maria à temperatura de 40 °C, 72 h (Referência utilizada);
- 10 - Banho-maria à temperatura de 20 °C, 72 h;
- 11 - Banho-maria à temperatura de 60 °C, 72 h;
- 12 - Banho-maria à temperatura de 40 °C, 68 h;
- 13 - Ensaio de tração indireta à temperatura de 15 °C (Referência utilizada);
- 14 - Ensaio de tração indireta à temperatura de 25 °C.

A temperatura da água utilizada aquando a aplicação de vácuo apresenta 3 valores distintos, 15 °C, 20 °C e 25 °C, sendo que a temperatura de 20 °C é a de referência.

A norma Europeia recomenda que a entrada de vácuo seja feita gradualmente para não danificar os provetes. Analogamente, a saída também deve ser gradual. Portanto, neste estudo, nos primeiros 10 minutos é feita a redução gradual (Rampa de Entrada) desde a pressão atmosférica (aproximadamente 100 kPa) até à pressão de referência ($6,5 \pm 0,1$ kPa). Esta pressão é mantida por 30 minutos (Patamar). De seguida, num intervalo de 5 minutos, a pressão começa a ser retirada de forma gradual para voltar à pressão atmosférica (Rampa de

Saída). Na Figura 3.3, é possível observar graficamente as rampas de aplicação de vácuo no ensaio de referência.

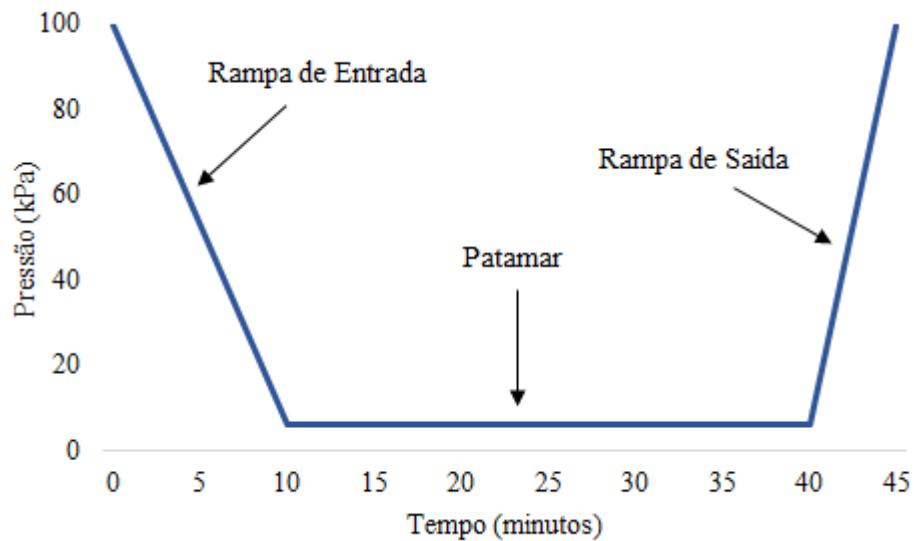


Figura 3.3 - Condições de aplicação de vácuo no ensaio de referência

Este procedimento foi o utilizado para o caso de referência (com a condição de ensaio nº 4). No entanto, foram aplicados mais quatro tipos de condições de vácuo diferentes:

- As condições 5 e 6, muito semelhantes à condição 4, apresentam diferença na pressão no “Patamar”. A pressão utilizada foi $6,7 \pm 0,1$ kPa e $7,0 \pm 0,1$ kPa, respetivamente, em substituição da pressão de $6,5 \pm 0,1$ kPa (referência).
- No caso da condição de ensaio 7, o vácuo foi introduzido e retirado instantaneamente, ou seja, foram eliminadas as rampas de entrada e saída. Na Figura 3.4, é possível observar a única rampa de vácuo. As rampas de entrada e saída existem, contudo são quase verticais, pelo que a queda pressão é súbita, bem como o retorno à pressão atmosférica. O sistema de vácuo ajusta o mais rapidamente possível a pressão desejada, tanto na entrada com na saída de vácuo.
- Para a última condição de vácuo, condição 8, a aplicação do vácuo é feita de forma mais lenta. Por isso, voltam a existir as 3 rampas a entrada de vácuo: a “Rampa de Entrada” é realizada em 30 minutos, em vez dos 10 minutos da condição de referência; a “Rampa de Saída” passa a ser aplicada em 15 minutos, em vez dos 5 minutos anteriormente aplicados (Figura 3.5).

