

Reciclagem total de misturas betuminosas usando óleo alimentar como rejuvenescedor

Francisco Manuel Dias Pimenta Fernandes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

Professor Doutor Silvino Dias Capitão

Júri

Presidente: Professor Doutor João Torres de Quinhones Levy

Orientador: Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

Vogal: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves

Outubro 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores Professor Doutor Luís Picado Santos e Professor Doutor Silvino Dias Capitão, por terem criado as condições para que se realizasse este trabalho e também pela disponibilidade, paciência, empenho e amizade que sempre demonstraram: o meu muito obrigado.

À empresa JJR Construções, por ter fornecido o material fresado e por ter disponibilizado toda a documentação referente ao mesmo e à mistura betuminosa original, imprescindíveis para a realização da dissertação.

Ao Engenheiro Fernando Martinho, pela opinião e ajuda na dissertação que sempre me deu com grande entusiasmo e simpatia.

Ao João Crucho e ao Rui Garcia pela grande ajuda que me deram na realização dos ensaios laboratoriais e pelo aconselhamento que sempre me deram de bom grado. Mais do que isso, agradeço verdadeiramente pela amizade com que me receberam e me integraram no laboratório. A vossa companhia e o convívio de laboratório serviram sempre como uma grande motivação e para mim foi um prazer ter escrito a dissertação ao vosso lado. Espero que tudo vos corra de feição!

À Nicole, pelo amor e carinho que sempre me deu e pelo apoio e compreensão que nunca me faltou nos momentos mais difíceis que tive ao longo de todo o curso. A tua companhia e todo o tempo que partilhámos juntos durante o curso e na vida tornaram sempre as coisas muito mais fáceis, e sem ti certamente não teria tido a mesma graça.

Aos meus pais, pelo acompanhamento e preocupação constante, e sobretudo por acreditarem em mim ao longo de toda a minha vida, dando-me todas as condições para que a tarefa se tornasse mais fácil. A eles dedico este trabalho.

A todos os amigos e familiares que me acompanharam ao longo de todo o curso e que não mencionei, os meus sinceros agradecimentos.

Resumo

Este estudo pretende analisar a viabilidade técnica e económica do rejuvenescimento de misturas betuminosas fresadas a partir da diluição de óleo alimentar usado (OAU) na mistura aquando da sua reutilização. A mistura do estudo em questão correspondeu a 100% de material fresado, à qual foi adicionada uma percentagem de 18% de OAU e 1% de betume virgem. A mistura foi testada relativamente ao módulo de deformabilidade, resistência à fadiga, resistência à deformação permanente e ainda à sensibilidade à água. Finalmente, foi ainda avaliada a viabilidade económica da mistura rejuvenescida.

A partir dos resultados obtidos conclui-se que a mistura rejuvenescida é uma alternativa viável e mais económica que as misturas convencionais aplicadas atualmente. Os resultados indicaram que a mistura rejuvenescida exibiu um comportamento ligeiramente mais rígido, mas com uma resistência à fadiga superior às misturas de referência. Quanto à deformação permanente, os resultados indicaram uma maior profundidade de rodeira relativamente às mesmas.

Com base nesses resultados pode dizer-se que o potencial da solução bastante interessante para pavimentos de baixo a médio tráfego. No entanto, impõe-se a realização de um estudo mais completo das hipóteses para este tipo de solução, nomeadamente testando alternativas de formulação que possam atenuar os problemas de deformação permanente detetados. Tudo isto para atingir um plano de validação deste tipo de solução que possa ser aplicado na prática com vantagens técnico-económicas e de contribuição para a prática duma economia circular em conservação de redes de estradas através da reutilização total de materiais de pavimentação.

Palavras chave: Misturas betuminosas fresadas, rejuvenescimento, óleo alimentar usado (OAU), desempenho mecânico, economia circular.

Abstract

The purpose of this thesis is to analyse the viability of the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) rejuvenated using waste cooking oil (WCO). In this case, the studied mixture contains 100% RAP materials in which were added 18% of WCO and 1% virgin bitumen. The correspondent mixture was tested for stiffness, fatigue resistance, permanent deformation and water sensitivity. Finally, the economic viability of the mixture was further evaluated.

The performance results showed that the rejuvenated mixture presents itself as a viable and cheaper alternative to the current pavement solutions. The rejuvenation with WCO achieved slightly higher stiffness modulus and longer fatigue life. Regarding the permanent deformation, the obtained results showed a greater rut depth when compared to the reference mixtures.

Considering the obtained results, it can be said that the rejuvenated mixture appears to be a very interesting solution for low to medium traffic pavements, however a more in-depth study is required. The formulation on the “recipe” should be optimized, so that the problems with permanent deformation can be attenuated. All of this to achieve a validation plan for this type of solution so that rejuvenated mixtures can become a reality, contributing to a circular economy in road pavements rehabilitation.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement (RAP), rejuvenation, waste cooking oil (WCO), performance results, circular economy.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos da dissertação.....	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Organização.....	2
2. Requalificação de pavimentos flexíveis de tráfego reduzido	5
2.1 Estrutura e funcionamento dos pavimentos rodoviários.....	5
2.2 Misturas betuminosas a quente	7
2.3 Reciclagem de pavimentos.....	8
2.3.1 Considerações gerais	8
2.3.2 Reciclagem em central, a Quente, com betume e rejuvenescedor	10
2.4 Agentes rejuvenescedores	11
2.5 Uso de óleo alimentar usado (OAU).....	14
2.5.1 Considerações gerais	14
2.5.2 Efeitos do óleo alimentar usado em betume asfáltico	15
2.5.3 Efeitos do óleo alimentar usado em misturas betuminosas 100% recicladas	20
2.5.4 Considerações finais	24
3. Estudo experimental.....	25
3.1 Considerações iniciais	25
3.2 Primeira fase - Definição da “receita” de produção	25
3.2.1 Caracterização dos materiais em estudo.....	27
3.2.2 Fabrico dos provetes.....	29
3.2.3 Baridade aparente.....	32
3.2.4 Ensaio de compressão Marshall	33
3.2.5 Baridade máxima teórica	34
3.3 Segunda fase – Caracterização da mistura definida.....	37
3.3.1 Fabrico dos provetes.....	38
3.3.2 Ensaio de rigidez e resistência à fadiga	41
3.3.3 Ensaio de resistência à deformação permanente.....	42
3.3.4 Ensaio de sensibilidade à água	43

4. Apresentação e discussão de resultados.....	45
4.1 Formulação da mistura	45
4.1.1 Resultados obtidos.....	45
4.2 Caracterização da mistura.....	47
4.2.1 Ensaio de rigidez.....	47
4.2.2 Ensaio de resistência à fadiga	50
4.2.3 Ensaio de resistência à deformação permanente.....	53
4.2.4 Ensaio de sensibilidade à água	55
4.3 Custos da mistura estudada	56
5. Conclusões e trabalhos futuros.....	59
5.1 Trabalho realizado	59
5.2 Conclusões	59
5.3 Trabalhos futuros	61
Referencias e documentos normativos	63
Referências bibliográficas.....	63
Documentos normativos	65
Anexos.....	67
Anexo 1 – Valores de referência do Caderno de Encargos da IP	67
Anexo 2 – Caracterização e calibração do fresado fornecido pela JJR	68
Anexo 3 – Relatório da JJR para a mistura AC14 surf 35/50 original	70
Anexo 4 – Propriedades e resultados dos provetes prismáticos	77
Anexo 5 – Propriedades e resultados das lajetas	77
Anexo 6 – Propriedades e resultados dos provetes cilíndricos.....	79

Índice de figuras

Figura 2.1 – Estrutura de um pavimento flexível (adaptado de LNEC, 2005)	6
Figura 2.2 – Evolução do estado do pavimento ao longo do tempo (Batista, 2009)	9
Figura 2.3 – Reciclagem em central descontínua de mistura betuminosa a quente com betume (F. Martinho, 2005)	11
Figura 2.4 – Processo de envelhecimento do betume (adaptado de Moghaddam e Baaj, 2016)	12
Figura 2.5 – Possíveis cenários de difusão do agente rejuvenescedor no ligante reciclado (adaptado de Moghaddam e Baaj, 2016)	13
Figura 2.6 – Alterações químicas no ligante envelhecido e rejuvenescido (adaptado de Moghaddam e Baaj, 2016)	14
Figura 2.7 – Processo de tratamento do OAU (adaptado Sun et al., 2015)	18
Figura 2.8 – Óleo tratado/Bio-óleo (direita) e óleo não tratado (esquerda) (Azahar et al., 2016)	19
Figura 2.9 – Fuso 9.5 mm “superpave” e granulometria do material 100% reciclado (adaptado de Zaumanis et al., 2015)	21
Figura 2.10 – Resultados obtidos do wheel-tracking (adaptado de Zaumanis et al., 2015)	23
Figura 2.11 – Resultados obtidos da trabalhabilidade (adaptado de Zaumanis et al., 2015)	23
Figura 2.12 – Resultados obtidos do potencial de deformação e resistência à tração a 10°C (adaptado de Zaumanis et al., 2015)	23
Figura 2.13 – Resultados obtidos da Fracture work density (FWoDe) (adaptado de Zaumanis et al., 2015)	24
Figura 3.1 – Metodologia Marshall utilizada na fase experimental (Burguete, 2013)	26
Figura 3.2 – Curva granulométrica do fresado e da mistura de referência adequado ao fuso da IP ...	28
Figura 3.3 – OAU utilizado no fabrico da mistura rejuvenescida	29
Figura 3.4 – Material fresado (esquerda) e OAU (direita) utilizados no fabrico da mistura	29
Figura 3.5 – Misturadora utilizada no fabrico da mistura	30
Figura 3.6 – Introdução do betume virgem (esquerda) e do OAU (direita) na mistura	30
Figura 3.7 – Compactador de impacto utilizado	31
Figura 3.8 – Provetes após compactação	31
Figura 3.9 – Desmoldagem de um dos provetes fabricados	32
Figura 3.10 – Aspeto final dos provetes após desmoldagem	32
Figura 3.11 – Pesagem do provete seco (esquerda) e submerso (direita)	33
Figura 3.12 – Banho termostático (esquerda) e ensaio de compressão Marshall (direita)	34

Figura 3.13 – Aspetto dos provetes após ensaio de compressão Marshall	34
Figura 3.14 – Desagregação do provete selecionado	35
Figura 3.15 – Amostra no picnómetro	35
Figura 3.16 – Provetes produzidos para a caracterização da mistura (adaptado de Crucho, 2018) ...	38
Figura 3.17 – Material fresado selecionado (esquerda) e torrões retirados do fresado (direita)	38
Figura 3.18 – Processo de fabrico da mistura.....	39
Figura 3.19 – Introdução da mistura molde (esquerda) e aspeto final da lajeta após compactação e desmoldagem (direita).....	39
Figura 3.20 – Serragem das lajetas (esquerda) e provetes prismáticos obtidos após serragem (direita)	40
Figura 3.21 – Aspetto final dos provetes cilíndricos fabricados	40
Figura 3.22 – Equipamento Four-Point-Bending utilizado no ensaio de rigidez e de resistência à fadiga	41
Figura 3.23 – Câmara climática utilizada	42
Figura 3.24 – Exemplo de ensaio wheel-tracking (Crucho, 2018)	43
Figura 3.25 – Aspetto das lajetas após a realização do ensaio wheel-tracking	43
Figura 3.26 – Banho termostático utilizado no condicionamento dos provetes.....	44
Figura 3.27 – Prensa utilizada para a realização do ensaio ITS (esquerda); Aspetto provetes após realização do ensaio ITS (direita).....	44
Figura 4.1 – Baridade aparente das misturas betuminosas.....	46
Figura 4.2 – Módulo de deformabilidade dos provetes ensaiados e misturas de referência.....	48
Figura 4.3 – Ângulo de fase dos provetes ensaiados e misturas de referência	49
Figura 4.4 – Ensaio de fadiga realizado para o provete OA13	51
Figura 4.5 – Ensaio de fadiga realizado para o provete OA17	52
Figura 4.6 – Ensaio de fadiga realizado para o provete OA12	52
Figura 4.7 – Leis de fadiga da mistura rejuvenescida e das misturas de referência	53
Figura 4.8 – Curvas de deformação obtidas do wheel-tracking, para as duas lajetas de mistura rejuvenescida	54
Figura 4.9 – Resultados obtidos do ITS para cada provete.....	55
Figura 4.10 – Estrutura tipo de um pavimento de baixo a médio tráfego	57
Figura 4.11. – Comparação dos custos por m ² entre a mistura rejuvenescida em estudo e a solução AC14 equivalente	58

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Exemplos de configurações de diluição de OUA utilizadas por diversos autores	15
Quadro 2.2 - Agentes rejuvenescedores utilizados em Zaumanis <i>et al.</i> (2014), e respectivas abreviaturas	21
Quadro 3.1 – Formulações das misturas betuminosas utilizadas em cada tentativa e respetiva formulação final	27
Quadro 3.2 – Granulometria do fresado utilizado e da mistura de referência adequada ao fuso da IP28	
Quadro 3.3 – Ensaios utilizados para a caracterização da mistura (adaptado de Crucho, 2018).....	37
Quadro 4.1 – Baridade aparente obtidas para as misturas betuminosas testadas	45
Quadro 4.2 – Valores de força de rotura e de deformação para as misturas betuminosas	46
Quadro 4.3 – Caracterização geométrica da secção das vigas da mistura rejuvenescida	48
Quadro 4.4 – Variação do módulo de deformabilidade da mistura rejuvenescida (adaptado de Crucho, 2018).....	49
Quadro 4.5 – Variação do ângulo de fase da mistura rejuvenescida (adaptado de Crucho, 2018)	49
Quadro 4.6 – Grupos de vigas definidos segundo as baridades determinadas	51
Quadro 4.7 – Resultados da resistência à fadiga da mistura rejuvenescida e misturas de referência	53
Quadro 4.8 – Resultados obtidos do wheel-tracking para todas as misturas.....	54
Quadro 4.9 – Valores do ITSr para as misturas AC14 (adaptado de Crucho, 2018).....	56
Quadro 4.10 – Custos das operações associadas à pavimentação da mistura rejuvenescida.....	57
Quadro A.1 – Propriedades e resultados dos provetes prismáticos (5 x 5 x 40 cm).....	77
Quadro A.2 – Propriedades e resultados das lajetas (5 x 30 x 40 cm).....	77
Quadro A.3 – Resultados fornecidos pelo ensaio wheel-tracking.....	78
Quadro A.4 – Propriedades e resultados dos provetes cilíndricos	79

Abreviaturas

AC – Asphalt concrete

ASTM – American Society for Testing and Materials

BB – Betão betuminoso

CEN – Comité Europeu de Normalização

COA – Concentrado de óleo alimentar

EA – Extrato aromático

EN – European standard

F – Fresado

IP – Infraestruturas de Portugal

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

IST – Instituto Superior Técnico

ITSR – Indirect tensile strength ratio

ITS – Indirect tensile strength

ITS_{wet} – Indirect tensile strength provetes condicionados

ITS_{dry} – Indirect tensile strength provetes não condicionados

MV – Mistura virgem

NP – Norma portuguesa

OAU – Óleo alimentar usado

OMU – Óleo de motor usado

OO – Óleo orgânico

ORD – Óleo de resina destilado

PG – Performance grade

RAP – Reclaimed asphalt pavement

rpm – Rotações por minuto

RTFOT – Rolling thin film oven test

surf – Surface

TLA – Trinidad lake asphalt

TPB – Trinidad petroleum bitumen

Símbolos

μm – Micrómetro

a;b – Constantes

B – Conteúdo de ligante do provete

CH_3OH – Metanol

D – Diâmetro do provete

FWoDe – Fracture work density

G^* – Módulo complexo de corte

$G^*/\sin\delta$ – Fator de resistência à deformação

$G^*\sin\delta$ – Fator de resistência ao fendilhamento

h – Altura do provete

H_2SO_4 – Ácido sulfúrico

Hz – Hertz

kN - Kilonewton

KOH – Hidróxido de potássio

kPa – Kilopascal

l – Largura do provete

M_1 – Massa do picnómetro e acessórios

m_1 – Massa do provete seco

M_2 – Massa do picnómetro, acessórios e amostra

m_2 – Massa do provete submerso

M_3 – Massa do picnómetro, acessórios, amostra e água

m_3 – Massa do provete saturado com superfície seca

MPa – Megapascal

N – N° de ciclos

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius

PRDair – Rácio entre RDair e a espessura da lajeta

RDair – Profundidade de rodeira no final do ensaio

VMA – Volume de vazios no agregado

V_p – Volume do picnómetro

WTSair – Declive do gráfico do wheel-tracking, calculado entre os 5000 e os 10000 ciclos

δ – Ângulo de fase

ρ_B – Densidade do betume.