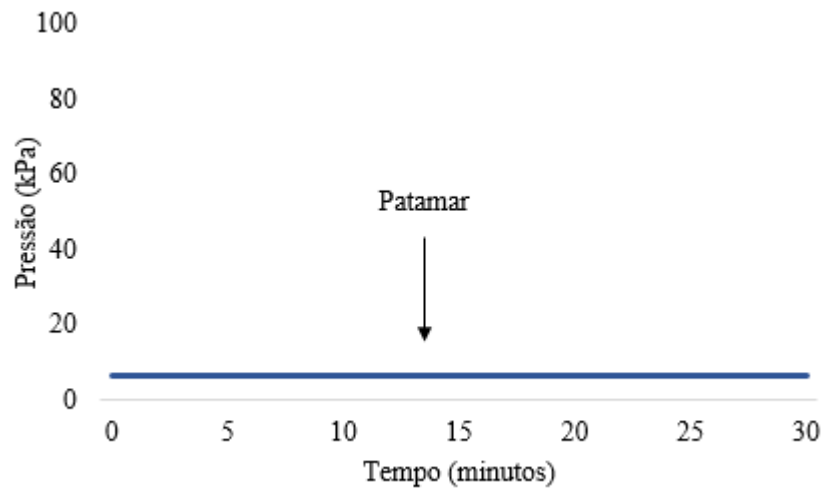


Figura 3.4 - Aplicação de vácuo na condição 7

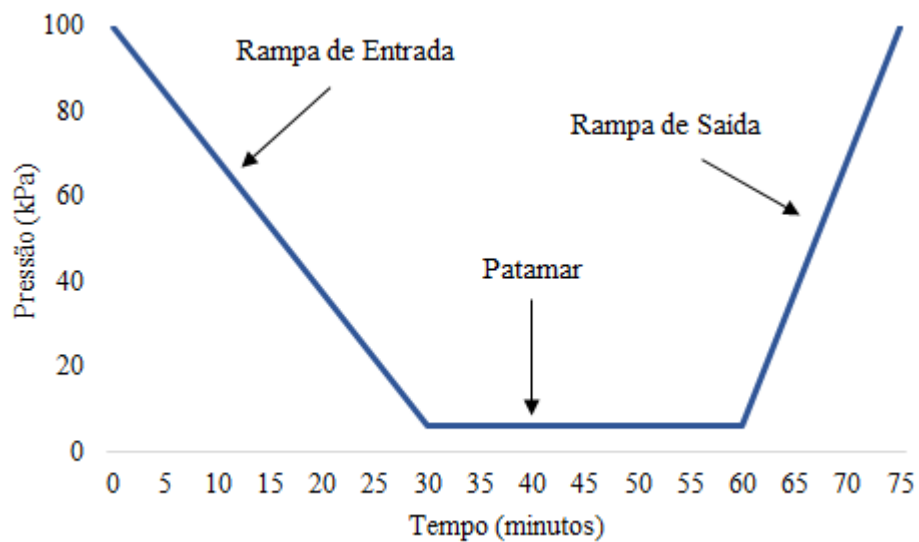


Figura 3.5 - Aplicação de vácuo na condição 8

Em relação ao condicionamento em banho-maria, partindo da temperatura de referência de 40 °C, foram feitos ensaios para determinar de que forma a alteração da temperatura do banho influencia os resultados de sensibilidade à água. Assim sendo, foram usadas temperaturas abaixo e acima da temperatura de referência, nomeadamente, 20 °C e 60 °C. Neste grupo de ensaios, foi ainda testada a variação do tempo em que os provetes estão no banho-maria, ou seja, em vez das habituais 72 horas reduziu-se o tempo em água para 68 horas (valor mínimo exigido pela norma de ensaio), usando a temperatura de referência, 40 °C.

Por fim, foi realizado um ensaio de resistência à tração indireta a 25 °C, em vez dos 15 °C da condição de referência. Para este ensaio é necessário que se faça o estudo em provetes com condicionamento e também para os provetes “secos”. Como os provetes sem condicionamento do “ensaio padrão” foram ensaiados à tração indireta a 15 °C, para as novas condições de ensaio, e para o cálculo ITSR, teve que se fazer um novo ensaio a 25 °C para esse grupo de provetes.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de sensibilidade à água realizados, para duas misturas betuminosas: PA 12,5 (mistura aberta) e AC 14 (mistura fechada). Pretende-se determinar quais as variações das condições de ensaio da norma Europeia que mais influenciam os resultados da resistência conservada das misturas. Também é realizado o ensaio pela norma Militar, com objetivo de concluir se o método de ensaio tem influência nos resultados.

4.1 Resultados obtidos nas condições de referência

Na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados obtidos para o “ensaio padrão”, das misturas aberta e mistura fechada, respetivamente. Como o objetivo é apurar se a condição modificada influenciou o resultado final, então é imprescindível comparar os resultados com o valor do “padrão”, isto é, com os valores obtidos sob as condições de referência.

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água obtidos no ensaio padrão para a mistura aberta.

Grandeza	Provetes sem condicionamento	Provetes com condicionamento	Diferenças
Baridade (kg/m ³)	2139	2145	6
Volume de vazios (%)	13,3	13,0	0,3
Altura (cm)	6,117	6,137	0,020
Temp. Compactação (°C)	142	146	4
ITS (kPa)	1574,8	1077,7	497,1
ITSR	68%		

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água obtidos no ensaio padrão para a mistura fechada.

Grandeza	Provetes sem condicionamento	Provetes com condicionamento	Diferenças
Baridade (kg/m ³)	2346	2352	6
Volume de vazios (%)	5,3	5,1	0,2
Altura (cm)	6,253	6,263	0,010
Temp. Compactação (°C)	144	147	3
ITS (kPa)	2602,03	2293,60	308,43
ITSR	88%		

Em termos globais, verifica-se que os valores de ITSR obtidos são de 68 % para a mistura aberta e 88 % para a mistura fechada. A porosidade das misturas em estudo foi a única condição que as distinguiu, pois na sua concepção foram usados o mesmo tipo e teor de betume e o mesmo tipo de agregados. Então, como as misturas com maior porosidade estão mais suscetíveis à ação da água, os valores de ITSR determinados correspondem ao esperado.

4.2 Influência da utilização de agregados provenientes de lotes diferentes

Para analisar a influência da utilização de diferentes lotes de agregados, realizou-se um novo “ensaio-padrão” para a mistura fechada. Na Tabela 4.3 encontram-se as características dos provetes assim como o cálculo do ITSR.

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água obtidos no ensaio padrão II para a mistura fechada.

Grandeza	Provetes sem condicionamento	Provetes com condicionamento	Diferenças
Baridade (kg/m ³)	2313	2312	1
Volume de vazios (%)	5,3	5,2	0,1
Altura (cm)	6,390	6,377	0,013
Temp. Compactação (°C)	138	140	2
ITS (kPa)	1949,2	1586,5	362,7
ITSR	81%		

Através da análise da Tabela 4.2 e da Tabela 4.3, é possível verificar que os resultados de ITS da nova mistura padrão são muito inferiores aos obtidos para a primeira mistura, para além de que apresentam uma diferença de ITSR entre elas de 7 %. Portanto, os lotes de agregados utilizados pode ter influência no valor de resistência conservada, isto é, esta alteração faz com que os provetes apresentem diferentes características, nomeadamente na altura e na baridade aparente. De qualquer modo é importante salientar que uma mistura feita em dias diferentes e com amassaduras diferentes podem levar a resultados distintos.

4.3 Influência da temperatura da água aquando a aplicação de vácuo

Na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5 são apresentadas, respetivamente, para a mistura aberta e para a mistura fechada, as características dos provetes assim como os resultados dos ensaios de sensibilidade à água, durante os quais se fez variar a temperatura da água aquando da aplicação de vácuo, tendo-se utilizado os valores de 15 °C e 25 °C, para se poder comparar depois com os resultados do ensaio padrão, no qual a água é mantida a 20 °C. As seguintes tabelas apenas apresentam os valores dos provetes condicionados e o valor final de ITSR, pois os valores dos provetes sem condicionamento já foram apresentados anteriormente, na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 para a mistura aberta e fechada, respetivamente. Também, apresentam as diferenças entre os valores médios, em valor absoluto, que existem entre os provetes sem condicionamento e com condicionamento.

Tabela 4.4 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração da temperatura da água aquando a aplicação de vácuo (mistura aberta)

Condição Variada	Grandeza	Provetes com condicionamento	Diferenças
Aplicação de vácuo 15°C	Baridade (kg/m ³)	2141	2
	Volume de vazios (%)	13,2	0,1
	Altura (cm)	6,117	0
	Temp. Compactação (°C)	142	0,33
	ITS (kPa)	1087,8	487
	ITSR	69%	
Aplicação de vácuo 25°C	Baridade (kg/m ³)	2140	1
	Volume de vazios (%)	13,2	0,1
	Altura (cm)	6,147	0,03
	Temp. Compactação (°C)	149	7,33
	ITS (kPa)	1011,5	563,3
	ITSR	64%	

Tabela 4.5 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração da temperatura da água aquando a aplicação de vácuo (mistura fechada)

Condição Variada	Grandeza	Provetes com condicionamento	Diferenças
Aplicação de vácuo 15°C	Baridade (kg/m ³)	2341	5
	Volume de vazios (%)	5,5	0,2
	Altura (cm)	6,267	0,014
	Temp. Compactação (°C)	145	1,33
	ITS (kPa)	2356,8	245,23
	ITSR	91%	
Aplicação de vácuo 25°C	Baridade (kg/m ³)	2344	2
	Volume de vazios (%)	5,4	0,1
	Altura (cm)	6,257	0,004
	Temp. Compactação (°C)	145,33	1,66
	ITS (kPa)	2135,6	466,43
	ITSR	82%	

Na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5, pode-se observar as principais características dos provetes e respectivos valores de ensaios de ITSR. Também se deve ter em conta que as diferenças das características entre os provetes sem condicionamento e condicionados são relativamente pequenas, o que torna os resultados mais representativos.

Para apurar qual a influência da condição variada no valor de ITSR, agrupou-se os valores do mesmo num gráfico para as misturas aberta e fechada (Figura 4.1).

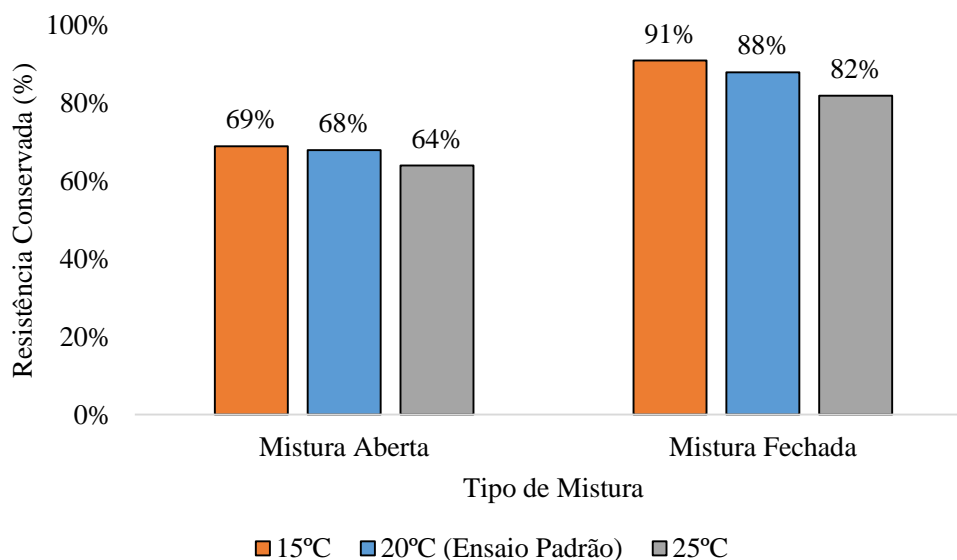


Figura 4.1 - Variação da temperatura aquando a aplicação de vácuo

Na Figura 4.1 é possível analisar os resultados de ITSR obtidos pela variação da temperatura da água aquando a aplicação de vácuo. Para ambas as misturas, no ensaio com a temperatura da água a 15 °C, os valores de ITSR aumentam ligeiramente, contrastando com o ensaio em que a temperatura utilizada foi de 25°C. Nesse ensaio, os valores de ITSR são inferiores ao do ensaio padrão. Assim, pode-se concluir que com maiores temperaturas a resistência dos provetes é menor, ou seja, o aumento da temperatura da água provoca um aumento energético nas partículas, aumentando o seu movimento e conseqüente alteração da estrutura dos provetes. O dano também é maior, com o aumento da temperatura, uma vez que a viscosidade diminui facilitando a difusão da água nas ligações betume/agregado.

4.4 Influência das condições de aplicação de vácuo

Para avaliar o impacto da variação das condições de aplicação de vácuo foram realizados 4 ensaios distintos. Dois desses ensaios consistiram na alteração do valor mínimo de pressão (correspondente ao patamar) e nos outros dois a alteração foi feita ao nível da duração das rampas de entrada e saída, utilizando no patamar a pressão de referência definida inicialmente.

Na Tabela 4.6 e Tabela 4.7, estão presentes as principais características dos provetes e os resultados obtidos. Para melhor compreensão os resultados são apresentados divididos em dois gráficos (Figura 4.2 e Figura 4.3).

Tabela 4.6 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração das condições de aplicação de vácuo (mistura aberta)

Condição Variada	Grandeza	Provetes com condicionamento	Diferenças
Vácuo a 6,7 kPa	Baridade (kg/m ³)	2146	7
	Volume de vazios (%)	13	0,3
	Altura (cm)	6,13	0,013
	Temp. Compactação (°C)	147	5,33
	ITS (kPa)	949	626,8
	ITSR	60%	
Vácuo a 7,0 kPa	Baridade (kg/m ³)	2141	2
	Volume de vazios (%)	13,2	0,1
	Altura (cm)	6,13	0,013
	Temp. Compactação (°C)	140,67	1
	ITS (kPa)	892,3	682,5
	ITSR	57%	
Vácuo aplicado instantaneamente	Baridade (kg/m ³)	2161	22
	Volume de vazios (%)	11,8	1,5
	Altura (cm)	6,09	0,027
	Temp. Compactação (°C)	144	2,33
	ITS (kPa)	1037,2	537,6
	ITSR	66%	
Vácuo aplicado lentamente	Baridade (kg/m ³)	2151	12
	Volume de vazios (%)	12,2	1,1
	Altura (cm)	6,083	0,034
	Temp. Compactação (°C)	152	10,33
	ITS (kPa)	1104,2	470,6
	ITSR	70%	

Tabela 4.7 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração das condições de aplicação de vácuo (mistura fechada)

Condição Variada	Grandeza	Provetes com condicionamento	Diferenças
Vácuo a 6,7 kPa	Baridade (kg/m ³)	2352	6
	Volume de vazios (%)	5,1	0,2
	Altura (cm)	6,27	0,017
	Temp. Compactação (°C)	150	6,33
	ITS (kPa)	2117,3	484,73
	ITSR	81%	
Vácuo a 7,0 kPa	Baridade (kg/m ³)	2351	5
	Volume de vazios (%)	5,2	0,1
	Altura (cm)	6,263	0,01
	Temp. Compactação (°C)	147,67	4
	ITS (kPa)	2158,3	443,73
	ITSR	83%	
Vácuo aplicado instantaneamente	Baridade (kg/m ³)	2300	46
	Volume de vazios (%)	5,1	0,2
	Altura (cm)	6,42	0,167
	Temp. Compactação (°C)	147,67	4
	ITS (kPa)	2054,1	547,93
	ITSR	79%	
Vácuo aplicado lentamente	Baridade (kg/m ³)	2298	48
	Volume de vazios (%)	5,2	0,1
	Altura (cm)	6,43	0,177
	Temp. Compactação (°C)	146,67	3
	ITS (kPa)	1952,6	649,43
	ITSR	75%	