ρ_{bssd} – Baridade do provete saturado com superfície seca

ρ_{mv} – Baridade máxima teórica da mistura betuminosa

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio

ϵ - Extensão

ϵ_6 – Extensão correspondente a um milhão de ciclos de carregamento

V_m – Conteúdo de vazios do provete

1. Introdução

1.1 Enquadramento geral

O betume asfáltico tal como o conhecemos hoje em dia, adquiriu uma elevada importância na sociedade visto que se trata de um material amplamente utilizado na pavimentação das mais diversas estradas pertencentes às diferentes redes viárias a nível mundial. Trata-se de um resíduo do petróleo, que é obtido na fase final da sua destilação e que posteriormente é misturado com agregado britado ou natural, funcionando como um agente aglutinador. Ao conjunto de betume e agregado, dá-se o nome de mistura betuminosa.

Estas misturas betuminosas, em Portugal, são utilizadas principalmente em pavimentos flexíveis, maioritariamente como camada de base e/ou de regularização e ainda como camada de desgaste. A sua espessura nestas diferentes camadas não é fixa. Tendo em conta a estrada em questão, as condições climáticas existentes e ainda ao tráfego a que estarão sujeitas, a espessura é estabelecida para cada camada por forma a obter um período de vida útil aceitável.

Tal como qualquer outra estrutura, também os pavimentos rodoviários têm os seus pontos fracos. Neste caso, estes são particularmente visíveis nas camadas superiores, que ao longo do tempo começam por apresentar algumas patologias, sendo as mais frequentes o fendilhamento e ainda a deformação por rodeiras. Estas patologias quando atingem estados avançados, são irreversíveis e na maioria das vezes impõem uma reposição das camadas afetadas.

Durantes os últimos anos, a estratégia utilizada pelos diferentes operadores para a reabilitação e requalificação das estradas afetadas tem sido a reconstrução das mesmas com materiais novos. Trata-se de uma opção tecnologicamente mais simples (as técnicas são muito conhecidas e os materiais estão em geral ao dispor) mas pouco sustentável visto que não recicla os materiais existentes. Trata-se de técnica seguramente mais cara, sobretudo no caso de redes secundárias, menos exigentes estruturalmente por terem de suportar menos tráfego. Como tal, a reutilização dos materiais existentes, reciclagem, deve ser considerada. Um dos problemas associados à reciclagem trata-se da reativação das funções do ligante existente de modo a que este possa ter um papel importante nas camadas ligadas finais. É neste sentido que surgem os agentes rejuvenescedores de betume asfáltico e de entre estes os que também implicam a reutilização/valorização de resíduos como é o caso do óleo vegetal alimentar usado (OAU). Tem-se a expectativa, que o OAU quando misturado com o betume envelhecido presente em materiais betuminosos recuperados dos pavimentos existentes permita restabelecer ou até mesmo melhorar as suas propriedades iniciais, dando à mistura resultante propriedades que permitam o seu uso direto em camadas de pavimento. Desta forma, é reduzida a necessidade de recorrer a materiais novos e é diminuído o impacto económico e ambiental da reabilitação de pavimentos.

No entanto, em Portugal, e um pouco à semelhança do que acontece nos restantes países desenvolvidos, ainda é reduzida a utilização de agentes rejuvenescedores como o OAU na utilização

de misturas recicladas. Assim sendo, parece importante a realização de um trabalho de laboratório que procure avaliar as vantagens e as desvantagens da utilização deste OAU.

1.2 Objetivos da dissertação

Analisar a viabilidade técnica e económica do uso de misturas betuminosas obtidas por fresagem de pavimentos existentes e rejuvenescidas pelo uso de OAU para reaplicação em pavimentos de baixo a médio tráfego.

1.3 Metodologia

A metodologia de trabalho do presente estudo foi dividida em duas fases distintas. Em primeiro lugar foi definida a formulação da mistura que se pretende caracterizar, formulação essa que foi realizada pelo Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC) a partir de uma metodologia Marshall. De seguida foi realizada uma segunda fase no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes, do Instituto Superior Técnico (IST), em que a mistura formulada obtida foi caracterizada mecanicamente, sendo executados três tipos de provetes (lajetas, vigas prismáticas e provetes cilíndricos), por forma a serem testados em ensaios de deformabilidade, resistência à fadiga, deformação permanente e ainda sensibilidade à água. Finalmente, discutiram-se os resultados e extraíram-se as principais orientações, de acordo com a análise realizada, para a utilização de reciclagem de misturas betuminosas com recurso a OAU como rejuvenescedor do ligante existente.

1.4 Organização

Relativamente à organização de todo o documento, para além do presente capítulo, onde se apresenta o enquadramento geral do tema, o objetivo da dissertação, a metodologia usada e a organização, existem ainda mais quatro capítulos.

No Capítulo 2 é feita uma revisão geral da temática sobre os pavimentos rodoviários, por forma a apresentar o contexto que levou à génese dos agentes rejuvenescedores. É descrito o modo de funcionamento e de atuação dos mesmos e, por fim, é feita a revisão da literatura acerca do OAU, nomeadamente nos efeitos do mesmo sobre o betume e em misturas betuminosas.

No Capítulo 3 é descrito todo o processo experimental realizado, nomeadamente no que diz respeito ao fabrico dos provetes e ainda aos respetivos ensaios realizados.

No Capítulo 4 é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos. Apresentam-se os resultados utilizados para a formulação da mistura em estudo e posteriormente são apresentados os resultados dos ensaios do módulo de deformabilidade, resistência à fadiga, deformação permanente e, ainda, a sensibilidade à água. Para a avaliação do desempenho da mistura rejuvenescida, comparam-se os resultados obtidos com misturas de referência fabricadas por outros autores em estudos semelhantes. Para além da avaliação do desempenho é, ainda, feita uma pequena estimativa do custo de aplicação da mistura rejuvenescida e a sua comparação com a solução do tipo AC14 equivalente.

No Capítulo 5 é feito um resumo dos trabalhos realizados ao longo deste estudo, e são apresentados os principais resultados e conclusões obtidas. Para além disso, são ainda recomendados possíveis trabalhos futuros a serem realizados neste tipo de misturas rejuvenescidas.

2. Requalificação de pavimentos flexíveis de tráfego reduzido

2.1 Estrutura e funcionamento dos pavimentos rodoviários

Tal como qualquer outro pavimento, a principal função de um pavimento rodoviário é assegurar a circulação de todos os seus utilizadores. Neste caso, por se tratarem de veículos, essa função é garantida por uma superfície de rolamento, que deve ser mantida nas melhores condições possíveis, permitindo assim que essa circulação seja feita de forma cómoda e segura, durante um determinado período de tempo de serviço.

Durante este tempo de serviço, o pavimento estará sujeito a um conjunto de ações exteriores, sejam elas provenientes do tráfego ou das condições climáticas existentes, pelo que é necessária a existência de um conjunto de qualidades funcionais e estruturais que lhes estejam associadas, de forma a serem garantidas as condições de circulação atrás referidas.

No que diz respeito às qualidades funcionais, estas estão essencialmente relacionadas com o conforto e a segurança da circulação dos utilizadores e podem ser obtidas através da constituição da camada superior do pavimento. Neste caso, estão incluídas características como a regularidade, a textura, as qualidades antiderrapantes em geral, cor adequada e ainda a geração de ruído de rolamento que deve ser adequada ao tipo de superfície. Quanto às qualidades estruturais, estas estão relacionadas com a capacidade de suporte do pavimento, devendo este suportar as cargas que lhe são impostas pelo tráfego sem sofrer alterações na sua constituição. Estas qualidades estruturais são traduzidas pelo bom desempenho da superfície, que se deve manter íntegra ao longo do tempo, não apresentando qualquer tipo de fendas, covas, depressões ou outro tipo de deformações permanentes.

Quanto à constituição do pavimento, este é composto por um conjunto estratificado de camadas de espessura reduzida quando comparada com a sua extensão, que se encontram apoiadas na fundação, constituída pelo terreno natural ou por este melhorado. Geralmente estas camadas podem ser divididas em dois grandes tipos: “camadas ligadas” e “camadas granulares”.

Para os pavimentos flexíveis, ao conjunto de “camadas ligadas” estão associados materiais granulares estabilizados com ligante, geralmente denominadas por misturas betuminosas, as quais são colocadas na parte superior do pavimento. Ao conjunto de camadas granulares estão associados materiais inertes, britados e não aglutinados, que por sua vez são colocados na parte inferior do pavimento.

Para os pavimentos rígidos, as “camadas ligadas” são aglutinadas com cimento, desde betão normal com 300 ou mais kg/m^3 de cimento para a camada em contacto com o tráfego, até a uma eventual camada subjacente a esta, que geralmente é constituída por um betão pobre ou similar com uma quantidade de cimento a rondar os 200 kg/m^3 . As restantes camadas são como as descritas para o caso do pavimento flexível.

Existem ainda os pavimentos semirrígidos, em geral semelhantes aos flexíveis, mas em que a primeira camada granular é aglutinada com cimento do tipo betão pobre já referido, os quais não têm tido um uso significativo no país. No estudo que se segue trata-se unicamente o caso dos pavimentos flexíveis.

A partir de diferentes materiais constituintes para cada camada, resultam então os diferentes tipos de pavimentos assinalados, cujo comportamento difere quando solicitados pelas diversas ações exteriores. Na Figura 2.1 encontra-se uma representação mais detalhada de um pavimento flexível, onde podem ser observadas as diferentes designações para cada camada.

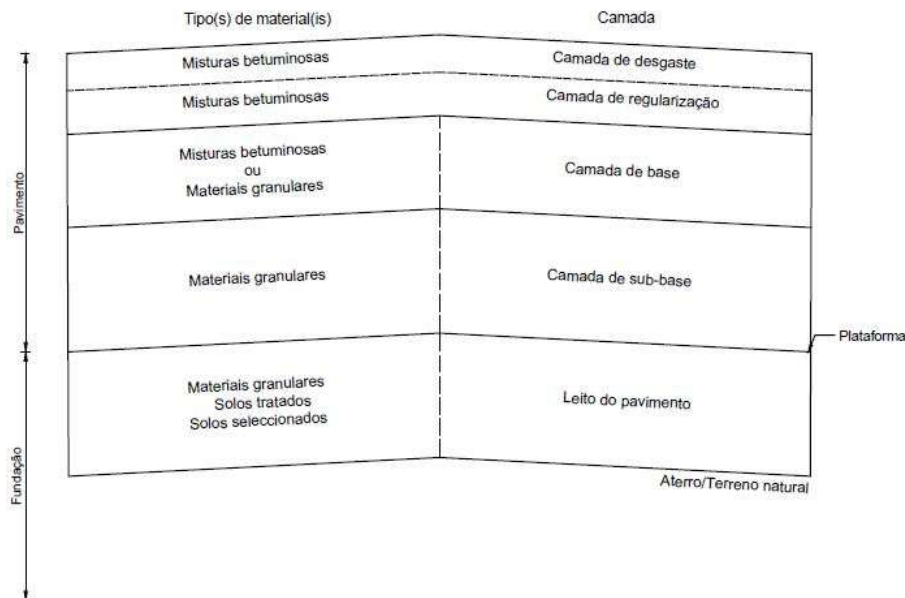


Figura 2.1 – Estrutura de um pavimento flexível (adaptado de LNEC, 2005)

As camadas de um pavimento podem então ser classificadas pelas funções que desempenham, a saber, a camada superficial ou de desgaste e ainda o corpo do pavimento. A camada de desgaste é composta por uma camada estabilizada com ligante e tal como referido anteriormente tem como objetivo assegurar as qualidades funcionais do pavimento, às quais acresce a função de impermeabilização, impedindo a entrada de água para as restantes camadas inferiores. O corpo do pavimento, por sua vez, tem a função de suportar as cargas impostas pelo tráfego, podendo ser composta por camadas estabilizadas com ligantes e também por camadas granulares. Para além disto, cada uma das camadas tem ainda a função de assegurar apoio para a realização da camada sobrejacente.

No que diz respeito à disposição das mesmas, uma vez que, os esforços são reduzidos com o aumento da profundidade, estas são dispostas, geralmente, com qualidade e resistências decrescentes, de cima para baixo. Assim, como camadas betuminosas, temos a camada de desgaste, subjacente à mesma temos a camada de regularização e seguidamente, a camada de base, podendo esta ser aglutinada ou não. A parte inferior do pavimento tem a designação de sub-base e é composta apenas por materiais granulares, no entanto, também pode ser tratada com cimento. Todas estas camadas estão assentes sobre a fundação, composta por terreno natural, tal como foi dito anteriormente, havendo a possibilidade de ser tratada caso não possua as condições exigidas.

Por último, é importante caracterizar as ações exteriores a que um pavimento está sujeito. Consideram-se dois tipos de ações: as resultantes da aplicação das cargas impostas pelos veículos e as resultantes das ações dos agentes climáticos.

As cargas a suportar são traduzidas pela pressão vertical aplicada na superfície do pavimento e por uma ação tangencial aplicada no plano entre o pneu e o pavimento, provocada pelas ações de travagem ou de mudança de velocidade. Estas cargas provocam diferentes comportamentos nos pavimentos, consoante a sua intensidade e forma de aplicação pelos veículos.

As ações climáticas são representadas pela água e pela temperatura do ar e têm uma influência muito importante no comportamento e evolução dos pavimentos. A água, quer proveniente do interior da fundação quer do exterior, influencia o teor em água das camadas granulares e do solo de fundação que, ao aumentar, reduz a resistência das mesmas. Por sua vez, a temperatura do ar, influencia diretamente a temperatura das camadas betuminosas, condicionando a sua rigidez, que varia no sentido inverso ao da temperatura.

2.2 Misturas betuminosas a quente

Uma vez conhecida a estrutura e funcionamento de um pavimento, é também importante conhecer o tipo e as características das camadas que o constituem. Tal como foi referido anteriormente, as camadas presentes num pavimento podem ser do tipo ligadas, nas quais são aplicadas as misturas betuminosas, ou ainda granulares. No entanto, sendo que o objetivo da dissertação recai especificamente na camada de desgaste, esta secção incide apenas nas camadas ligadas, fazendo uma caracterização geral das mesmas.

De uma forma sucinta, as misturas betuminosas a quente são constituídas por um conjunto de agregados que são misturados em central com um ligante, ambos em quantidades previamente determinadas. Essa mistura é posteriormente transportada, espalhada e compactada para a estrada em questão, constituindo assim uma camada de pavimento. Tanto o conjunto de agregados como o ligante fazem parte dos elementos constituintes das misturas betuminosas, aos quais ainda se junta um terceiro elemento, que corresponde ao ar nos vazios.

No que diz respeito ao ligante, o material usado é o betume asfáltico. Trata-se de um ligante obtido na fase final da destilação do petróleo que apresenta cor negra e caracteriza-se pelas suas propriedades adesivas. A sua função principal na mistura passa por ligar os agregados, garantido assim uma boa coesão entre eles. Relativamente às suas propriedades reológicas, trata-se de um material deformável, tornando-se viscoso a elevadas temperaturas e endurecendo à medida que a temperatura diminui. A sua composição química é bastante complexa pelo que será apenas abordada de uma maneira muito geral na secção seguinte.

Quanto ao agregado, corresponde ao material granular, usualmente utilizado na construção podendo ter origem natural, artificial ou reciclado. No caso do agregado natural, a sua origem é mineral sendo sujeito apenas a processamento mecânico. O agregado artificial tem também uma origem mineral, no entanto, é o resultado de um processamento industrial compreendendo algumas

modificações. Por fim, o agregado reciclado é o agregado resultante de materiais anteriormente utilizados na construção. Qualquer um destes tipos de agregados, são usados para a formação de um esqueleto pétreo, que resista à ação do tráfego, resistência essa que é adquirida pelo imbricamento dos grãos entre si. Desta forma, a escolha do agregado deve ser feita por forma a maximizar essa resistência. Segundo Branco *et al.* (2005), cerca de 90 a 95% do peso das misturas betuminosas corresponde ao material agregado, o que se traduz em 75 a 85% do seu volume. Relativamente ao ar dos vazios, trata-se de uma característica que se reflete em propriedades como a porosidade, que são responsáveis pela trabalhabilidade e traduzem o grau de compactação das misturas.

Para além destes constituintes, existem ainda outros elementos, denominados aditivos, que podem ser incluídos nas misturas betuminosas com intuito de melhorar ou repor as propriedades das mesmas. Um exemplo disso são os agentes rejuvenescedores, agentes esses que são parte importante desta dissertação e que serão tratados nas secções seguintes.

Após a formulação da mistura, tendo em conta os seus elementos constituintes descritos anteriormente, é então realizada a respetiva camada de pavimento, sendo que cada uma delas deve garantir determinados requisitos. No caso da camada de desgaste devem ser formuladas misturas betuminosas que garantam características como a durabilidade, resistência à fadiga, aderência e permeabilidade (Branco *et al.*, 2005)

Para o estudo em questão, a mistura betuminosa quente a utilizar, é o Betão Betuminoso, uma vez que é a mistura mais comum nas camadas de desgaste. De acordo com NP EN 13108-1 (IPQ, 2011b), a designação para esta mistura é “AC14 surf 35/50 (BB)”, em que: “AC” corresponde ao termo “*asphalt concrete*”, ou seja, corresponde à designação do produto; “surf” corresponde à camada do pavimento a que a mistura é aplicada, neste caso como se trata da camada de desgaste, o termo em inglês correspondente é “*surface*”; “35/50” corresponde ao limite mínimo e máximo da classe de penetração do betume utilizado; “(BB)” corresponde à designação comum usada na tecnologia portuguesa significando Betão Betuminoso.

2.3 Reciclagem de pavimentos

2.3.1 Considerações gerais

Por forma a garantir as qualidades estruturais e funcionais exigidas a um pavimento rodoviário é essencial estabelecer um acompanhamento da evolução do estado do mesmo. Após a sua entrada em serviço, o estado do pavimento rodoviário piora gradualmente por ação do tráfego e variabilidade das condições climáticas, pelo que devem ser programadas intervenções que visam preservar e repor essas qualidades, aumentando assim o tempo de serviço do mesmo. Essas intervenções são denominadas atividades de conservação/reabilitação.

A altura em que devem ser efetuadas este tipo de intervenções advém desse acompanhamento que dever ser feito ao pavimento e o nível de intervenção a recorrer dependerá do estado de degradação que o mesmo apresenta. Para estados menos degradados, são utilizadas técnicas de conservação das características de superfície que visam a manutenção de um determinado nível de

serviço, sem, no entanto, aumentar a sua capacidade de carga. Para estados de degradação mais avançados, procede-se frequentemente a operações de reabilitação que promovem a melhoria das características, essencialmente estruturais, do pavimento. Consistem essencialmente, na execução de uma ou mais camadas de reforço ou de reconstrução das camadas existentes.

Na Figura 2.2, encontra-se uma representação gráfica da evolução do estado do pavimento, acompanhado das intervenções de conservação/reabilitação referidas.

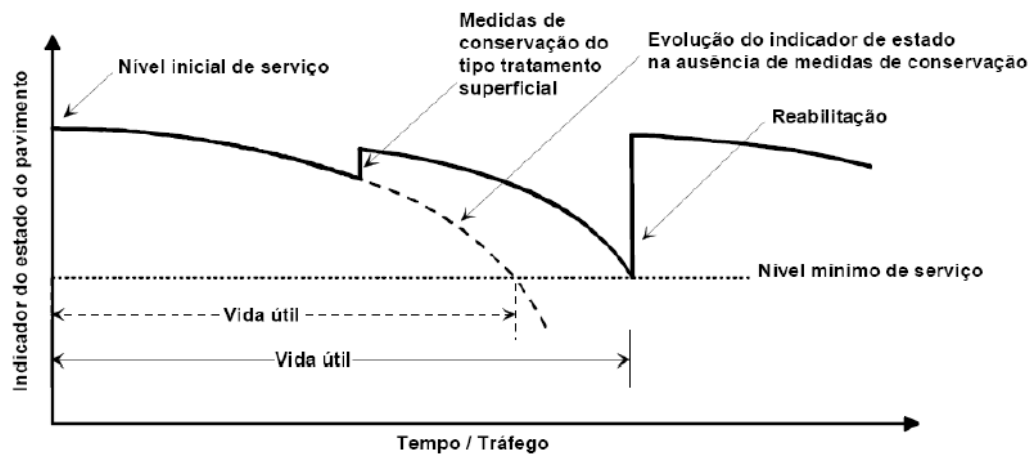


Figura 2.2 – Evolução do estado do pavimento ao longo do tempo (Batista, 2009)

Para a reconstrução das camadas de um pavimento, hoje em dia torna-se cada vez mais necessário optar por soluções que permitam uma sustentabilidade dessa operação, pelo que, a reciclagem de pavimentos torna-se cada vez mais como uma hipótese a considerar. De uma forma geral, a reciclagem de um pavimento consiste na fresagem das camadas existentes até uma determinada profundidade e na sua reutilização em camada semelhante, mediante a adição de novo ligante e de novos agregados em quantidades variáveis. As quantidades a serem reutilizadas são bastante variáveis, desde valores reduzidos (100% de reutilização) até valores elevados (80% de materiais novos para camadas mais exigentes, por exemplo), os quais são adicionados aos materiais resultantes dessa fresagem. Atualmente as técnicas de reciclagem utilizadas podem distinguir-se quanto ao local de reciclagem, podendo ser feita no local da obra (*in situ*) ou em central, quanto à temperatura usada para o fabrico das misturas recicladas, a quente ou frio, e ainda quanto ao tipo de ligante usado, podendo ser betume, emulsão betuminosa, ambos com ou sem rejuvenescedores, entre outros.

Tendo em conta estas variáveis referidas, podem ser então definidos os seguintes processos de reciclagem (F. Martinho, 2005):

- Reciclagem em central, a frio, com emulsão betuminosa;
- Reciclagem em central, a frio, com betume espuma;
- Reciclagem em central, semi-quente, com emulsão betuminosa;
- Reciclagem em central, a quente, com betume;

- Reciclagem *in situ*, a frio, com cimento;
- Reciclagem *in situ*, a frio, com emulsão betuminosa;
- Reciclagem *in situ*, a frio, com betume espuma;
- Reciclagem *in situ*, a quente, com betume.

Neste estudo, como se está a considerar o uso de um agente rejuvenescedor, é importante dar a conhecer, com mais detalhe, a técnica de reciclagem que faz uso daquele tipo de produtos e de que forma estes poderão ser envolvidos no processo de produção das misturas.

2.3.2 Reciclagem em central, a Quente, com betume e rejuvenescedor

Em Portugal, ainda é praticamente inexistente a reciclagem de pavimentos com o uso de agentes rejuvenescedores. Tal como o próprio nome indica, trata-se muitas vezes de uma técnica que visa fabricar misturas betuminosas a quente a partir de materiais fresados de pavimentos antigos, aos quais são adicionadas uma percentagem de agente rejuvenescedor relativamente ao betume existente e quantidades variáveis de betume e agregados novos para proceder a eventuais correções da mistura betuminosa, por forma a garantir uma qualidade comparável às misturas realizadas com materiais novos. É importante salientar, tal como refere Branco *et al.* (2005), que para que possam ser aplicadas taxas de reciclagem elevadas (percentagem de incorporação de misturas fresadas na mistura final), o pré-aquecimento do material fresado é bastante importante, caso contrário o recurso a materiais novos é inevitável, o que por sua vez diminui o interesse da aplicação da técnica em questão. Assim sendo, é preferível o recurso a centrais descontínuas que possibilitam uma produção de mistura por fornada, permitindo um melhor controlo da mesma contrariamente ao que acontece nas centrais contínuas.

A execução deste processo de reciclagem pode ser então descrita pelo seguinte conjunto de operações (adaptado de Branco *et al.*, 2005):

1. Estudo prévio da natureza e quantidades dos materiais passíveis de reciclar;
2. Fresagem e transporte do material fresado para central, seguida da sua caracterização, identificação da mistura e caracterização do ligante antigo;
3. Escolha do agente rejuvenescedor a utilizar por forma a repor as características do ligante envelhecido;
4. Formulação e produção da mistura desejada em central;
5. Transporte e aplicação da mistura em obra.

Na Figura 2.3, encontra-se uma representação esquemática do processo de reciclagem em central descontínua, estando assinalados os quatro modos de adicionar o material fresado neste tipo de centrais:

- (1) Num tambor/secador próprio (método fresado a quente);
- (2) Diretamente na misturadora (central de torre);
- (3) No elevador dos agregados (método fresado a frio);
- (4) Num anel envolvente ao tambor/secador (método *Recyclelean*).

A introdução do agente rejuvenescedor na mistura estará dependente do tipo de agente a utilizar. Para este estudo, em que o agente utilizado se trata de OAU, essa questão tem uma importância menor, uma vez que o óleo não requer um tratamento prévio, podendo ser introduzido no estado em que é fornecido (já depois de filtrado). Pensa-se que para se tornar uma operação viável e que não implique grandes alterações nas centrais, este teria de ser eventualmente introduzido diretamente na unidade de mistura em conjunto com os restantes materiais.

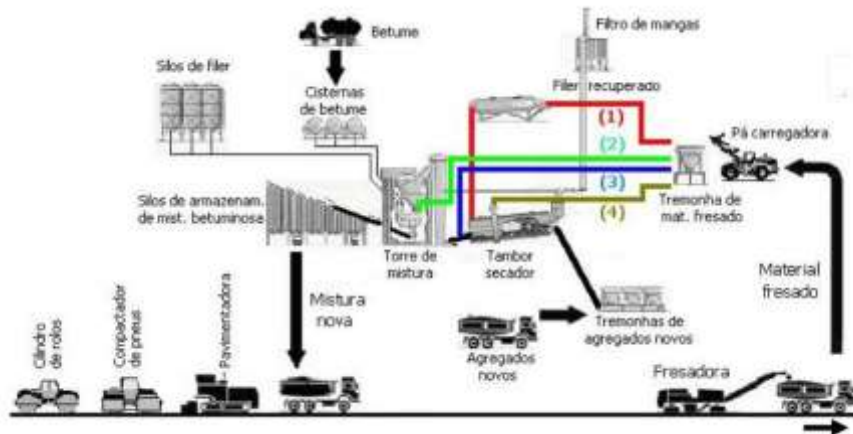


Figura 2.3 – Reciclagem em central descontínua de mistura betuminosa a quente com betume (F. Martinho, 2005)

2.4 Agentes rejuvenescedores

Como já se pôde inferir do descrito, tendo em conta as ações a que um pavimento está sujeito, as condições do mesmo vão sendo deterioradas ao longo do tempo. Essa deterioração é particularmente visível nas camadas superiores do pavimento, nomeadamente na camada de desgaste e são resultantes do impacto das cargas provocadas pelos veículos e ainda pela ação dos agentes climáticos. Na origem destas degradações, está o envelhecimento do betume, que ao longo do seu período de vida útil modifica as suas propriedades, tornando-se menos funcional e, portanto, menos resistente às ações a que está sujeito. Por tudo isto, as intervenções de conservação ao nível das camadas superiores dos pavimentos são as mais implementadas, principalmente em estradas de baixo tráfego.

As intervenções de requalificação de estradas de baixo tráfego em Portugal têm geralmente sido efetuadas através da reabilitação das características de superfície do pavimento (selagem de fendas ou tapagem de covas), sendo que, em casos mais extremos é reconstruída a totalidade das camadas afetadas com recurso a novos materiais. Todavia, estas soluções têm as suas desvantagens. No primeiro caso, o número excessivo de intervenções tem impacto ao nível da superfície de rodagem, tornando-a mais irregular ao logo do tempo e no segundo caso, a aquisição de materiais novos, necessários para a reconstrução das camadas, especialmente o betume, tornam a solução bastante onerosa e muitas vezes incomportável para os gestores da rede em causa (municípios principalmente). Para além disto, do resultado destas operações de reconstrução, é obtido ainda material fresado que é conduzido a vazadouro e que na esmagadora maioria das vezes é desaproveitado.

Posto isto, e uma vez que a sociedade caminha cada vez mais para uma lógica de economia circular (reaproveitamento e reutilização de todos os materiais utilizáveis, valorizando-os em aplicações idênticas ou diversas), novas soluções devem ser equacionadas por forma a garantir a sustentabilidade das operações de requalificação das estradas. Devem ser encontradas soluções que permitam requalificar estas mesmas estradas, garantindo condições de operação idênticas às iniciais e um custo de construção se possível inferior ao praticado numa operação de requalificação normal.

Ora, é nesse sentido que surgem os agentes rejuvenescedores. Trata-se de um tipo de materiais que são utilizados no fabrico de misturas betuminosas, nomeadamente quando usadas na camada de desgaste e de regularização, quando são compostas por percentagens elevadas de material fresado, e permitem que o betume envelhecido presente no material fresado readquiria propriedades semelhantes às que tinha no seu estado inicial (Baghaee Moghaddam e Baaj, 2016)

Para entender o funcionamento destes agentes, primeiramente é necessário entender o processo de envelhecimento do betume presente nas misturas betuminosas. De uma forma geral, o betume pode ser caracterizado em duas frações: Asfaltenos e Maltenos. Os asfaltenos representam a fração de coloração preta, são os componentes mais estáveis no betume e representam a fração insolúvel. Já os maltenos, são constituídos por compostos saturados, aromáticos e resinas, que correspondem à fração solúvel. O rácio maltenos/asfaltenos é responsável pelo desempenho das misturas betuminosas e ao longo do tempo de serviço esse rácio é diminuído por processos de oxidação do betume (Figura 2.4), tornando-o endurecido e, portanto, menos flexível.

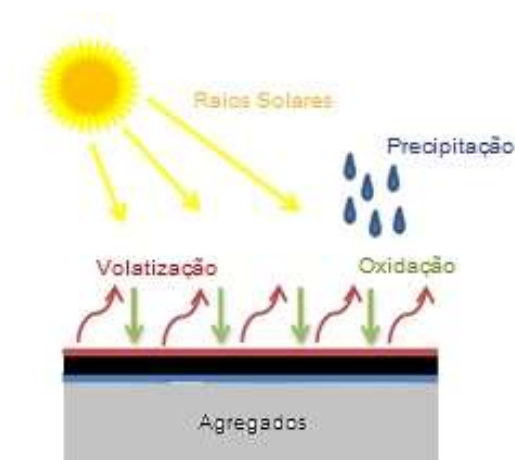


Figura 2.4 – Processo de envelhecimento do betume (adaptado de Moghaddam e Baaj, 2016)

O uso dos agentes rejuvenescedores tem como objetivo principal a reposição desse rácio maltenos/asfaltenos, que é diminuído ao longo do tempo, para valores aceitáveis, restituindo assim o betume a um estado semelhante ao inicial. No entanto, para que isso possa ser possível, é necessário ter em conta que essa capacidade de reposição de propriedades encontra-se diretamente ligada à homogeneidade do ligante final. Tal como afirma Dony *et al.* (2013), fatores como o método de rejuvenescimento, o equipamento usado, o tipo de agente rejuvenescedor, o método de introdução do rejuvenescedor e do material fresado na mistura, e ainda as condições de tempo e temperatura de mistura durante a produção da mesma, são fatores importantes e que influenciam essa homogeneidade do ligante final e, por conseguinte, o desempenho da mistura. Assim sendo, o nível de interação entre

o betume envelhecido e o agente rejuvenescedor deve ser tido em conta, uma vez que condiciona os fatores descritos anteriormente. B.F. Bowers, (2013), ilustra três graus de interação possíveis, os quais se encontram representados na Figura 2.5.

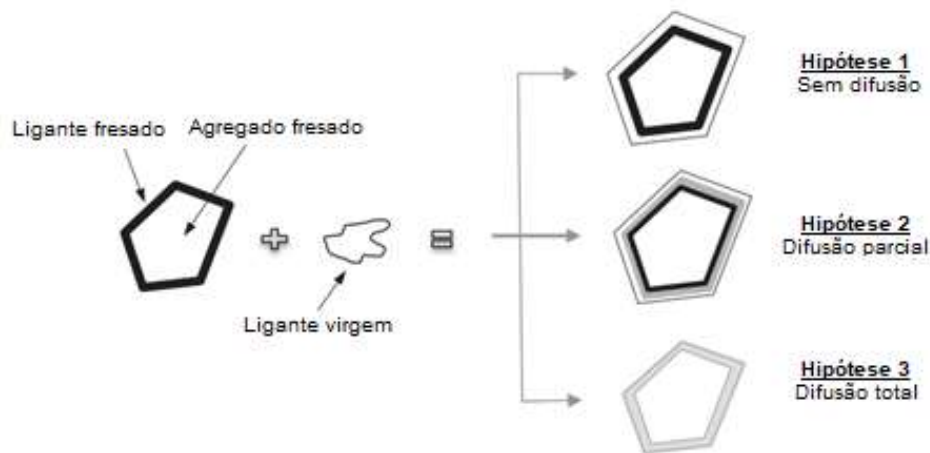


Figura 2.5 – Possíveis cenários de difusão do agente rejuvenescedor no ligante reciclado (adaptado de Moghaddam e Baaj, 2016)

Como se pode verificar, existe a possibilidade de não ocorrer qualquer tipo de interação entre o material fresado e agente rejuvenescedor. Este fenómeno ocorre quando o material fresado se comporta como “black rock”, (termo anglo saxónico para denominar um agregado envolvido em betume envelhecido), em que este não interage quimicamente com um rejuvenescedor, podendo ter a tradução direta de “agregado preto”. No dimensionamento de misturas recicladas com agentes rejuvenescedores, inicialmente era assumida a impossibilidade desta ocorrência, ou seja, era assumida sempre uma difusão total do agente. No entanto, a maioria dos casos mostra que uma difusão parcial é o cenário que ocorre mais frequentemente (Zhao *et al.*, 2016). Tendo isso em conta, antes de estimar uma possível adequação da mistura final, devem ser realizados os respetivos ensaios de caracterização afim de avaliar o seu comportamento.