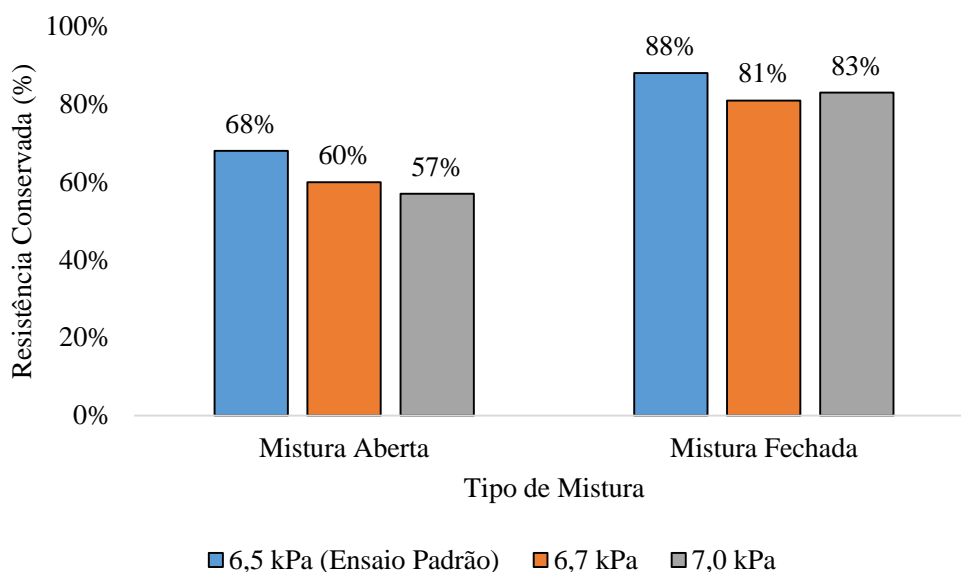


Figura 4.2 - Variação da aplicação de vácuo (Patamar)

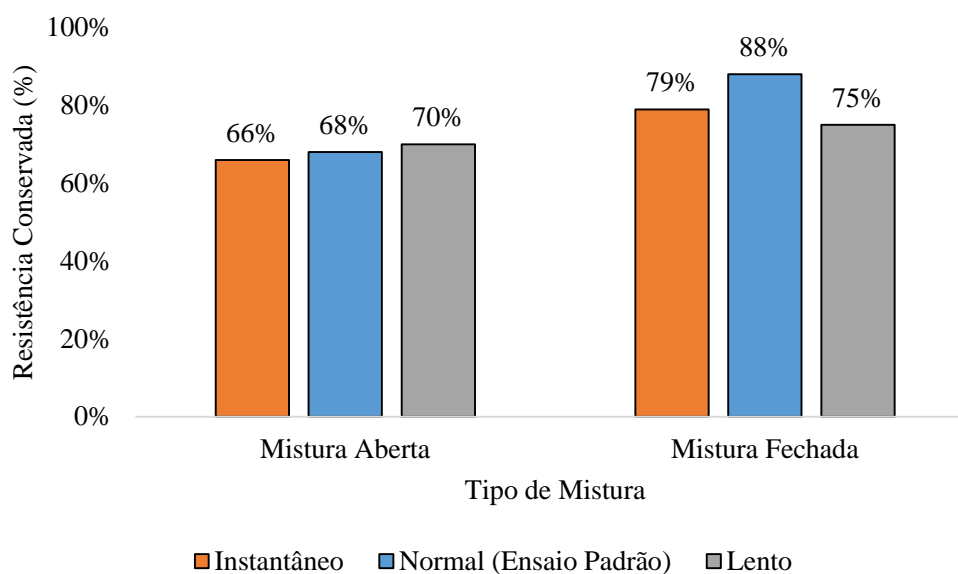


Figura 4.3 - Variação da aplicação de vácuo (Rampas)

No que diz respeito à variação da pressão no “Patamar” (Figura 4.2) é possível concluir que com o aumento da pressão, ambas as misturas tendem a apresentar valores mais baixos de ITSR. Para a mistura aberta, o ensaio que apresenta melhor valor de resistência conservada é aquele onde é aplicado mais vácuo (menor pressão), isto porque os vazios da mistura tendem a diminuir, ficando os agregados mais comprimidos, o que poderá melhorar a ligação entre os agregados e o betume. No caso da mistura fechada, a redução do valor de ITSR com o

aumento da pressão não é tão notória, o que se pode explicar pelo menor volume de vazios dessa mistura que diminui a sua suscetibilidade à ação da água.

Na Figura 4.3, onde se representaram os resultados obtidos para a variação das “Rampas” de aplicação de vácuo, verifica-se que a aplicação de vácuo de forma instantânea apresenta piores valores de ITSR para ambas as misturas, em comparação com os valores de referência. Este comportamento pode-se justificar pela aplicação brusca de vácuo, ou seja, o aumento abrupto de pressão poderá levar à danificação da estrutura dos provetes.

O comportamento acima referido é válido ainda quando se avalia os resultados relativos à menor velocidade de aplicação de vácuo na mistura aberta. No entanto, para a mistura fechada os resultados não são totalmente esclarecedores. Pela análise da Tabela 4.7 verifica-se que não foi possível obter grupos de provetes com valores de baridade e de altura médias cujas diferenças se situassem dentro dos limites aconselhados pela norma, nomeadamente, diferenças médias de baridade superiores a 30 kg/m³ e de altura média superiores a 5 mm. Assim, não é seguro tirar conclusões inequívocas com base nestes resultados.

4.5 Influência da temperatura e duração do condicionamento

Relativamente à variação da temperatura e do tempo de condicionamento em banho-maria nos ensaios de sensibilidade à água, utilizaram-se duas temperaturas e uma duração diferentes das condições de referência. Na Tabela 4.8 estão representadas as principais características dos provetes da mistura aberta e respetivos resultados obtidos. Nessa mesma tabela observam-se as características referentes aos ensaios da variação da temperatura e de duração.

As características e os resultados obtidos para os provetes da mistura fechada apresentam-se na Tabela 4.9. Nela encontram-se os resultados relativos à variação da temperatura e tempo de condicionamento. Por sua vez, para a análise da variação do tempo de permanência no banho-maria, os provetes sem condicionamento utilizados para obter o valor de ITSR, assim como o termo de comparação, designado por “ensaio padrão II”, foram os resultados provenientes dos ensaios realizados pelo segundo lote de agregados utilizado, apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.8 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração da temperatura e duração do condicionamento (mistura aberta)

Condição Variada	Grandeza	Provetes com condicionamento	Diferenças
Banho-maria 20°C	Baridade (kg/m ³)	2145	6
	Volume de vazios (%)	13	0,3
	Altura (cm)	6,13	0,013
	Temp. Compactação (°C)	139,67	2
	ITS (kPa)	1270,4	304,4
	ITSR	81%	
Banho-maria 60°C	Baridade (kg/m ³)	2145	6
	Volume de vazios (%)	13	0,3
	Altura (cm)	6,133	0,016
	Temp. Compactação (°C)	142,67	1
	ITS (kPa)	613,6	961,2
	ITSR	39%	
Banho-maria - 68 horas	Baridade (kg/m ³)	2156	17
	Volume de vazios (%)	12	1,3
	Altura (cm)	6,09	0,027
	Temp. Compactação (°C)	146,33	4,66
	ITS (kPa)	1077,6	497,2
	ITSR	68%	