Atualmente existe uma grande variedade de agentes rejuvenescedores, cada um deles das mais variadas origens. A título de exemplo destacam-se os óleos de plantas, óleos derivados de resíduos, como é o caso do óleo de motor e o óleo alimentar, extrato aromático, fibras de plástico, entre outros. O objetivo deste estudo, tal como foi referido, incide exclusivamente no uso de óleo alimentar usado, no entanto, é importante mencionar que o uso de qualquer um destes tipos de agentes, tal como foi referido em Zaumanis *et al.* (2014), deve obedecer a um conjunto de critérios. A curto prazo o rejuvenescedor deve ser difundido rapidamente no ligante do material fresado, por forma a evitar a redução de fricção e diminuir a suscetibilidade às deformações permanentes da mistura rejuvenescida. A longo prazo as propriedades químicas do betume envelhecido devem ser alteradas por forma a minimizar a fadiga e o fendilhamento a baixas temperaturas. Todas estas alterações químicas devem ocorrer sem prejudicar as propriedades resistentes à deformação. A Figura 2.6 ilustra de uma forma simplificada o efeito de um agente rejuvenescedor na composição química de um betume envelhecido.

Toda esta complexidade na formulação da mistura, representa porventura a maior limitação do uso de misturas recicladas com agentes rejuvenescedores. Em *Moghaddam e Baaj, (2016)*, é descrito que um pavimento reciclado dimensionado de forma pouco rigorosa, provoca uma diminuição do seu tempo de serviço expectável, o que no final poderá acabar por se traduzir em maiores custos de manutenção e maiores emissões.

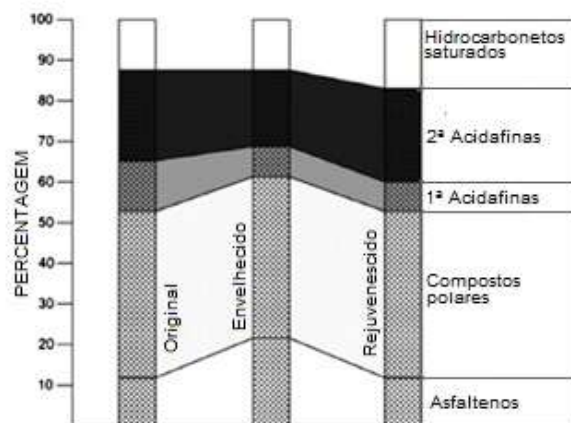


Figura 2.6 – Alterações químicas no ligante envelhecido e rejuvenescido (adaptado de Moghaddam e Baaj, 2016)

Contudo, controlados minimamente todos estes aspetos referidos até agora, torna-se possível a definição de um processo de produção de misturas recicladas rejuvenescidas, que seja adaptado aos intervenientes que participam na produção das mesmas, ou seja, possibilita a criação de um processo de produção simples e que não requer alterações drásticas tanto no modo de produção das misturas, como no equipamento usado para esse efeito.

2.5 Uso de óleo alimentar usado (OAU)

2.5.1 Considerações gerais

O óleo alimentar é amplamente utilizado na indústria alimentar para a confeção de alimentos, tanto no setor da restauração, como para uso doméstico. O OAU, resultante destas atividades, trata-se de um problema ecológico e ambiental devido à sua disposição massiva em aterros municipais e condutas, sem qualquer tipo de tratamento (*Singh-Ackbarali et al., 2017*). Como tal, é bastante importante a avaliação do seu potencial como agente rejuvenescedor de betume, uma vez que possibilitará, por exemplo, a realização da reciclagem total de misturas betuminosas fresadas, a serem recolocadas em pavimentos de desempenho menos exigente. Essa possibilidade, traz consigo não só vantagens económicas, visto que a reutilização dos materiais permite a diminuição dos custos de construção, mas também vantagens ambientais, uma vez que são diminuídos os desperdícios tanto de óleo alimentar como de material fresado conduzido a vazadouro, e é ainda reduzida a dependência de novos materiais, o que se traduz em menores emissões.

Por forma a iniciar o processo de produção de misturas betuminosas rejuvenescidas por OAU, é necessário ter um conhecimento *à priori* das implicações que a inclusão do mesmo tem no betume

envelhecido. Esse estudo já foi realizado ao longo de vários anos por diversos autores, tais como, Sun *et al.* (2016), Chen *et al.* (2014), ou ainda Zargar *et al.* (2012), e de modo geral, pelos resultados obtidos por cada um deles, é seguro afirmar que os efeitos da inclusão do mesmo são positivos, ou seja, o betume envelhecido parece readquirir propriedades semelhantes às que o caracterizavam no seu estado inicial. No entanto, os esforços dedicados a esta solução não são ainda de modo a que possa haver uma utilização generalizada da mesma, pelo que a caracterização de misturas betuminosas recicladas a partir de OAU deve ser ainda realizada por forma a contribuir para uma validação mais segura de todos os procedimentos relativos ao seu fabrico e aplicação.

2.5.2 Efeitos do óleo alimentar usado em betume asfáltico

Nos estudos já realizados relativamente ao uso de OAU, este foi diluído no betume, envelhecido ou não, em pequenas percentagens, geralmente, entre 1 e 10%, por peso de betume. Na maioria destes estudos, geralmente, este óleo foi diluído diretamente no betume, passando apenas por um processo de filtração por forma a retirar partículas mais grosseiras que se encontram em suspensão. No entanto, existem casos, em que o mesmo é submetido a um processo de modificação das suas propriedades químicas.

Para efetuar a diluição do óleo no betume, foi utilizado um método de mistura direta, uma vez que se trata de um método barato e simples de replicar. Neste processo, o betume é aquecido até uma determinada temperatura, e de seguida a percentagem de óleo escolhida é introduzida e difundida com recurso a um agitador mecânico, durante um determinado período de tempo e a uma determinada velocidade. Nos estudos realizados, as condições de diluição usadas pelos diversos autores não foram semelhantes entre eles. No Quadro 2.1 encontram-se exemplos de configurações usadas por alguns deles.

Quadro 2.1 – Exemplos de configurações de diluição de OUA utilizadas por diversos autores

% OAU utilizada	Temperatura (°C)	Velocidade de rotação (rpm)	Tempo de diluição	Referencia
2, 3, 4 e 6	160	200	18 horas	Mahrez <i>et al.</i> (2009)
1, 2, 3, 4 e 5	130	200	30 min	Asli <i>et al.</i> (2012)
1, 2, 3, 4 e 5	160	200	30 min	Zargar <i>et al.</i> (2012)
5 e 10	145	200	15 min	Chen <i>et al.</i> (2014)
2, 4, 6 e 8	135	5000	40 min	Sun <i>et al.</i> (2015)
3, 4 e 5	160	1000	1 hora	Azahar <i>et al.</i> (2016)
2, 4, 6, 8 e 10	200	3000	-	Singh-Ackbarali <i>et al.</i> (2017)

A partir das configurações de diluição utilizadas pelos diversos autores, torna-se perceptível que o possível sucesso do rejuvenescimento do ligante está então dependente de vários parâmetros. O uso de diversas percentagens de óleo é, evidentemente, um fator que demonstra essa variabilidade de soluções que por sua vez é bastante influenciada pelo tipo que betume envelhecido com que interage.

Assim sendo, para avaliar o possível efeito da diluição do OAU no betume envelhecido, vários testes foram realizados por forma a caracterizar as propriedades do betume modificado. Entre elas, destacam-se as propriedades como a penetração, o ponto de amolecimento, a viscosidade e ainda o módulo complexo de corte (G^*) e o ângulo de fase (δ). Para além destas, alguns autores recorreram ainda a propriedades como a temperatura na rotura, o fator de resistência à deformação ($G^*/\sin\delta$) e ainda o fator de resistência ao fendilhamento ($G^*\sin\delta$).

No que diz respeito às propriedades referidas anteriormente, é importante referir que tanto o fator de resistência à deformação, como o fator de resistência ao fendilhamento, são propriedades reológicas determinadas a partir de testes realizados ao betume e que cuja análise permite prever um possível comportamento de uma futura mistura betuminosa contendo esse betume. No caso do fator $G^*/\sin\delta$, valores mais elevados resultarão em possíveis valores mais elevados de resistência à deformação permanente dessa mistura e no caso do fator $G^*\sin\delta$, valores mais elevados resultarão em possíveis valores mais reduzidos de resistência ao fendilhamento dessa mistura.

Nos parágrafos seguintes descrevem-se de uma forma geral os estudos mais relevantes encontrados na literatura, quais os seus objetivos e as suas conclusões mais importantes.

Mahrez *et al.* (2009), estudou o rejuvenescimento de dois betumes envelhecidos e comparou os resultados com o betume virgem que os originou. Para obter esse grau de envelhecimento foram utilizados dois métodos diferentes, um deles recorrendo ao *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT, ASTM D 2872) e um outro recorrendo a um agitador mecânico. Depois de produzidos os betumes envelhecidos, foi introduzido e misturado o OAU em percentagens de 2%, 3%, 4% e 6% da massa de betume. Os resultados obtidos foram bastantes promissores, uma vez que a adição de óleo permitiu restabelecer o betume envelhecido. Os resultados do ensaio de penetração mostraram um aumento do grau de penetração com a adição de OAU, ao passo que os resultados dos ensaios de ponto de amolecimento e viscosidade mostraram um decréscimo com a adição do mesmo. Para atingir valores semelhantes ao betume original nestas propriedades, foi necessária uma percentagem de 3% e 6% para o betume envelhecido por RTFOT e agitador, respetivamente. A adição de OUA originou ainda uma diminuição do módulo complexo de corte e um aumento do ângulo de fase, sendo necessária uma percentagem de 6% ou superior, para restabelecer os betumes envelhecidos por RTFOT e misturadora, respetivamente.

Asli *et al.* (2012), utilizou um betume de destilação direta 80/100 como amostra de controlo, o qual foi envelhecido recorrendo a um agitador mecânico, por forma a simular três grupos de envelhecimento, caracterizados pelos graus de penetração, 30/40, 40/50 e 50/60. Seguidamente, a cada um desses grupos, foi introduzido e misturado OAU em percentagens de 1% a 5% da massa de betume. Esses grupos foram posteriormente testados e comparados com o betume original. Ao longo

do estudo foram avaliadas propriedades como o grau de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e ainda o rácio asfaltenos/maltenos. Após a realização dos ensaios, foi determinada a percentagem ótima de OAU para cada grupo e foi efetuada uma análise estatística ANOVA (fator único) com um intervalo de confiança de 95%, por forma a avaliar a existência ou não, de uma diferença significativa entre o betume original e o rejuvenescido. As conclusões obtidas pelos autores são os seguintes:

- A análise ANOVA confirma que não existe diferença significativa entre o betume rejuvenescido e o original. Os valores do ensaio de penetração mostram que para o grupo 50/60 rejuvenescido com 1% de OAU, uma quantidade inferior de óleo seria por ventura, suficiente para efetuar o rejuvenescimento, no entanto, os valores dos ensaios de ponto de amolecimento e viscosidade contrariam essa hipótese, mantendo a quantidade de 1% de OUA estabelecida;
- Para o grupo 40/50, os ensaios realizados mostram que uma percentagem entre 3% a 4% de OAU seria suficiente para rejuvenescer o betume ao seu estado original. Essa hipótese é confirmada pela análise ANOVA, uma vez que não é detetada uma diferença significativa entre os betumes original e rejuvenescido;
- O mesmo acontece para o grupo 30/40, neste caso os ensaios indicam que uma percentagem entre 4% e 5% de OAU seria suficiente para efetuar o rejuvenescimento, valores esses confirmados pela análise ANOVA;
- Comparando o rácio asfaltenos/maltenos, obtido pelos grupos rejuvenescidos, com o betume original 80/100, mostra-se que o mesmo é reduzido com a adição de OAU, o que ilustra o efeito rejuvenescedor do mesmo. No entanto, o rejuvenescimento não é o suficiente para restabelecer o rácio a valores apresentados pelo betume original.

Zargat *et al.* (2012), recorreu também a um betume original com um grau de penetração 80/100 e também ele foi envelhecido através dum agitador mecânico por forma a simular um envelhecimento a longo prazo. O grau de penetração do betume resultante desse processo foi o 40/50, ao qual foram adicionadas percentagens de OAU de 1% a 5% da massa de betume. Relativamente às propriedades estudadas, foi avaliado o grau de penetração, o ponto de amolecimento, a viscosidade, o índice de envelhecimento e ainda o módulo complexo de corte e o ângulo de fase. A adição de OAU levou a um aumento da penetração e do ângulo de fase, e a uma diminuição das restantes propriedades. Através dos resultados obtidos os autores concluem que o betume envelhecido pode ser rejuvenescido a partir do OAU, uma vez que este satisfaz todos os critérios físicos e reológicos. Para tal, uma percentagem de OAU entre os 3% e 4% seria o necessário. Além disso, concluem também que o betume rejuvenescido tem uma tendência menor para o envelhecimento a curto prazo, quando comparado com o betume original.

Chen *et al.* (2014), investigou as propriedades reológicas a altas temperaturas de betume envelhecido, rejuvenescido através de três tipos de agentes diferentes: um rejuvenescedor, sementes de algodão e OAU. Para tal foi utilizado um betume original PG 64-22 que é aproximadamente um betume 50/70, como amostra de referência, e ainda três betumes envelhecidos provenientes de origens

diferentes, aos quais foram adicionados betume original e ainda percentagens de 5% e 10% da massa de betume, dos respetivos agentes escolhidos. Seguidamente, esses betumes foram testados a temperaturas elevadas e foram determinadas propriedades tais como o fator resistência à deformação, o ângulo de fase, o módulo complexo de corte e, ainda, a temperatura na rotura. Com base no comportamento dos três betumes rejuvenescidos ao longo dos testes executados, os autores retiram as seguintes conclusões:

- A adição de todos os agentes utilizados reduziu o fator de resistência à deformação, independentemente da origem do betume envelhecido, sugerindo uma possível redução da resistência à deformação permanente de uma futura mistura betuminosa. Cerca de 5% de OAU, permitiu reduzir esse fator, para valores característicos do seu estado original;
- O ângulo de fase aumentou com a adição de qualquer um dos agentes utilizados. Quando comparados entre si, 5% de OAU permitiu um aumento mais significativo em relação aos restantes agentes utilizados;
- O módulo complexo de corte diminuiu com a adição de qualquer um dos agentes utilizados. Cerca de 5% de OAU ou de sementes de algodão, permitiu uma diminuição mais significativa do módulo, quando comparados com o rejuvenescedor;
- Por norma, a temperatura na rotura diminuiu com a adição dos agentes. Cerca de 5% de OAU ou sementes de algodão, pode ser encarada como a dosagem ótima para produzir betume PG 64-22 a partir de betume envelhecido;
- Tal como era esperado, a viscosidade também foi diminuída com qualquer um dos agentes, no entanto, essa diminuição foi mais significativa com o uso de OAU.

Sun *et al.* (2015), estudaram as propriedades do betume asfáltico modificado com bio óleo. Neste caso o processo foi diferente dos estudos referidos anteriormente uma vez que o OAU utilizado sofreu um processo de modificação das suas propriedades (Figura 2.7), dando origem ao bio óleo (Figura 2.8)

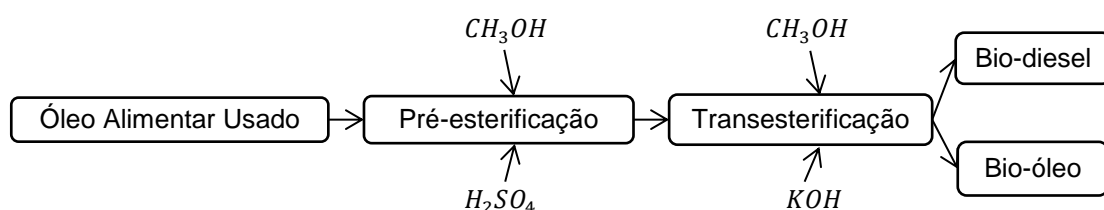


Figura 2.7 – Processo de tratamento do OAU (adaptado Sun *et al.*, 2015)

Para o estudo em questão foi utilizado um betume com um grau de penetração 40/60 como amostra de controlo, ao qual foram adicionadas e misturadas percentagens de 2%, 4%, 6% e 8% de bio óleo da massa de betume. Primeiramente foram comparadas as propriedades químicas tanto da amostra de controlo e do bio óleo e seguidamente foram avaliadas as propriedades físicas e reológicas dos betumes rejuvenescidos. No que diz respeito às propriedades químicas, chegou-se à conclusão

que o bio óleo, comparativamente com o betume 40/60 de controlo, apresentava quantidades mais baixas de asfaltenos e componentes aromáticas, e quantidades mais elevadas de componentes saturados e resinas. Não foi encontrada qualquer reação química aquando da mistura do bio óleo com o betume. Relativamente às propriedades físicas e reológicas, a tendência manteve-se em relação aos autores anteriores. A adição de bio óleo aumentou o grau de penetração e a ductilidade, e diminuiu o ponto de amolecimento e a viscosidade. De forma semelhante, o módulo complexo de corte diminuiu e o ângulo de fase aumentou, quando submetido a média e altas temperaturas, o que significa que a resistência à deformação permanente e a resposta elástica de uma futura mistura betuminosa pode ser diminuída. Para além disto, conclui-se que a adição de bio óleo diminuiu a rigidez a baixas temperaturas, o que mais uma vez pode ser traduzido numa melhor resistência ao fendilhamento de uma futura mistura betuminosa.



Figura 2.8 – Óleo tratado/Bio-óleo (direita) e óleo não tratado (esquerda) (Azahar *et al.*, 2016)

Azahar *et al.* (2016), à semelhança dos autores precedentes, também estudaram as implicações da modificação química do OAU nas propriedades físicas e reológicas do betume. Neste caso, foi usado um betume de controlo com um grau de penetração 60/70. Este betume foi misturado com percentagens de 3%, 4% e 5% de OAU tratado e não tratado, posteriormente separado em duas amostras, uma delas contendo o betume envelhecido e a outra o betume não envelhecido. Seguidamente, essas duas amostras foram submetidas a testes, sendo comparadas entre si e com o betume original. Após efetuados todos os testes, os autores concluíram o seguinte:

- A modificação química do OAU levou a uma redução da sua acidez, melhorando as propriedades físicas e reológicas do betume modificado. Esta melhoria provocada pela menor acidez, deveu-se à maior e mais forte ligação entre as partículas do betume e o OAU modificado;
- A penetração do betume com OAU tratado diminuiu quando comparado com o do betume com OAU não tratado, ao passo que, o ponto de amolecimento e a viscosidade aumentaram;
- O betume com OAU tratado apresentou uma melhoria das propriedades reológicas, relativamente ao betume OAU não tratado. Maiores temperaturas na rotura foram atingidas, o fator de resistência à deformação aumentou e a suscetibilidade à temperatura foi diminuída;

- Comparativamente ao betume de controlo, o desempenho reológico do betume com OAU modificado ainda se encontra abaixo do esperado, no entanto, em propriedades como a temperatura na rotura, os resultados obtidos foram bastante aproximados aos valores pretendidos.

Singh-Ackbarali *et al.* (2017), investigaram o uso de OAU como agente rejuvenescedor utilizando betumes TLA e TPB (*Trinidad Lake Asphalt* e *Trinidad Petroleum Bitumen*). Sendo que o primeiro se trata de um betume natural obtido de asfalto existente em lagos, e o segundo se trata de um betume asfáltico convencional, ambos preparados e fornecidos por uma empresa de Trinidad e Tobago. Os dois betumes foram misturados com percentagens de OAU de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% e seguidamente foram avaliadas as suas propriedades reológicas. Quando comparados com os restantes betumes utilizados em estudos anteriores, os resultados obtidos foram bastante semelhantes. Os autores concluem que a adição de OAU diminui a rigidez e o fator de resistência à deformação e aumenta o fator de resistência ao fendilhamento dos dois betumes, relativamente ao seu estado inicial. Quanto a cada betume em si, a adição de OAU provocou um aumento dos valores iniciais do ângulo de fase no TLA reduzindo a sua elasticidade, ao passo que no TPB esse ângulo de fase foi diminuído, tornando-se mais elástico. O conjunto de resultados obtidos pelo TLA, tanto no ângulo de fase como na rigidez, confirmam a sua superioridade relativamente ao TPB.

2.5.3 Efeitos do óleo alimentar usado em misturas betuminosas 100% recicladas

Contrariamente ao que sucede com os efeitos provocados em betume asfáltico, os estudos acerca de misturas betuminosas modificadas com a inclusão de OAU ainda são incipientes, especialmente para misturas recicladas. De entre a literatura disponível, destaca-se sobretudo o estudo realizado por Zaumanis *et al.* (2015), que tem como objetivo a avaliação do desempenho de misturas 100% recicladas, rejuvenescidas a partir de seis diferentes tipos de agentes rejuvenescedores, entre os quais se encontra o OAU.

Antes de proceder à avaliação do seu desempenho, naturalmente foi definida uma “receita” para a produção das misturas recicladas. Para a formulação dessa “receita”, foram recolhidas misturas betuminosas de pavimentos fresados do estado de New Jersey, EUA, as quais, tinham um teor em ligante de cerca de 6,2%, por massa de mistura. Por forma a cumprirem determinados critérios de formulação, essas misturas recolhidas, tiveram de ser peneiradas para garantir a granulometria desejada. Na Figura 2.9, encontra-se representada a sua composição final, a qual apresentava um teor em ligante de cerca de 5,3%.

Relativamente às misturas recicladas, foram produzidas seis misturas, cada uma delas adicionando 12% de agente rejuvenescedor por massa de betume à mistura recolhida, correspondendo a um teor em ligante final de 5,94%. Para efeitos comparativos, foram ainda produzidas duas misturas de referência, uma delas adicionando 12% de betume virgem por massa de betume à mistura recolhida (tal como sucedeu com os agentes rejuvenescedores), cuja designação é de “fresado”, e ainda uma mistura virgem, contento apenas os agregados recolhidos e adicionando 5,94% de betume novo. Esta mistura foi designada de “mistura virgem”.

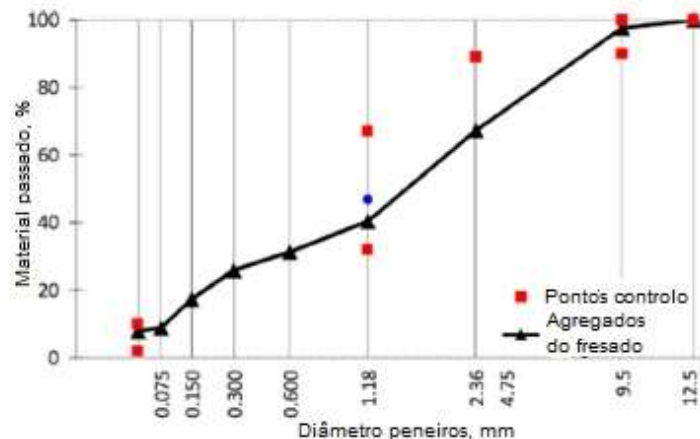


Figura 2.9 – Fuso 9.5 mm “*superpave*” e granulometria do material 100% reciclado (adaptado de Zaumanis *et al.*, 2015)

Por forma a facilitar a análise dos resultados obtidos pelos autores e tornar a informação disponível menos densa, no Quadro 2.2 encontra-se a legenda com todos os agentes rejuvenescedores utilizados e as suas respetivas abreviaturas.

Quadro 2.2 - Agentes rejuvenescedores utilizados em Zaumanis *et al.* (2014), e respetivas abreviaturas

Misturas estudadas	Abreviatura
Mistura virgem	MV
Fresado	F
Extrato aromático	EA
Óleo de motor usado	OMU
Óleo de resina destilado	ORD
Óleo alimentar usado	OAU
Concentrado de óleo alimentar	COA
Óleo orgânico	OO

Para a avaliação do desempenho de cada mistura, tanto as seis misturas recicladas, como as duas misturas de referência, foram submetidas a um conjunto de testes, por forma a avaliar as suas propriedades mais importantes. No caso de estudo em questão, os testes realizados tiveram como objetivo a avaliação da resistência à deformação permanente, da resistência à fadiga e da trabalhabilidade das misturas. Nas figuras 2.10 a 2.13, encontram-se representados os resultados obtidos pelos autores para cada uma das misturas recicladas e ainda a sua comparação com as misturas de referência. Uma vez que o objetivo da dissertação, recai sobre o uso de OAU como agente rejuvenescedor, apenas os resultados referentes a esta mistura são relevantes e passíveis de análise.

A partir dos resultados obtidos pelos autores, nos diferentes tipos de ensaios executados, foram retiradas as seguintes conclusões, relativamente à mistura rejuvenescida com OAU:

- No que diz respeito à resistência à deformação permanente, a partir do ensaio de *wheel-tracking* (Figura 2.10) é possível verificar que a mistura cumpriu os requisitos necessários, uma vez que não excedeu a deformação máxima representada no gráfico antes de atingidos os 10.000 ciclos. Quando comparado com a “mistura virgem”, o desempenho apresentado é claramente superior. No entanto, tal pode dever-se ao facto da formulação pouco rigorosa da mesma para efeitos comparativos, nomeadamente na quantidade de ligante virgem adicionado e ainda no processo de aquecimentos dos agregados recolhidos, resultando na perda da fração fina.
- Em termos de trabalhabilidade (Figura 2.11), a avaliação da mesma foi efetuada a partir do número de giros necessários para atingir uma percentagem de 8% de vazios na mistura. Tal como era esperado a mistura rejuvenescida, melhorou a trabalhabilidade quando comparada com o “fresado”, (F), no entanto, não o suficiente para atingir os valores apresentados pela “mistura virgem”, (MV).
- A suscetibilidade à fadiga (Figura 2.12) foi medida a partir do potencial de deformação da mistura. Esta propriedade é caracterizada pelo inverso da rigidez, ou seja, quanto maior for o potencial de deformação, menor a probabilidade do fendilhamento apresentado pela mistura. Tendo em conta os resultados obtidos, naturalmente o “fresado”, (F), apresentou o menor potencial de deformação, sendo por isso bastante rígida. Contrariamente, a mistura rejuvenescida por OAU, apresentou um potencial de deformação bastante superior, superando mesmo os valores apresentados por uma mistura virgem. Simultaneamente, foi também avaliada a resistência à tração da mistura (Figura 2.12), que no caso da mistura rejuvenescida por OAU, os valores apresentados foram inferiores aos atingidos pelas misturas de referência.
- Relativamente à resistência à fadiga (Figura 2.13), esta foi medida a partir da propriedade *FWoDe* (*fracture work density*). Valores mais elevados da mesma correspondem a valores mais elevados de resistência à fadiga por parte da mistura. Pelos resultados apresentados foi possível verificar que a mistura rejuvenescida com OAU, apresentou uma resistência à fadiga semelhante ao “fresado”, (F). Relativamente à “mistura virgem”, (MV), esta apresentou um valor bastante superior, no entanto uma otimização da quantidade de ligante na “mistura virgem” iria aproximar ambos os valores.

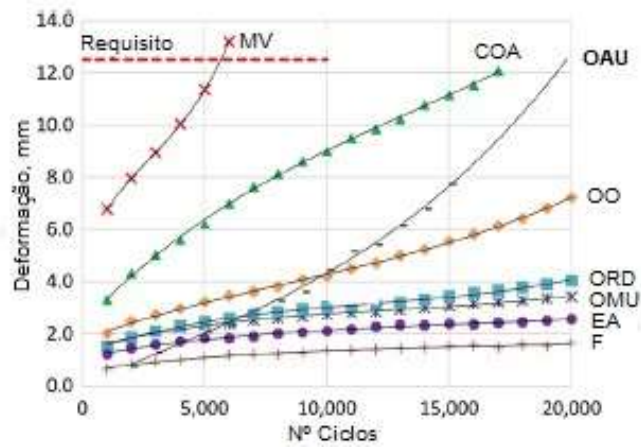


Figura 2.10 – Resultados obtidos do *wheel-tracking* (adaptado de Zaumanis *et al.*, 2015)

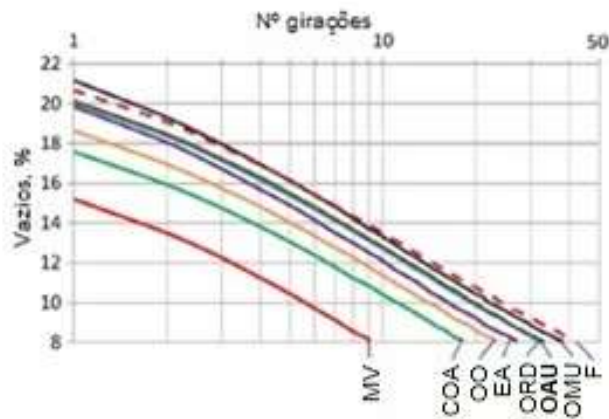


Figura 2.11 – Resultados obtidos da trabalhabilidade (adaptado de Zaumanis *et al.*, 2015)

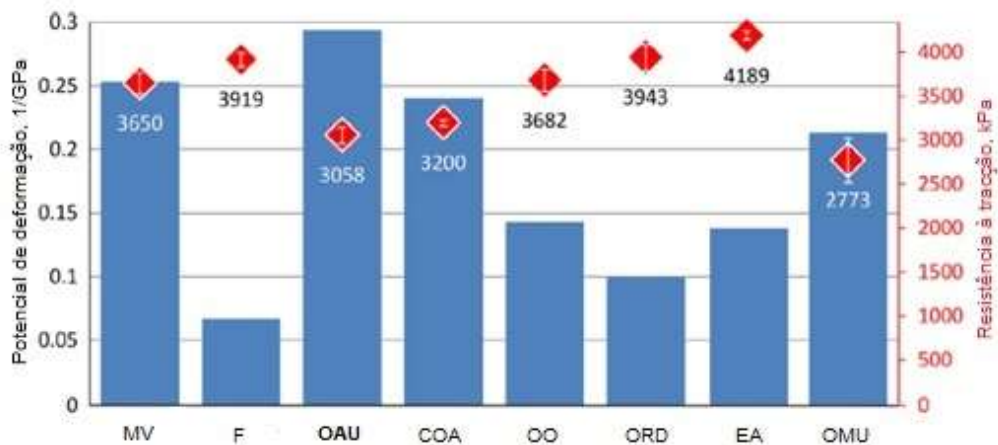


Figura 2.12 – Resultados obtidos do potencial de deformação e resistência à tração a 10°C (adaptado de Zaumanis *et al.*, 2015)

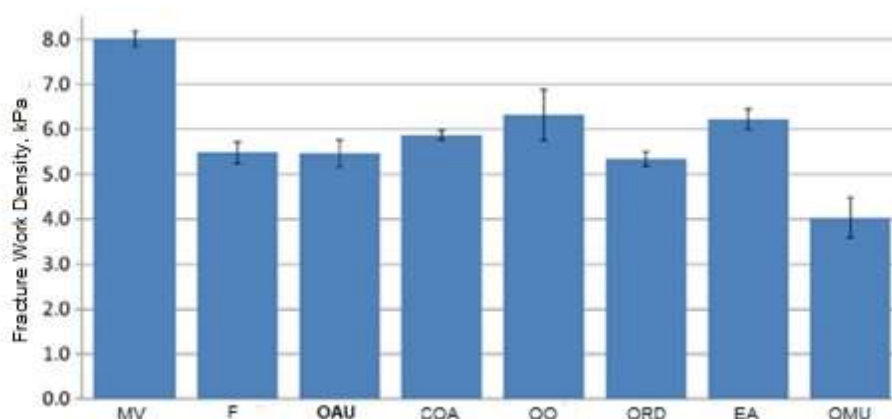


Figura 2.13 – Resultados obtidos da *Fracture work density* (FWoDe) (adaptado de Zaumanis *et al.*, 2015)

2.5.4 Considerações finais

De uma forma geral, os estudos realizados acerca da influência do uso de OAU em betumes envelhecidos, mostraram melhorias nas propriedades dos mesmos. Uma correta dispersão do OAU, originou um aumento da penetração, uma diminuição do ponto de amolecimento e ainda uma diminuição da viscosidade do betume em que é aplicado, em alguns casos para valores característicos do estado original do mesmo. A rigidez dos betumes rejuvenescidos foi também diminuída, o que se traduz numa melhor resistência ao fendilhamento, por parte de possíveis misturas betuminosas contendo esses mesmos betumes. No entanto, para médias e altas temperaturas, verificou-se um aumento do ângulo de fase e uma diminuição do fator resistência à deformação, o que se traduz numa possível maior suscetibilidade das misturas betuminosas às mesmas. Conclui-se que estas alterações de propriedades estão diretamente ligadas ao tipo de betume que se pretende recuperar e a percentagem de óleo utilizada para a recuperação do mesmo.