Tabela 4.9 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para a alteração da temperatura de condicionamento (mistura fechada)

Condição Variada	Grandeza	Provetes com condicionamento	Diferenças
Banho-maria 20°C	Baridade (kg/m ³)	2347	1
	Volume de vazios (%)	5,3	0
	Altura (cm)	6,28	0,027
	Temp. Compactação (°C)	142,33	1,34
	ITS (kPa)	2383	219,03
	ITSR	92%	
Banho-maria 60°C	Baridade (kg/m ³)	2346	0
	Volume de vazios (%)	5,4	0,1
	Altura (cm)	6,253	0
	Temp. Compactação (°C)	146,67	3
	ITS (kPa)	1820,7	781,33
	ITSR	70%	
Banho-maria - 68 horas	Baridade (kg/m ³)	2312	1
	Volume de vazios (%)	5,2	0,1
	Altura (cm)	6,38	0,01
	Temp. Compactação (°C)	139,33	1,33
	ITS (kPa)	1575,1	374,1
	ITSR	81%	

Para uma melhor visualização da tendência de variação dos valores de ITSR com a temperatura e a duração do condicionamento foram elaborados os gráficos da Figura 4.4 e da Figura 4.5, respetivamente.

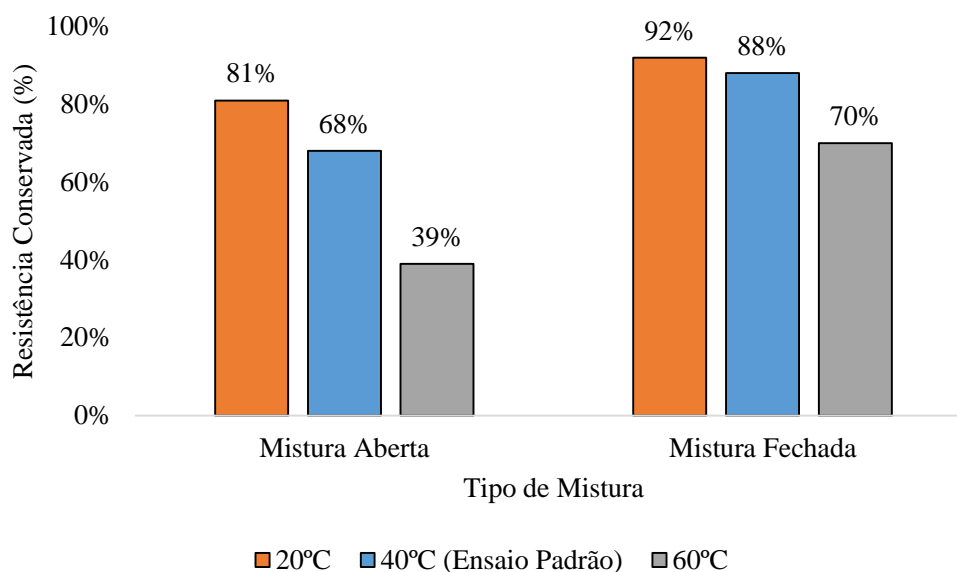


Figura 4.4 - Efeito da variação da temperatura do condicionamento

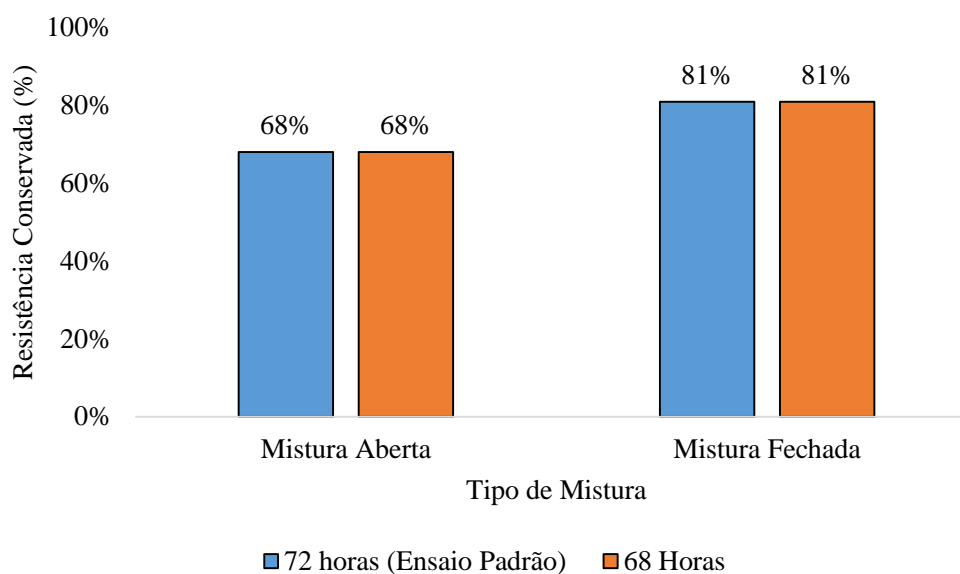


Figura 4.5 - Efeito da variação da duração do condicionamento

Em relação à temperatura do banho-maria (Figura 4.4) é possível concluir que quanto maior for a temperatura, menores são os valores de ITSR. Para as temperaturas de ensaio utilizadas para ambas as misturas (20 °C, 40 °C e 60 °C), os resultados permitem concluir com bastante segurança que para maiores valores de temperatura da água os valores de resistência conservada são piores. Esta situação, assim como no estudo da variação da temperatura da água quando a aplicação de vácuo, poderá dever-se a um aumento energético das partículas da água, facilitando o movimento das mesmas e, conseqüentemente, a sua ação de “lavagem”

dos agregados, comprometendo a estabilidade dos provetes. O aumento de temperatura provoca um amolecimento no betume, tornando a mistura menos rígida, tornando-a menos resistente.

Em relação à duração do condicionamento (Figura 4.5) apurou-se que, tanto para a mistura aberta como para a fechada, os provetes apresentam globalmente os mesmos valores de ITSR estando 68 ou 72 horas dentro do banho-maria, demonstrando assim que os limites de tempo definidos na norma dão origem a resultados de sensibilidade à água semelhantes. Como este parâmetro não altera os resultados finais, para uma otimização temporal do processo poder-se-á optar pela realização do ensaio em 68 horas.

4.6 Influência da temperatura do ensaio de tração indireta

Por fim a última alteração feita foi a variação da temperatura do ensaio de tração de indireta de 15 °C (temperatura especificada na norma EN 13108-20) para 25 °C (temperatura sugerida na norma EN 12697-12 para obter a máxima influência da adesão do betume e para minimizar a influência dos agregados partidos na linha de rotura do provete). Na Tabela 4.10 são apresentados os resultados do ensaio de tração indireta a 25 °C para ambas as misturas.