Relativamente ao uso de OAU em misturas betuminosas, atualmente os estudos realizados para determinar os efeitos do óleo sobre as mesmas são bastante reduzidos. Zaumanis *et al.* (2015), foram os primeiros autores a estudar as implicações da sua utilização e no geral verificaram que o uso de OAU, permitiu melhorar algumas qualidades nas misturas recicladas, nomeadamente na suscetibilidade à fadiga.

Torna-se, portanto, evidente que há ainda um caminho a percorrer no que diz respeito à avaliação do uso de OAU como agente rejuvenescedor, nomeadamente na recuperação de misturas envelhecidas. Como tal, este estudo pretende contribuir para o avanço do conhecimento nesse âmbito, nomeadamente na viabilidade técnica e económica oferecida pela tecnologia em questão.

3. Estudo experimental

3.1 Considerações iniciais

Tal como foi referido, o objetivo do presente estudo passa pela caracterização de misturas betuminosas obtidas por fresagem de pavimentos existentes e rejuvenescidas pelo uso de óleo alimentar usado (OAU).

Inicialmente estava previsto a realização de três tipos de misturas, duas delas recicladas com OAU, contendo material fresado na ordem dos 85% e 100%, e ainda uma mistura de referência contendo materiais virgens, mas de origem semelhante aos fresados para fins comparativos. No entanto, devido a algumas condicionantes, não foi possível alargar o estudo a esse ponto, ficando o plano de trabalhos reduzido a apenas uma única mistura. A mistura estudada, correspondeu então a uma mistura com 100% de material fresado, rejuvenescida pela inclusão de 18% de OUA e ainda 1% de betume, por massa de betume.

De uma forma geral, o trabalho laboratorial realizado foi dividido em duas fases distintas. Uma primeira fase realizada no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), cujo objetivo passou por encontrar a “receita” de produção, isto é, definir as quantidades de óleo e betume a introduzir na mistura reciclada que simulassem as condições de uma mistura padrão, e uma segunda fase, realizada no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico (IST), cujo objetivo passou pela caracterização do desempenho da mistura definida.

Para realizar a caracterização da mistura escolhida, foram realizados ensaios para a determinação do seu módulo de deformabilidade, da sua capacidade de resistência à fadiga, da sua capacidade resistente à deformação permanente e ainda a sua sensibilidade à água. Todos eles foram executados segundo as normas usuais e serão descritos nas secções seguintes.

3.2 Primeira fase - Definição da “receita” de produção

No que diz respeito à definição da “receita” em si, foi efetuado um processo iterativo de tentativa e erro, no qual foram ensaiadas um total de sete combinações diferentes de óleo e betume. O plano de trabalhos realizado em cada uma das tentativas é representado pelo fluxograma explicativo da Figura 3.1, o qual foi executado com base na metodologia Marshall, de acordo com a norma EN 12697-34 (CEN 2004a) para a formulação de misturas betuminosas. Para além disso, na Figura 3.1 encontram-se ainda representadas as grandezas obtidas ao longo de todo o processo, grandezas essas que foram comparadas entre tentativas e ainda com os valores fornecidos pelo Caderno de Encargos da Infraestruturas de Portugal (IP, 2014), para camadas de desgaste, os quais se encontram no Anexo 1.

Importa referir que ao longo do processo de formulação da “receita” final, foi efetuada uma alteração quanto ao material fresado que estava a ser usado até então, e como tal, a mistura betuminosa de referência que deu origem ao mesmo também foi alterada. O motivo dessa alteração

baseou-se na qualidade do material fresado fornecido inicialmente, o qual foi mantido em vazadouro durante vários anos, sendo submetido a condições atmosféricas adversas. Essa fraca qualidade do fresado, praticamente um “black rock”, foi perceptível pela qualidade dos provetes fabricados, acabando por se traduzir posteriormente nos resultados obtidos, e como tal, a sua alteração teve de ser efetuada. A diferença entre os materiais fresados utilizados residiu apenas no tipo de agregado presente em cada um, e como tal, as condições de referência que estavam a ser usadas até então em cada uma das tentativas não foram alteradas significativamente. Assim sendo, a mistura final foi então formulada com um material fresado de origem quartzítica e tendo por base a mistura de referência AC 14 surf 35/50 (BB), a qual foi produzida com uma percentagem de betume de cerca de 5%.

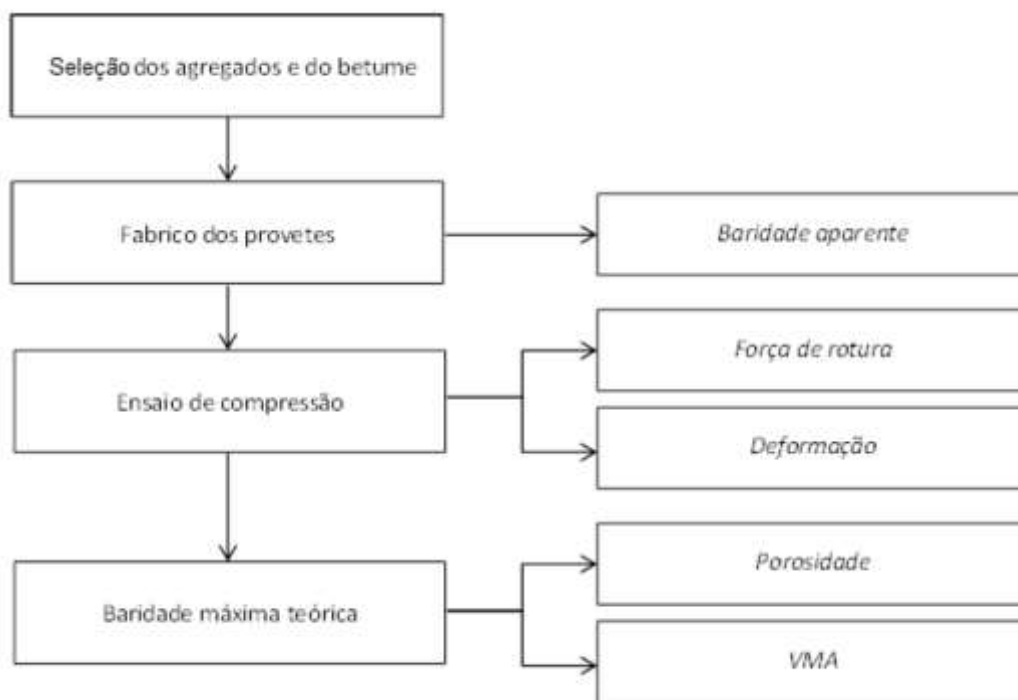


Figura 3.1 – Metodologia Marshall utilizada na fase experimental (Burguete, 2013)

No Quadro 3.1, encontra-se representado um resumo das tentativas executadas, que no final levaram à obtenção da mistura final. Note-se que as percentagens de betume apresentadas são referentes à massa total da amostra e as percentagens de OAU são referentes à massa total de betume presente na amostra. Uma vez que o processo de fabrico dos provetes e a sua caracterização foi executada de forma semelhante para todas as tentativas, nas secções seguintes, é feita uma descrição geral do processo, nomeadamente a caracterização dos materiais utilizados, o processo de fabrico dos provetes e ainda a descrição da metodologia Marshall efetuada.

Quadro 3.1 – Formulações das misturas betuminosas utilizadas em cada tentativa e respetiva formulação final

Tentativa	Origem do fresado	%betume no fresado	%betume virgem adicionado	%betume total	%OAU relativa ao betume no fresado
1	AC 14 surf 35/50 (BB) Gran	4,7	0,3	5	4
2	AC 14 surf 35/50 (BB) Gran	4,7	1,3	6	8
3	AC 14 surf 35/50 (BB) Gran	4,7	0,8	5,5	8
4	AC 14 surf 35/50 (BB)	4,5	1,5	6,0	8
5	AC 14 surf 35/50 (BB)	4,5	0,5	5	16
6	AC 14 surf 35/50 (BB)	4,5	1	5,5	16
7	AC 14 surf 35/50 (BB)	4,5	0,5	5,0	18
Formulação final	AC 14 surf 35/50 (BB)	4,5	1	5,5	18

3.2.1 Caracterização dos materiais em estudo

No que diz respeito ao fresado utilizado neste estudo, trata-se de um fresado obtido a partir da mistura betuminosa AC 14 surf 35/50 (BB), utilizada na camada de desagaste na autoestrada A23, sendo que este foi fornecido pela empresa JJR Construções, situada em Fátima. Para além do fresado em questão, a empresa forneceu ainda um relatório de produção e caracterização da mistura original, que é utilizado como referência aquando da discussão dos resultados obtidos neste estudo e ainda uma caracterização do fresado, executada posteriormente à sua remoção, por forma a obter a percentagem de betume presente no mesmo. Toda esta documentação, encontra-se disponível nos anexos 2 e 3.

Relativamente ao agregado presente no fresado, é constituído por quatro frações de agregados quartzíticos e uma fração calcária, distinguindo-se em pó calcário 0/4, quartzito 0/6.3, quartzito 4/10, quartzito 10/16 e ainda filer comercial. No Quadro 3.2 e na Figura 3.2 encontram-se representados os valores para a curva granulométrica da mistura original e a do fresado, assim como os limites superior e inferior definidos pelo caderno de encargos da IP (IP, 2014). A partir da Figura 3.2, é possível verificar que a granulometria do fresado é consideravelmente mais fina, tal deve-se ao esmagamento do agregado aquando da sua remoção. Para corrigir este cenário, seria necessário acrescentar agregado grosseiro à mistura, no entanto, a escolha de realizar uma mistura com 100% de material reciclado não permite fazê-lo, pelo que, foi usada a granulometria tal como foi obtida. Importa referir, que no caso da mistura original, a granulometria dos agregados foi definida pela norma NP EN 933-1 (IPQ 2014a).

Quadro 3.2 – Granulometria do fresado utilizado e da mistura de referência adequada ao fuso da IP

Diâmetro das partículas (mm)		20	16	10	4	2	0,5	0,125	0,063
Caderno de encargos	max	100	100	77	52	40	19	10	8
	min	100	90	67	40	25	11	6	5
Pó Calcário 0/4		100	100	100	99	69	32	9	7,1
Quartzito 0/6,3		100	100	100	83	53	24	11	6,6
Quartzito 4/10		100	100	81	1	1	1	1	0,5
Quartzito 10/16		100	72	4	1	0	0	0	0,3
Filer		100	100	100	100	100	100	88	72,5
Mistura original		100	94	73	47	32	16	8	5,1
Fresado		100	97,2	87,2	61,2	45,4	25,5	14	10,2

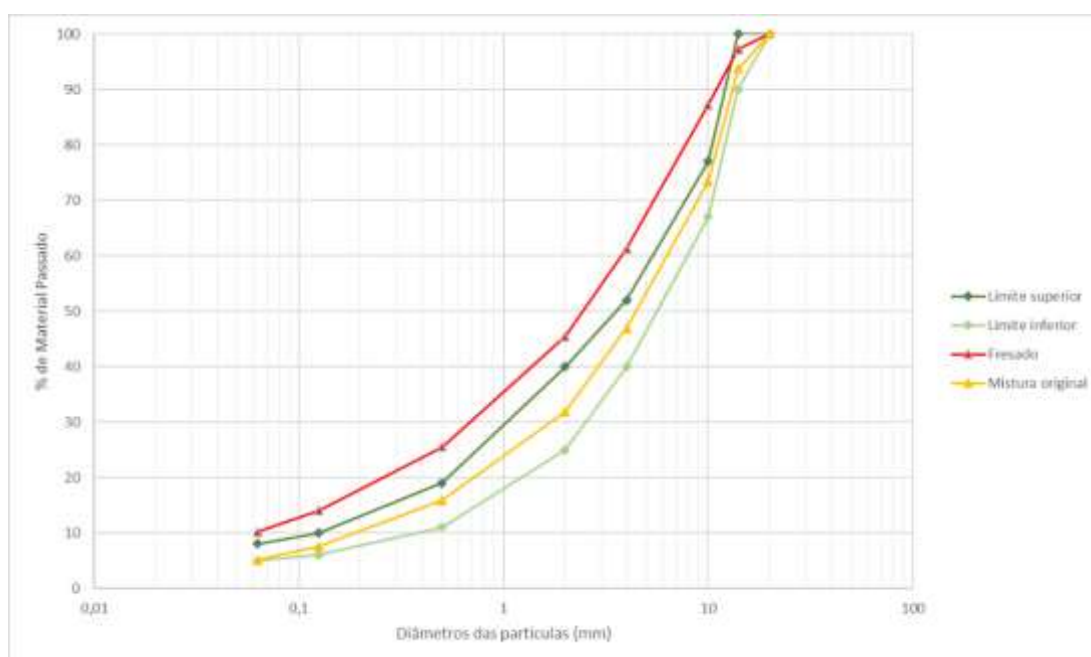


Figura 3.2 – Curva granulométrica do fresado e da mistura de referência adequado ao fuso da IP

Quanto ao ligante betuminoso, a mistura original foi formulada com uma percentagem de betume 35/50 de cerca de 5%, fornecido pela CEPESA, o qual se encontra de acordo com o exigido nas normas NP EN 12591 (IPQ 2011a). Esta percentagem não é semelhante à que se encontra no material fresado, de acordo com a caracterização efetuada ao mesmo pela empresa fornecedora, o material fresado apresenta uma redução de ligante para cerca de 4,5%. Por forma a compensar essa redução, na formulação final foi adicionado uma percentagem de 1% de betume virgem, de características semelhantes ao original. A razão para a adição desta percentagem de betume virgem na mistura visa a compensar o betume residual que se encontra no fresado e que é suscetível que não atuar como ligante.

Por último, resta mencionar o óleo alimentar (girassol) o qual se encontra representado na Figura 3.3. Tanto na fase de formulação da mistura, como na fase da sua caracterização, o óleo utilizado foi recolhido diretamente do uso doméstico, tendo sofrido apenas um processo de filtração, para remover possíveis partículas sólidas que se encontrassem em suspensão.



Figura 3.3 – OAU utilizado no fabrico da mistura rejuvenescida

3.2.2 Fabrico dos provetes

Antes de chegar à formulação final da mistura a utilizar, foram efetuadas várias tentativas utilizando diferentes percentagens de betume e óleo alimentar. Para cada uma delas foram produzidos quatro provetes cilíndricos, de cerca de 1200g cada um, tendo como base a norma EN 12697-35 (CEN 2004c).

Tal como é ilustrado na Figura 3.4, primeiramente foi devidamente pesada a quantidade de agregado fresado necessário para o fabrico dos provetes, o qual foi aquecido em estufa a uma temperatura aproximada de 160°C. Simultaneamente, foram também pesadas as quantidades de óleo e ainda de betume, o qual foi colocado numa outra estufa, juntamente com os moldes a utilizar, a uma temperatura de cerca de 140°C, por forma a garantir uma trabalhabilidade adequada para se concretizar a mistura.



Figura 3.4 – Material fresado (esquerda) e OAU (direita) utilizados no fabrico da mistura

Após a seleção dos materiais, procedeu-se à sua mistura manual, com o recurso a uma misturadora, tal como é representado na Figura 3.5. Para garantir a homogeneidade da mistura e não perder a temperatura de fabrico pretendida, o balde de mistura encontrava-se apoiado numa placa elétrica. Importa referir que a adição de todos os componentes à mistura não foi feita em simultâneo. Em primeiro lugar foi colocado o material fresado na misturadora, seguidamente foi adicionado o

betume virgem, o qual foi misturado durante alguns minutos e finalmente foi então introduzido o óleo alimentar, continuando-se a misturar durante mais alguns minutos. Na Figura 3.6 encontra-se representado esse processo.



Figura 3.5 – Misturadora utilizada no fabrico da mistura



Figura 3.6 – Introdução do betume virgem (esquerda) e do OAU (direita) na mistura

Uma vez realizada a mistura, esta foi então colocada num molde cilíndrico (Figura 3.7), por forma a realizar a sua compactação, tendo em conta a norma EN 12697-30 (CEN 2004b). A compactação foi efetuada num compactador de impacto, com 75 pancadas em cada face do provete, sendo a temperatura de compactação de cerca de 140°C. Na Figura 3.8, estão representados os provetes na final da compactação. Estes provetes ficaram sujeitos à temperatura ambiente, permanecendo dentro do molde, durante o tempo necessário para que esta fosse atingida, tal como definido pela norma anterior.



Figura 3.7 – Compactador de impacto utilizado



Figura 3.8 – Provetes após compactação

Uma vez atingida a temperatura ambiente, procedeu-se então ao desmolde dos provetes, através do equipamento apresentado na Figura 3.9. Esta condição de temperatura, é imposta pela norma EN 12697-34 (CEN 2004a), e tem por objetivo evitar o risco da deformação dos provetes. O resultado final de todo o processo de fabrico encontra-se na Figura 3.10.