Tabela 4.10 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos para uma temperatura do ensaio de tração indireta de 25 °C

Condição Variada	Grandeza	Provetes sem condicionamento	Provetes com condicionamento	Diferenças
<u>Mistura Aberta</u>	Baridade (kg/m ³)	2145	2143	2
	Volume de vazios (%)	13	13,1	0,1
	Altura (cm)	6,137	6,137	0
Tração indireta a 25 °C	Temp. Compactação (°C)	146,67	143,67	3
	ITS (kPa)	844,5	566,2	278,3
	ITSR	67%		
<u>Mistura Fechada</u>	Baridade (kg/m ³)	2347	2348	1
	Volume de vazios (%)	5,3	5,3	0
	Altura (cm)	6,260	6,277	0,017
Tração indireta a 25 °C	Temp. Compactação (°C)	150,00	147,33	2,67
	ITS (kPa)	1346,1	1219,6	126,5
	ITSR	91%		

Na Figura 4.6 é possível observar como a resistência conservada varia em função da temperatura de ensaio.

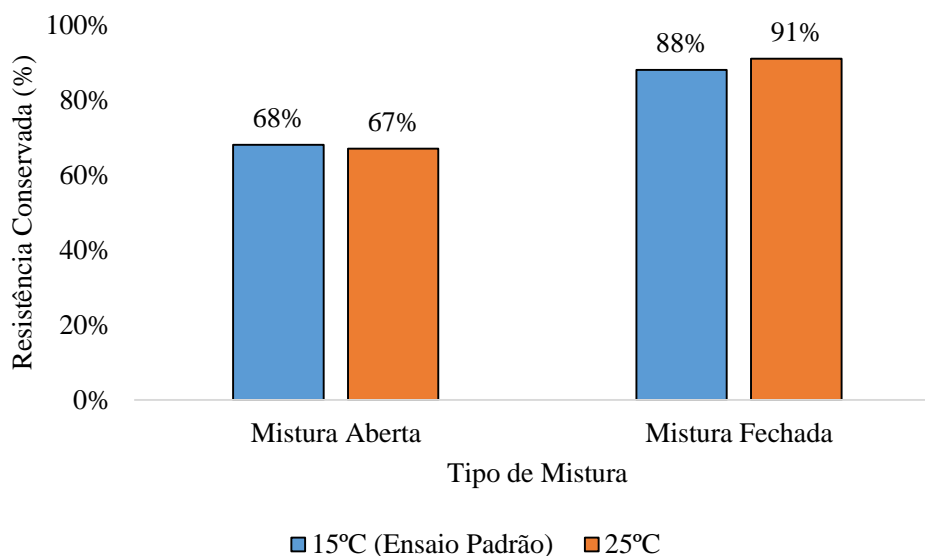


Figura 4.6 - Efeito da variação da temperatura do ensaio de tração indireta

Como o valor da diferença entre as características dos provetes, tanto para a mistura aberta, como para a mistura fechada, é baixo pode-se inferir que os resultados de ITSR obtidos não foram influenciados por uma má seleção dos provetes que constituem cada grupo (Tabela 4.10).

Por fim a Figura 4.6 mostra que, realizando o ensaio de tração indireta a 25 °C, os valores de resistência conservada são muito similares quando comparados com o ensaio realizado a 15 °C. Para a mistura aberta, os dois ensaios, deram praticamente o mesmo valor de resistência conservada, enquanto para a mistura fechada o resultado foi cerca de 3 pontos percentuais superior, acreditando-se assim que esta condição não tem uma grande influência nos resultados finais. Outra conclusão a retirar com a variação da temperatura de ensaio é, que os valores de ITS apresentados para o ensaio realizado a 25 °C, são muito inferiores comparando com os valores do ensaio realizado a 15 °C. Estas conclusões estão de acordo com os resultados obtidos por Pereira (2009), num estudo semelhante em que também testou estas duas temperaturas de ensaio pela a norma Europeia.

4.7 Resultados obtidos de acordo com a Norma Militar Americana

Para avaliar o impacto que o método de ensaio tem nos resultados utilizou-se a norma Militar. Na Tabela 4.11 encontram-se os resultados obtidos para as misturas aberta e fechada.

Tabela 4.11 - Características dos provetes e resultados dos ensaios de sensibilidade à água, obtidos pela norma Militar

Tipo de Ensaio	Grandeza	Provetes sem condicionamento	Provetes com condicionamento	Diferenças
<u>Mistura Aberta</u>	Baridade (kg/m ³)	2143	2161	18
	Volume de vazios (%)	11,8	13,1	1,3
	Altura (cm)	6,133	6,07	0,063
Norma Militar	Temp. Compactação (°C)	154,33	143,67	10,66
	Força de Rotura (kN)	12,71	9,24	3,47
	IRC	73%		
<u>Mistura Fechada</u>	Baridade (kg/m ³)	2259	2263	4
	Volume de vazios (%)	7,5	7,3	0,2
	Altura (cm)	6,503	6,497	0,006
Norma Militar	Temp. Compactação (°C)	140	138,67	1,33
	Força de Rotura (kN)	15,35	13,84	1,51
	IRC	90%		

A Figura 4.7 apresenta os resultados dos ensaios nas condições de referência, para a norma Europeia e para a norma Militar.

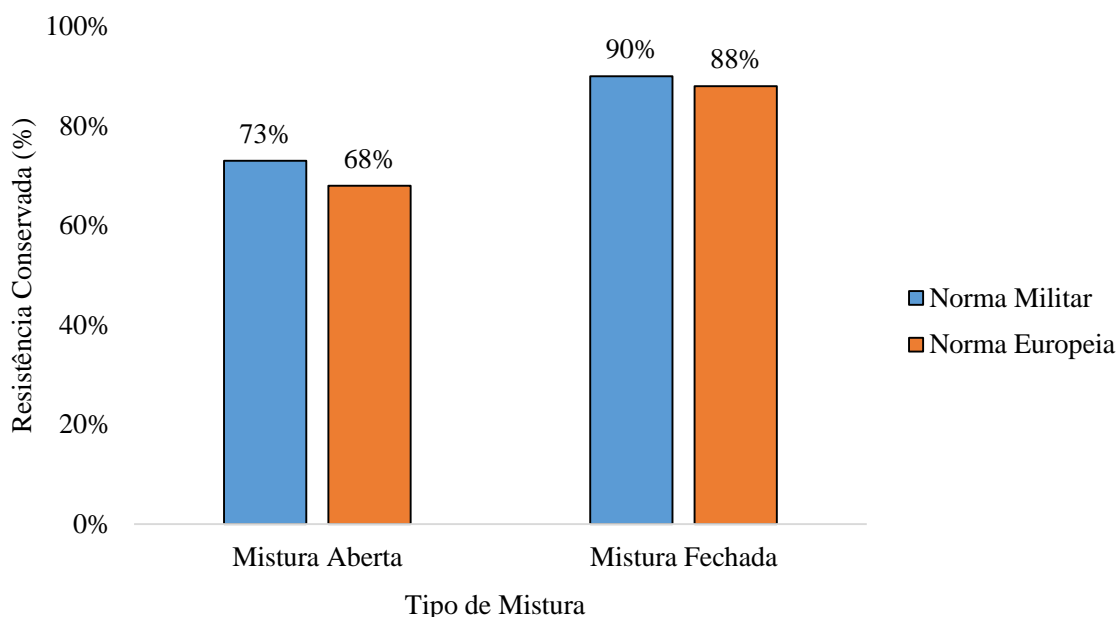


Figura 4.7 - Norma Militar vs Norma Europeia

A partir da Figura 4.7 é possível constatar que a norma Militar apresenta resultados de resistência conservada ligeiramente melhores do que os da norma Europeia, quer para a mistura aberta quer para a fechada, tal como obtido nos estudos realizados por Batista *et al.* (2011) e Pereira (2009) que concluíram esta mesma tendência. Ao longo deste estudo, observou-se que a metodologia da norma Militar é menos agressiva, pois expõe os provetes a condições menos desfavoráveis comparativamente à norma Europeia.