Por fim, procedeu-se à medição da altura de cada provete fabricado, e comparou-se com os valores estipulados pela norma EN 12697-34 (CEN 2004a). Importa referir que este processo foi repetido várias vezes, para cada uma das tentativas efetuadas. No total estavam previstos serem fabricados cerca de 30 provetes para serem avaliados à compressão de Marshall, no entanto, o critério de altura mencionado anteriormente nem sempre foi cumprido, pelo que houve a necessidade de serem repetidos alguns provetes. Isto deveu-se ao facto de ser necessário quatro provetes por tentativa, para que os resultados obtidos fossem representativos do comportamento da mistura betuminosa utilizada em cada uma.



Figura 3.9 – Desmoldagem de um dos provetes fabricados



Figura 3.10 – Aspeto final dos provetes após desmoldagem

3.2.3 Baridade aparente

Antes de serem submetidos ao ensaio de compressão de Marshall, foi determinada a baridade aparente para todos os provetes fabricados. Para tal, foram seguidos os passos definidos pelo procedimento B da norma EN 12697-6 (CEN 2003a).

Primeiro foi determinada a massa do provete seco, definida por (m_1). De seguida, o provete foi submergido em água, durante 30 min, até que este se encontrasse completamente saturado. Após esses 30 min foi registada a massa do provete saturado (m_2), tal como se observa na Figura 3.11, tomando o cuidado para que durante esse processo o provete se mantivesse sempre submerso. Simultaneamente, foi também registada a temperatura da água.

Finalmente, retirou-se o provete da água, secando toda a sua superfície e voltou-se a determinar a sua massa, neste caso, denomina-se massa com a superfície seca (m_3). O cálculo da baridade aparente, foi efetuado a partir da equação (3.1):

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

em que:

- ρ_{bssd} é a baridade do provete saturado com superfície seca, em kg/m³;
- m_1 é a massa do provete seco, em g;
- m_2 é a massa do provete submerso, em g;
- m_3 é a massa do provete saturado com superfície seca, em g;
- ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em kg/m³.

Para obter valores mais fidedignos, a norma aplicada em questão, sugere um fator de correção que deve ser aplicado ao valor da massa volúmica da água, consoante a temperatura a que se encontra a mesma.



Figura 3.11 – Pesagem do provete seco (esquerda) e submerso (direita)

3.2.4 Ensaio de compressão Marshall

Seguindo a ordem de trabalhos proposta, a etapa seguinte tratou-se do ensaio de compressão Marshall. Este ensaio teve como objetivo a determinação da força de rotura e da deformação de rotura de cada provete, e foi efetuado segundo a norma EN 12697-34 (CEN 2004a). Segundo esta norma, todos os ensaios Marshall devem ser realizados obrigatoriamente num período entre 4 e 32 horas após a desmoldagem dos provetes, pelo que foi tida em consideração essa particularidade.

A primeira fase do ensaio, consistiu em colocar os provetes e o estabilómetro em banho termostático, tal como se encontra na Figura 3.12, com uma temperatura da água a rondar os 60°C. No que diz respeito à duração do banho, este deve ser realizado entre 40 a 60 min. Após os 40 min, o estabilómetro e o provete foram retirados, secando as superfícies, e de seguida foram colocados no respetivo equipamento para que pudesse ser iniciado o ensaio de compressão Marshall, tal como se encontra na Figura 3.12.

Relativamente ao ensaio em si, foi aplicada uma carga continua ao provete, carga essa que é aplicada a uma velocidade de (50 ± 2) mm/min até que o provete atinga a rotura. Assim sendo, foram registados os valores de rotura e ainda de deformação, sem esquecer, no entanto, que os mesmo devem ser corrigidos, tal como se encontra definido na norma EN 12697-34 (CEN 2004a). Na Figura 3.13, encontram-se ilustrado o aspeto dos provetes, após a realização do respetivo ensaio.



Figura 3.12 – Banho termostático (esquerda) e ensaio de compressão Marshall (direita)



Figura 3.13 – Aspeto dos provetes após ensaio de compressão Marshall

3.2.5 Baridade máxima teórica

A última fase a ser realizada no plano de trabalhos, passou então pela determinação da baridade máxima teórica. Para a determinação desta propriedade foi utilizado o método A presente na norma NP EN 12697-5 (IPQ 2014b).

Para isso, inicialmente foi escolhido um provete por cada tentativa efetuada, provete esse que foi desagregado, tal como se demonstra na Figura 3.14. Esta desagregação foi feita manualmente, com recurso a espátulas, e tentou-se que fosse atingida na sua totalidade, ou parte dela, por forma a que o cálculo da baridade máxima teórica fosse obtido da forma mais rigorosa possível.



Figura 3.14 – Desagregação do provete selecionado

Relativamente ao cálculo em si, primeiramente foi necessário realizar a pesagem do picnómetro e acessórios, designada por (M_1). Simultaneamente, anotou-se o volume do picnómetro a ser utilizado, o qual corresponde a (V_p). De seguida, o material desagregado foi colocado no interior do picnómetro, e realizou-se a pesagem do conjunto material mais picnómetro, ao que corresponde o valor (M_2). Por fim, procedeu-se ao enchimento do picnómetro com água até à marca de referência. Durante um período de cerca de 30 min, foi feita a extração do ar existente com recurso a uma bomba de vácuo, como pode ser observado na Figura 3.15. Concluída a extração do ar, encheu-se com água o restante volume do picnómetro e realizou-se a sua pesagem, correspondente a (M_3).



Figura 3.15 – Amostra no picnómetro

Para além das pesagens realizadas, mediu-se ainda a temperatura da água utilizada no ensaio. Essa temperatura é muito importante, pois a ela está associada um fator de correção, o qual é aplicado sobre o valor da massa volúmica da água, tal como é definido pela norma NP EN 12967-5 (IPQ 2014).

Uma vez obtidas todas as variáveis necessárias, foi determinada a baridade teórica máxima, a partir da expressão (3.2):

$$\rho_{mv} = \frac{M_2 - M_1}{1000 \times V_p - (M_3 - M_2)/\rho_w} \quad (3.2)$$

em que:

- ρ_{mv} é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa, em kg/m³;
- M_1 é a massa do picnómetro e acessórios, em g;
- M_2 é a massa do picnómetro, acessórios e amostra, em g;
- M_3 é a massa do picnómetro, acessórios, amostra e água, em g;
- V_p é o volume do picnómetro, em m³;
- ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em kg/m³.

Com base no valor da baridade máxima teórica, determinou-se ainda a porosidade e, por sua vez, o volume de vazios da amostra. Esse cálculo foi efetuado de acordo com a norma EN 12697-8 (CEN 2003b), utilizando as expressões (3.3) e (3.4):

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

em que:

- V_m é o conteúdo de vazios do provete, em %;
- ρ_{mv} é a baridade máxima teórica da mistura, em kg/m³;
- ρ_{bssd} é a baridade do provete saturado com superfície seca, em kg/m³.

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

em que:

- VMA é o volume de vazios no agregado, em %;
- V_m é o conteúdo de vazios do provete, em %;
- B é o conteúdo de ligante do provete, em %;
- ρ_{bssd} é a baridade do provete saturado com superfície seca, em kg/m³;
- ρ_B é a baridade do betume, em kg/m³.

Tal como foi referido, todos os procedimentos descritos anteriormente foram realizados para todas as tentativas, seguindo sempre o mesmo método em cada uma. Para além do ensaio de

caracterização de Marshall estava previsto também a realização do ensaio de sensibilidade à água, no entanto os atrasos provocados pela troca imprevista de material fresado, impossibilitaram a sua realização.

De uma forma geral, todos os resultados obtidos foram comparados entre si e ainda com os valores para camadas de desgaste apresentados pelo Caderno de Encargos das Infraestruturas de Portugal. A partir dessa análise comparativa, foi então escolhida a “receita” a utilizar na fase seguinte do trabalho experimental. Tal como anteriormente mencionado, foi definida uma percentagem OAU de 18% e ainda uma percentagem de betume virgem de cerca de 1%.

3.3 Segunda fase – Caracterização da mistura definida

Após escolhida a formulação da mistura, a segunda fase do trabalho experimental passou então pela sua caracterização e pela avaliação da viabilidade do uso do OAU. Tal como foi referido anteriormente, esta fase foi realizada no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico. Para o fabrico da mistura em si, foi utilizado novamente o fresado fornecido pela empresa JJR, a qual também disponibilizou o relatório de produção da mistura de referência (AC14 surf 35/50), contendo os valores obtidos dos ensaios característicos realizados a essa mistura. Esses valores encontram-se nos anexos 2 e 3, e serão referidos aquando da discussão dos resultados obtidos.

O plano de trabalhos a realizar nesta fase, pode ser descrito em duas etapas distintas, as quais foram divididas ao longo de um período de duas semanas. Na primeira etapa foram fabricados todos os provetes necessários para serem efetuados os respetivos ensaios e na segunda etapa foram realizados os ensaios em si. Para avaliar a performance da mistura produzida, foram então efetuados ensaios para avaliar as seguintes propriedades da mistura: módulo de deformabilidade, resistência à fadiga, resistência à deformação permanente e ainda sensibilidade à água. No Quadro 3.3 encontram-se resumidos todos os ensaios efetuados, acompanhados pela norma que lhes está associada e ainda o método utilizado em cada um deles. Em secções posteriores, serão descritos em detalhe, todos os procedimentos efetuados em cada um deles.

Quadro 3.3 – Ensaios utilizados para a caracterização da mistura (adaptado de Crucho, 2018)

Ensaio	Norma	Método
Rigidez	EN 12697-26	<i>Four-point bending</i>
Resistência à fadiga	EN 12697-24	<i>Four-point bending</i>
Deformação permanente	EN 12697-22	<i>Wheel-tracking</i> <i>Small size device – in ar</i>
Sensibilidade à água	EN 12697-12	<i>Method A – ITSR</i>
ITS - resistência à tração indireta	EN 12697-23	<i>(diametral compression)</i>

3.3.1 Fabrico dos provetes

Antes de serem realizados os ensaios, procedeu-se então ao fabrico dos provetes, tendo por base a norma EN 12697-35 (CEN 2004c). Uma vez que os ensaios realizados não requeriam um tipo único de provete, foi necessário fabricar três tipos diferentes, cada um deles com as respetivas dimensões destinadas ao ensaio em questão. Na Figura 3.16, encontra-se resumido todo esse processo de fabrico, cujo resultado final se traduz num total de 32 espécimes, repartidos entre 4 lajetas, 20 vigas prismáticas e ainda 8 provetes cilíndricos.

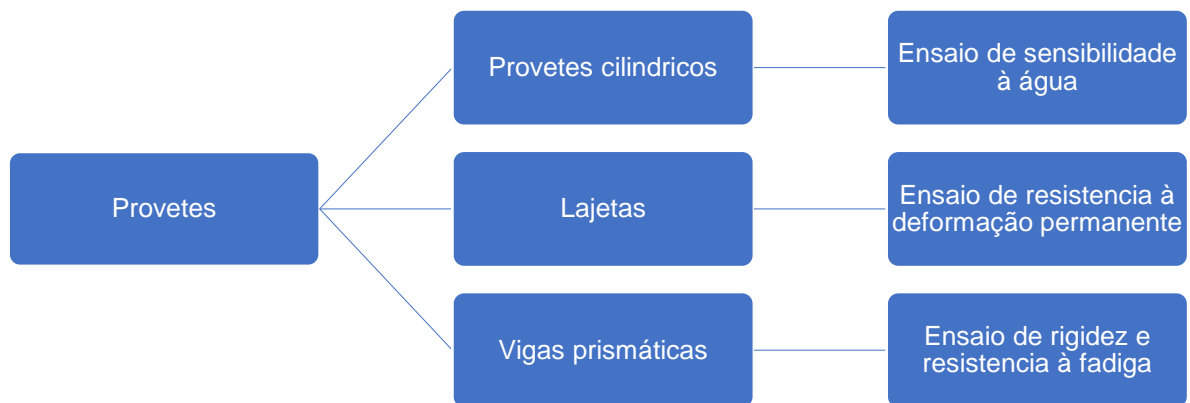


Figura 3.16 – Provetes produzidos para a caracterização da mistura (adaptado de Crucho, 2018)

Para iniciar o processo de fabrico, primeiramente começou-se por retirar os torrões presentes no material fresado fornecido, tal como é exemplificado na Figura 3.17. Do resultado dessa separação, foi selecionada e pesada a quantidade de material fresado necessária para o fabrico dos provetes, a qual foi colocada em estufa a uma temperatura de 170 °C. Ao mesmo tempo que o fresado era aquecido, numa outra estufa e a uma temperatura semelhante, foram ainda aquecidos os moldes e o betume a utilizar.



Figura 3.17 – Material fresado selecionado (esquerda) e torrões retirados do fresado (direita)

Relativamente ao processo de mistura em si, esta foi executada também a uma temperatura de 170°C, com recurso a uma misturadora mecânica, a qual se encontra representada na Figura 3.18. Em primeiro lugar foi adicionado o betume virgem ao fresado, o qual foi misturado durante alguns

minutos e posteriormente foi então adicionada a percentagem de OAU estabelecida, continuando-se o processo de mistura por mais alguns minutos. Após a conclusão deste processo, a mistura obtida foi colocada num recipiente de alumínio (Figura 3.18) e de seguida transferida para os moldes do respetivo provete, ainda por fabricar.



Figura 3.18 – Processo de fabrico da mistura

Quanto aos provetes em si, em primeiro lugar foram fabricadas quatro lajetas, de secção retangular com cerca de 5 cm de altura, 30 cm de largura, e 40 cm de comprimento. Para tal, a mistura obtida foi colocada no respetivo molde e posteriormente compactada, tal como se encontra na Figura 3.19. Tendo em conta o requerido pela norma EN 12697-24 (CEN 2004d), a processo de compactação foi realizado no equipamento *Roller Compactor* de acordo com a norma EN 12697-33 (CEN 2003c). Esse processo decorreu durante alguns minutos, até que fosse atingida a altura pretendida para as lajetas. Após a compactação, a lajeta foi desmoldada e foi sujeita à temperatura ambiente, até que a mesma fosse atingida. Ao todo foram produzidas quatro lajetas, sendo que na Figura 3.19, encontra-se o aspeto final das mesmas.



Figura 3.19 – Introdução da mistura molde (esquerda) e aspeto final da lajeta após compactação e desmoldagem (direita)

Uma vez produzidas as lajetas, foram seleccionadas quatro delas para o fabrico dos provetes de ensaio – vigas prismáticas. De cada uma dessas lajetas foram serrados cinco provetes, com uma secção quadrada de 5 cm de aresta e 40 cm de comprimento, tal como estipulado pela norma EN 12697-24 (CEN 2004d). Importa referir que a mesma norma estipula ainda que os ensaios realizados aos provetes, para efeitos de caracterização da viga, sejam realizados entre a segunda e a oitava

semana após o corte. No entanto, tendo em conta o tempo disponível, estes foram realizados poucos dias após o mesmo. Na Figura 3.20, encontram-se os provetes obtidos após concluída a fase de cortes.



Figura 3.20 – Serragem das lajetas (esquerda) e provetes prismáticos obtidos após serragem (direita)

No que diz respeito aos provetes cilíndricos, o processo de fabrico foi em tudo semelhante ao processo efetuado para a primeira fase do trabalho experimental. Uma vez produzida a mistura, esta foi colocada nos respetivos moldes e compactada através de um compactador de impacto, tendo em conta a norma EN 12697-30 (CEN 2004b). O processo de compactação foi efetuado com cerca de 50 pancadas por face, a uma temperatura de 160°C. No total foram fabricados oito provetes, no entanto, tendo em conta que o ensaio de sensibilidade à água requer apenas seis espécimes, dois dos provetes produzidos não foram utilizados. Na Figura 3.21, estão representados os provetes cilíndricos produzidos.



Figura 3.21 – Aspeto final dos provetes cilíndricos fabricados

Para além do processo de fabrico de todos os tipos de provetes, foram ainda determinadas as propriedades geométricas de cada provete, necessárias para a realização dos ensaios característicos, as baridades aparentes dos provetes cilíndricos e das vigas e ainda a baridade máxima teórica da mistura. Mais uma vez, por se tratar de um processo semelhante ao efetuado na fase anterior do trabalho experimental, o processo para obtenção dessas propriedades não é detalhado, sendo apenas referenciados no Capítulo 4, aquando da discussão dos resultados obtidos

3.3.2 Ensaio de rigidez e resistência à fadiga

Tanto o ensaio de rigidez como o ensaio de resistência à fadiga, foram realizados no equipamento *four-point-bending*, utilizado para vigas, tal como se encontra ilustrado na Figura 3.22.