4.8 Resultados complementares

Com a diversidade de ensaios que foram realizados pela norma Europeia foi possível obter alguns resultados complementares. Após a aplicação do vácuo, segundo a norma Europeia, os provetes devem ficar submersos em água por um período de 30 ± 5 minutos. No fim desse tempo, os provetes voltam a ser pesados e é possível determinar a massa de água que eles absorvem. Posto isto, observou-se uma tendência já esperada (Figura 4.8), onde os provetes com maior volume de vazios apresentam maiores quantidades de água absorvida, ou seja, quanto maior é o volume de vazios maior é a influência da água nas misturas.

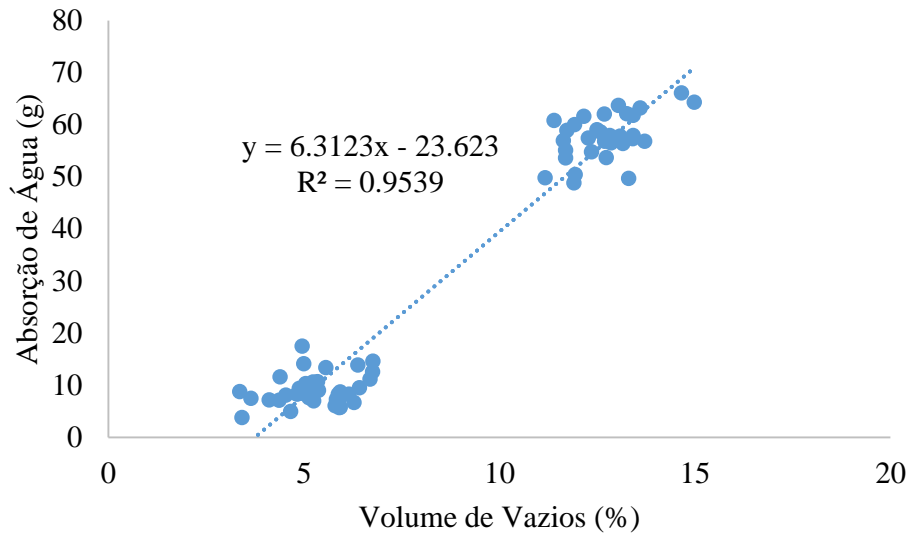


Figura 4.8 – Absorção de Água vs Volume de Vazios

A relação entre o ITS e o volume de vazios, é outra tendência possível de se verificar. A Figura 4.9, mostra que provetes com menor volume de vazios tendem a apresentar melhores valores de ITS.

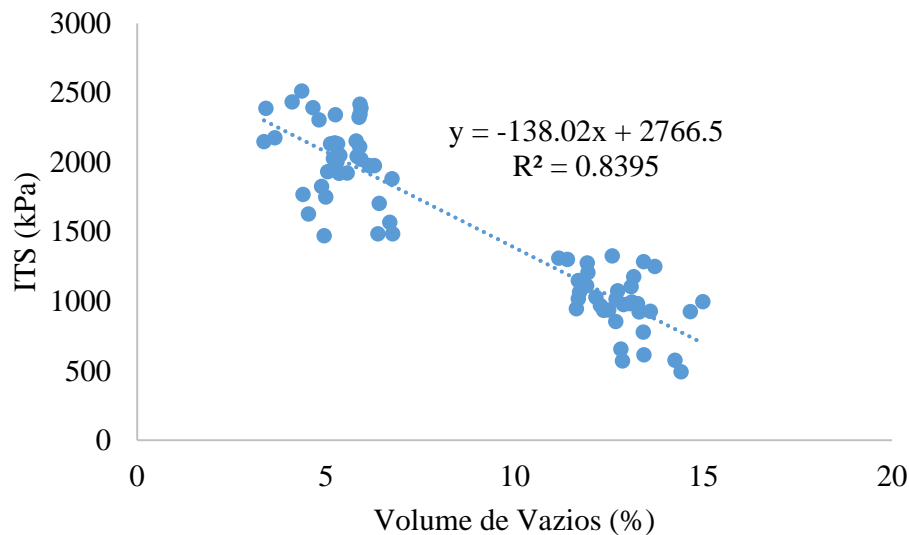


Figura 4.9 – ITS vs Volume de Vazios

Por conseguinte, os provetes que absorvem menor quantidade de água, logo menos sujeitos à ação da mesma, apresentam um força de tração indireta (ITS) maior.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

5.1 Conclusões

Este estudo consistiu em analisar a influência que a uma variação das condições de ensaio pode ter nos resultados de sensibilidade à água de misturas betuminosas, realizados de acordo com a norma Europeia EN 12697-12 – Método A. Também, se analisou a influência dos resultados usando agregados de lotes diferentes, assim como, a sensibilidade à água das misturas pela norma Militar, com o objetivo de comparar o resultado dos dois métodos de ensaio. Neste trabalho foram produzidas e avaliadas em laboratório dois tipos de misturas betuminosas, normalmente aplicadas em camadas de desgaste, uma mistura aberta (PA 12,5) e uma mistura fechada (AC 14).

Com a análise dos resultados obtidos considera-se que foram atingidos os objetivos inicialmente propostos, tendo-se concluído que:

- Ensaios realizados nas mesmas condições de ensaios apresentaram uma variação de 7 %, onde a mudança do lote dos agregados foi a única diferença que poderá ser considerada significativa, para além de as misturas terem sido produzidas em dias diferentes;
- O aumento da temperatura da água aquando a aplicação do vácuo influencia negativamente os resultados de ITSR, enquanto a utilização de temperaturas mais baixas pode resultar na obtenção de valores de ITSR mais elevados;
- Verificou-se, de uma forma geral, que quanto maior é o valor da pressão (menor valor de vácuo aplicado), o valor de ITSR obtido é menor;
- Em relação à variação da duração das rampas de entrada e saída de vácuo aplicado nos provetes, verificou-se que a aplicação instantânea de vácuo tende a fragilizar os provetes, apresentando piores resultados de ITSR. Quando a entrada e a saída de vácuo são feitas lentamente, para a mistura aberta os resultados de ITSR melhoram, no entanto, para a mistura fechada nada se pôde concluir, devido ao facto dos provetes apresentarem diferenças entre os valores médios superiores a 30 kg/m³ e 5 mm, para a baridade e altura, respetivamente;

- Assim como no estudo da variação da temperatura da água aquando a aplicação de vácuo, a temperatura do banho-maria também influencia os resultados finais de ITSR. Temperaturas elevadas apresentam valores de ITSR mais baixos, enquanto temperaturas mais baixas apresentaram resultados ligeiramente melhores;
- O estudo da influência do tempo em banho-maria (68 e 72 horas) não apresentou diferenças significativas, pelo que não é condicionante os provetes estarem 68 ou 72 horas em banho-maria.
- Relativamente à influência da temperatura do ensaio de tração indireta, ensaios realizados a 25 °C apresentaram melhores resultados para a mistura fechada. Para a mistura aberta praticamente não existiu alteração nos valores finais de ITSR. Por sua vez, em ambas as misturas o valor de ITS, à temperatura de 15 °C, é superior, como seria de esperar pela maior rigidez da mistura;
- A norma Militar apresentou valores de resistência conservada ligeiramente superiores aos obtidos pela norma Europeia, pois a norma Militar usa um condicionamento menos severo.

O ensaio que apresentou valores de ITSR mais elevados, para ambas as misturas, foi aquele em que os provetes estiveram submetidos a uma temperatura de 20 °C, em banho-maria, em vez de estarem a 40 °C. Também foi na mesma condição (variação da temperatura de condicionamento) que aconteceu o pior resultado, para ambas as misturas, mas desta vez para uma temperatura de banho-maria de 60 °C. Assim, e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a temperatura da água é uma das principais causas das variações dos valores finais de ITSR.

O ensaio de sensibilidade à água, realizado pela norma Europeia, é um ensaio muito sensível, ou seja, é necessário existir um rígido controlo de todas as temperaturas de forma a minimizar influências externas. Para além disso, acredita-se que, operadores, dias e temperaturas ambientes diferentes, entre outros fatores, podem influenciar os resultados finais. Aconcelha-se a comparar exclusivamente resultados de provetes realizados no mesmo dia, isto diminuirá o risco de obtenção de resultados inequívocos.

5.2 Trabalhos futuros

Futuramente podem-se fazer alguns trabalhos interessantes complementares a este trabalho. Com a existência de diversos tipos de pavimentos, seria interessante saber qual o impacto deste estudo em outros tipos de misturas, com utilização de outros agregados e betumes modificados, por exemplo. De forma a minimizar os erros que possam acontecer, deverá ser usada a mesma amassadura sempre que comparem resultados.

Aconselha-se, também, o estudo das mesmas variações, mas com maior número de repetições para cada ensaio. Dessa forma, será possível comprovar se os resultados obtidos são replicáveis e estatisticamente representativos. Para melhor agrupamento e análise dos dados seria uma mais-valia a aplicação de certas ferramentas de interpretação de dados e reconhecimento de padrões como as técnicas de *Data Mining*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APORBET (1998). Misturas Betuminosas. Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação. APORBET – Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas.

Azevedo, M. (2012). *Directivas para a concepção de pavimentos–Critérios de dimensionamento*, Documento Base, INIR Disponível na internet em: <http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao%20Tcnica/DiretivasConstrucaoPavimentosCritériosDimensionament.pdf> e acedido em 11 de Maio de 2017;

Batista, F., Antunes, M. (2009). Ensaios de comparação interlaboratorial para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas compactadas.

Batista, F., Antunes, M., Teixeira, A., Ferreira, C., Guimarães, C., Gomes, V., Gomes, L. (2011). Estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas, *XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*.

Batista, F.A., Antunes, M.L., Fonseca, P. (2008). Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha. Comunicação em CD-ROM do V Congresso Rodoviário Português “Estradas 2008”, CRP, 10p.

Bernucci, L.B., Motta, L.d., Ceratti, J.A.P., Soares, J.B. (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros, *Rio de Janeiro*, pp. 504.

Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2008). *Pavimentos rodoviários*.

Copeland, A.R. (2007). *Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems*, Vanderbilt University.

Costa, L., Fernandes, S.R., Silva, H.M.R.D.d., Oliveira, J., Miranda, R.F.M. (2015a). *Mechanical analysis of asphalt mixtures produced with waste plastic modified binders*, 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design, FEUP-INEGI, p. 2053-2062.

Costa, L., Silva, H., Oliveira, J., Fernandes, S., Freitas, E., Hilliou, L. (2015b). *Plastic waste use as aggregate and binder modifier in open-graded asphalts*, WASTES 2015–Solutions, Treatments and Opportunities: Selected papers from the 3rd Edition of the International Conference on Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities, Viana Do Castelo, Portugal, 14-16 September 2015, CRC Press, p. 67.

Curtis, C.W., Ensley, K., Epps, J. (1993). *Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption*, National Research Council Washington, DC, USA.

Francisco, A.P.S. (2012). *Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis*, Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

Furlan, A., Gouveia, L., Fabbri, G., Fernandes Jr, J. (2004). Influência de Características dos Agregados na Susceptibilidade a Dano por Umidade de Misturas Asfálticas, *Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás–IBP, 17º Encontro de Asfalto*.

Gouveia, L.T.d., Furlan, A.P., Parreira, A.B., Fernandes Junior, J.L., Fabbri, G.T.P. (2004). *Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade*, anais do XVIII Congresso de pesquisa e ensino em transportes, p. 138-149.

Mahmoud, E.M. (2005). *Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage*, Texas A&M University.

Martins, J.L.C. (2012). *Efeito da composição das misturas betuminosas na sensibilidade à água e resistência à deformação permanente*, Universidade do Minho.

Miknis, F., Pauli, A., Beemer, A., Wilde, B. (2005). Use of NMR imaging to measure interfacial properties of asphalts, *Fuel*, Vol. 84 (9), pp. 1041-1051.

Minhoto, M. (2007). *Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Guimarães: Universidade do Minho.

Partl, M., Pasquini, E., Canestrari, F., Virgili, A. (2010). Analysis of water and thermal sensitivity of open graded asphalt rubber mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 24 (3), pp. 283-291.

Pereira, F.J.Q. (2009). *Estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Pereira, P., Miranda, V. (1999). *Gestão da conservação dos pavimentos rodoviários*.

Poulikakos, L., Partl, M. (2009). Evaluation of moisture susceptibility of porous asphalt concrete using water submersion fatigue tests, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (12), pp. 3475-3484.

Silva, H.M.R.D.d. (2006). Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique: Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas.

Terrel, R.L., Al-Swailmi, S. (1994). *Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: test selection*.

Torres, M.J., Castro-Gomes, J., Zoorob, S.E. (2010). Ensaios de "imersão-compressão", "sensibilidade à água" e "gelo-degelo" em misturas betuminosas recicladas a semi-quente do pavimento da EN244, *Ponte de Sôr*, pp. 51-62.

Vasconcelos, K.L., Bhasin, A., Little, D.N., Soares, J.B. (2006). Avaliação do dano por umidade induzida e da recuperação de trincas em mástique, *18o Encontro de Asfalto-IBP Rio de Janeiro*.