Figura 3.22 – Equipamento *Four-Point-Bending* utilizado no ensaio de rigidez e de resistência à fadiga

No caso do ensaio de rigidez, trata-se de um ensaio que fornece informação sobre o comportamento reológico da mistura, através do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase obtidos ao longo de uma gama de frequências e temperaturas. No estudo em questão, o ensaio foi realizado segundo a norma EN 12697-26 (CEN 2004e), sendo aplicada uma carga sinusoidal com uma amplitude de extensão de $50 \mu\text{m/m}$, sob um conjunto de frequências de 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 30 Hz. Para além disso, e tendo em conta as temperaturas de serviço atingidas em Portugal, foi ainda escolhida a temperatura de 20°C para a condução do ensaio.

Os resultados obtidos são traduzidos no valor módulo de deformabilidade e do ângulo de fase, que neste caso foram obtidos para todos os provetes fabricados. Note-se que o valor deste módulo de deformabilidade corresponde ao valor absoluto do módulo complexo, que por sua vez, é composto por uma componente real, que traduz o módulo elástico, e uma componente imaginária, que traduz o módulo viscoso. O declive dos logaritmos dos módulos de cada componente representa o comportamento elástico do material.

Relativamente ao ensaio de resistência à fadiga, este foi realizado tendo em conta a norma EN 12697-24 (CEN 2004d) sob um conjunto de extensões de controlo. Neste caso, foram escolhidos três níveis de extensões de 200, 300, e $400 \mu\text{m/m}$, as quais foram aplicadas a partir de uma carga sinusoidal a uma frequência de 10 Hz. O critério de falha escolhido, encontra-se estipulado na norma referida acima e corresponde ao número de ciclos necessários para que o módulo de deformabilidade inicial seja reduzido em 50%.

Para todos os provetes fabricados foi determinado o número de ciclos necessários para atingir o critério de falha e posteriormente foi determinada a linha de fadiga da mistura, onde foram representados o número de ciclos atingidos por extensão aplicada. A partir da equação da linha de fadiga foi determinada a extensão correspondente a 10^6 ciclos, designada ϵ_6 , cujo valor é frequentemente utilizado para comparar diferentes misturas.

Antes da realização de ambos os ensaios, todos os provetes prismáticos foram colocados na câmara climática, tal como se encontra na Figura 3.23, por forma a atingirem a temperatura de controlo pretendida para a realização de cada um deles.



Figura 3.23 – Câmara climática utilizada

3.3.3 Ensaio de resistência à deformação permanente

No que diz respeito à avaliação da deformação permanente da mistura, foi executado o ensaio de *wheel-tracking*, de acordo com a norma EN 12697-22 (CEN 2003d), equipamento pequeno, procedimento B, testado ao ar. Durante o ensaio foi aplicada uma carga de 700 ± 10 N no topo da lajeta a partir do movimento de uma roda normalizada, tal como se encontra na Figura 3.24. Essa carga foi aplicada de forma contínua até que fosse atingido o critério de falha selecionado. De acordo com a norma referida, esse critério de falha é definido pelo limite máximo de 10.000 ciclos ou pelo máximo de deformação de 20 mm. Para a realização do ensaio em si, bastou apenas colocar a lajeta no molde do equipamento, definir a temperatura de 60°C para a realização do mesmo, temperatura essa que foi selecionada a partir das especificações da IP (IP, 2014), e esperar que fosse atingida no interior do equipamento. Atingido esse ponto deu-se início ao ensaio.

No estudo em questão, foram ensaiadas duas lajetas e para cada uma delas foram avaliadas as seguintes propriedades:

- RDair – profundidade de rodeira no final do ensaio;
- PRDair – rácio entre RDair e a espessura da lajeta;
- WTSair – declive do gráfico do wheel-tracking, calculado entre os 5000 e os 10000 ciclos.

Na Figura 3.25, encontra-se representado o aspeto final de uma das lajetas, após a realização do ensaio.



Figura 3.24 – Exemplo de ensaio *wheel-tracking* (Crucho, 2018)



Figura 3.25 – Aspeto das lajetas após a realização do ensaio *wheel-tracking*

3.3.4 Ensaio de sensibilidade à água

O último ensaio a ser realizado, tratou-se do ensaio de sensibilidade à água, uma vez que se trata de um dos agentes mais causadores de degradações nos pavimentos. Para avaliar essa sensibilidade, foi tido em conta o procedimento descrito na norma EN 12697-12 (CEN 2008) e ainda o ensaio de tração indireta (ITS), descrito pela norma EN 12697-23 (CEN 2003).

Para a realização do ensaio, os seis provetes cilíndricos fabricados foram divididos em dois grupos distintos de três provetes cada, sendo um deles o grupo condicionado e o outro o grupo não condicionado, tal como especificado na norma EN 12697-12 (IPQ 2018). No grupo condicionado os provetes selecionados foram submergidos em água a uma temperatura de 40°C durante um período de 72 horas, tal como se encontra na Figura 3.26, ao passo que no grupo não condicionado, os provetes foram colocados na câmara climática a uma temperatura de 20°C, durante o mesmo período de tempo.



Figura 3.26 – Banho termostático utilizado no condicionamento dos provetes

A avaliação da suscetibilidade da mistura à água, foi determinada a partir do valor do ITSR que corresponde ao rácio entre os valores ITS para os dois grupos, “ITS_{wet}” e ITS_{dry}”, correspondentes ao grupo condicionado e não condicionado, respetivamente. Para a obtenção desse valor os seis provetes selecionados foram colocados na prensa sendo aplicada uma carga diametral, tal como se encontra na Figura 3.27. O valor de pico da carga registado, foi posteriormente relacionado com as características geométricas e volumétricas de cada provete, obtendo-se assim, o valor ITS pretendido. Na Figura 3.27, encontra-se o aspeto final de alguns dos provetes após a realização do ensaio.



Figura 3.27 – Prensa utilizada para a realização do ensaio ITS (esquerda); Aspeto provetes após realização do ensaio ITS (direita)

4. Apresentação e discussão de resultados

4.1 Formulação da mistura

Antes de se efetuar a caracterização mecânica da mistura esta teve de ser previamente formulada. Tal como foi referido na secção anterior, essa formulação foi determinada no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC) a partir de um processo de tentativa e erro tendo em conta um conjunto de combinações de percentagens de óleo e betume, as quais já foram apresentadas anteriormente. De entre as tentativas executadas, importa dar a conhecer os resultados obtidos para as quatro últimas, as quais serviram de base para a formulação da “receita” final. As combinações usadas nas misturas betuminosas nessas tentativas corresponderam a uma percentagem de 8%, 16% e 18% de OAU relativamente à massa de betume existente, com cerca de 5%, 5,5% e 6% de betume relativamente à massa total da mistura, as quais foram denominadas de “O16B5”, “O16B5.5”, “O8B6” e “O18B5”, respetivamente.

4.1.1 Resultados obtidos

Para a formulação da mistura foram utilizados os valores da baridade aparente e os valores do ensaio de compressão de Marshall, uma vez que eram aqueles que poderiam ser comparáveis com os valores de referência disponíveis. Esses valores foram referenciados pelo Caderno de Encargos da IP e ainda pela empresa responsável pela produção da mistura original que deu origem ao fresado utilizado.

No que diz respeito à baridade aparente os resultados obtidos para cada uma das tentativas estão então apresentados no Quadro 4.1. Sendo os valores apresentados correspondentes à média obtida em cada tentativa.

Quadro 4.1 – Baridade aparente obtidas para as misturas betuminosas testadas

Mistura	Baridade aparente (kg/m ³)
O8B6	2379,3
O16B5	2359,3
O16B5,5	2339,1
O18B5	2208,3
AC14 JJR	2383,0

Tal como é possível verificar a partir dos resultados apresentados, a percentagem de OAU introduzida nas misturas teve efeitos positivos sobre as mesmas. A baridade aparente apresentada por cada uma é bastante semelhante à baridade aparente obtida pela mistura de referência (AC14 surf JJR). Na Figura 4.1 encontra-se representada essa semelhança, em que as combinações utilizadas

em cada tentativa corresponderam a variações percentuais máximas de 7%. Tal facto, deveu-se à adição de OAU, o qual tende a produzir um efeito de rejuvenescimento sobre a mistura fresada.

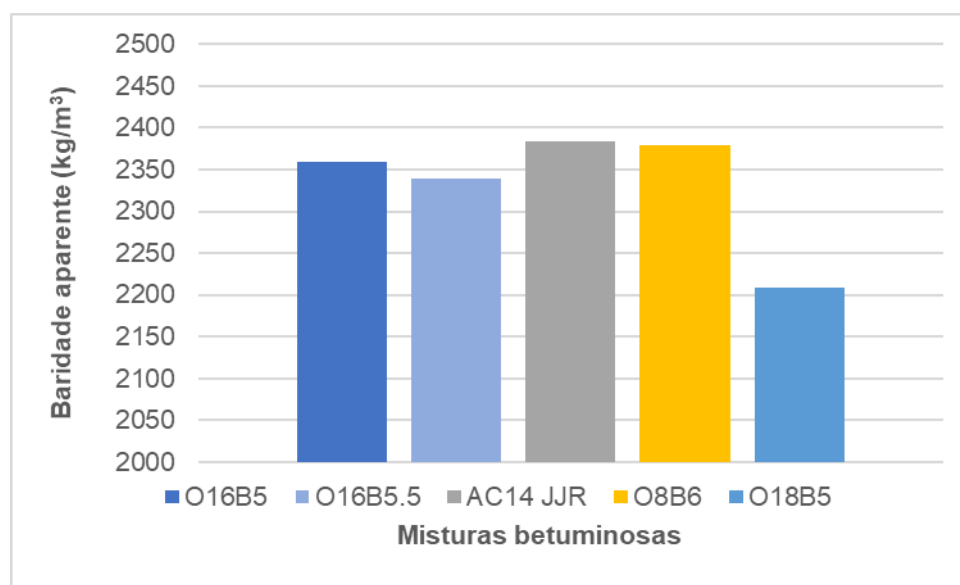


Figura 4.1 – Baridade aparente das misturas betuminosas

Relativamente aos resultados referentes ao ensaio de compressão Marshall, este compreende a determinação da estabilidade Marshall do provete e ainda a respetiva deformação de rotura. No Quadro 4.2, estão representados os valores obtidos para cada uma das tentativas, assim como os valores de referência apresentados pelo Caderno de Encargos da IP. Os valores apresentados para as misturas de teste mais uma vez correspondem à média dos valores obtidos.

Quadro 4.2 – Valores de força de rotura e de deformação para as misturas betuminosas

Misturas	Estabilidade Marshall (kN)	Deformação de rotura (mm)
Caderno de encargos	7,5 - 15	2 - 4
O8B6	17,5	4,3
O16B5	18	3,5
O16B5.5	14,5	3,9
O18B5	13,6	3,0

A partir dos resultados obtidos foi possível verificar que, quando a percentagem de betume total foi elevada (6%) e a quantidade de OAU relativamente baixa (8%), a estabilidade e a deformação resultam elevadas ficando um pouco acima dos respetivos intervalos de referência do caderno de encargos da IP. Além disso, uma composição desse tipo exigiu a adição de 1,5% de betume novo, o que se afastava do objetivo de produzir um material tão económico quanto possível.

Ao baixar a quantidade total de betume para 5% e aumentando a percentagem de OAU para 16% a composição tornou-se mais equilibrada em relação ao objetivo de economia, mas a estabilidade continuou bastante elevada.

Posteriormente ainda se avaliaram mais duas composições: uma delas com o intuito de observar o efeito do aumento da percentagem de betume para 5,5%, mantendo 16% de OAU; e uma outra, mantendo a percentagem de betume em 5%, e elevando a quantidade de OAU para 18%. Estas aproximações não conduziram a diferenças assinaláveis entre si. Verificou-se, no entanto, que a estabilidade e a deformação desceram para valores dentro dos intervalos de referência do caderno de encargos.

Tendo em consideração os resultados observados, prosseguiu-se com a apreciação do desempenho mecânico com uma percentagem de OAU de 18% e uma percentagem de betume total de 5,5%. Esta percentagem de ligante é 0,5% mais alta que a da mistura original. Contudo, atendendo a que uma pequena parte do betume residual do material fresado é suscetível de não atuar como ligante ("black rock"), optou-se por utilizar uma percentagem ligeiramente mais alta (5,5% em vez de 5%).

4.2 Caracterização da mistura

Tal como foi referido anteriormente, a mistura caracterizada é constituída por 100% de material fresado, a qual foi rejuvenescida, adicionando 1% de betume virgem relativamente à massa total da mistura e ainda 18% de OAU relativamente à massa de betume presente no fresado. Relativamente ao efeito do rejuvenescimento da mistura, este foi avaliado através dos seguintes ensaios: ensaio de rigidez, ensaio de resistência à fadiga e à deformação permanente e ainda a sensibilidade à água.

Importa mencionar, que uma vez que não foi fabricada qualquer mistura de referência, os resultados obtidos tiveram de ser comparados com misturas AC14 surf de estudos externos semelhantes. No caso do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga, os resultados foram comparados com os estudos de Crucho, (2018), e ainda Silva, (2016), visto que as misturas AC14 de referência utilizadas por ambos são equivalentes à utilizada neste estudo. No caso da resistência à deformação permanente e da sensibilidade à água, tal como foi dito anteriormente, a empresa responsável pela produção da mistura original que originou o fresado, forneceu a caracterização da mesma nessas propriedades, pelo que, esses resultados foram também utilizados como termo de comparação.

4.2.1 Ensaio de rigidez

O ensaio de rigidez, tal como foi referido anteriormente, foi executado a uma temperatura de 20°C sob um conjunto de frequências, tendo em conta a norma EN 12697-26 (CEN 2004). Os resultados obtidos foram traduzidos pelo módulo de deformabilidade e ângulo de fase, os quais serão apresentados de seguida.

No Quadro 4.3, apresentam-se as características geométricas das vigas prismáticas para a mistura rejuvenescida em questão. Note-se que estas vigas foram numeradas de 1 a 20, juntamente com a abreviatura OA (Óleo Alimentar), referente ao tipo de mistura utilizada. Para além das características geométricas apresentadas, no Anexo 4, encontram-se apresentadas todas as propriedades referentes a este tipo de provetes.

Ao todo foram ensaiados cerca de 18 provetes prismáticos, sendo que para cada um deles foram determinados o respetivo módulo de deformabilidade e o ângulo de fase. Nas figuras 4.2 e 4.3 encontram-se representadas as médias dos valores obtidos para cada frequência, juntamente com as misturas de referência. Para além disso encontram-se ainda representado o desvio padrão apresentado por cada provete, em cada uma das frequências ensaiadas.

Quadro 4.3 – Caracterização geométrica da secção das vigas da mistura rejuvenescida

Viga	Largura, l (mm)					Altura, h (mm)				
	l1	l2	l3	l4	Média	h1	h2	h3	h4	Média
OA1	51,52	51,56	50,77	50,11	50,99	51,39	51,36	51,31	50,98	51,26
OA2	51,9	51,35	51,09	51,01	51,34	50,76	51,46	51,5	51,23	51,24
OA3	50,66	50,9	51,03	51,34	50,98	51,42	51,75	51,94	51,39	51,63
OA4	51,88	52,02	51,49	51,31	51,68	51,21	51,53	51,41	51,36	51,38
OA5	50,54	50,89	51,43	51,36	51,06	50,78	50,68	50,85	50,75	50,77
OA6	50,52	50,71	50,79	50,72	50,69	51,16	51,27	51,25	50,93	51,15
OA7	51,19	51,25	51,14	50,64	51,06	51,01	50,86	50,82	50,46	50,79
OA8	51,79	51,73	51,24	50,94	51,43	51,13	51,12	51,07	50,85	51,04
OA9	50,07	50,4	50,93	51,28	50,67	50,78	51,04	51,53	51,69	51,26
OA10	51,5	51,61	51,43	50,99	51,38	51,12	51,1	51,11	50,91	51,06
OA11	52,09	52,07	51,6	51,17	51,73	51,28	51,24	51,18	51,11	51,20
OA12	50,83	51,42	51,72	52,19	51,54	51,2	51,36	51,51	51,61	51,42
OA13	52,58	52,24	52,21	51,81	52,21	51,29	51,51	51,54	51,38	51,43
OA14	52,09	51,58	51,19	50,92	51,45	50,76	51,31	51,53	51,39	51,25
OA15	51,22	50,75	50,17	49,51	50,41	50,35	50,26	50,5	50,79	50,48
OA16	51,51	51,99	51,6	51,08	51,55	51,08	50,96	50,88	50,22	50,79
OA17	52,01	51,5	51,3	50,74	51,39	51,6	51,78	51,41	50,65	51,36
OA18	52,32	51,48	51,36	50,86	51,51	51,31	51,5	51,44	50,85	51,28
OA19	52,33	52,11	51,65	50,93	51,76	51,48	51,51	51,53	51,08	51,40
OA20	51,15	51,23	50,47	50,1	50,74	50,46	51	51,03	50,92	50,85

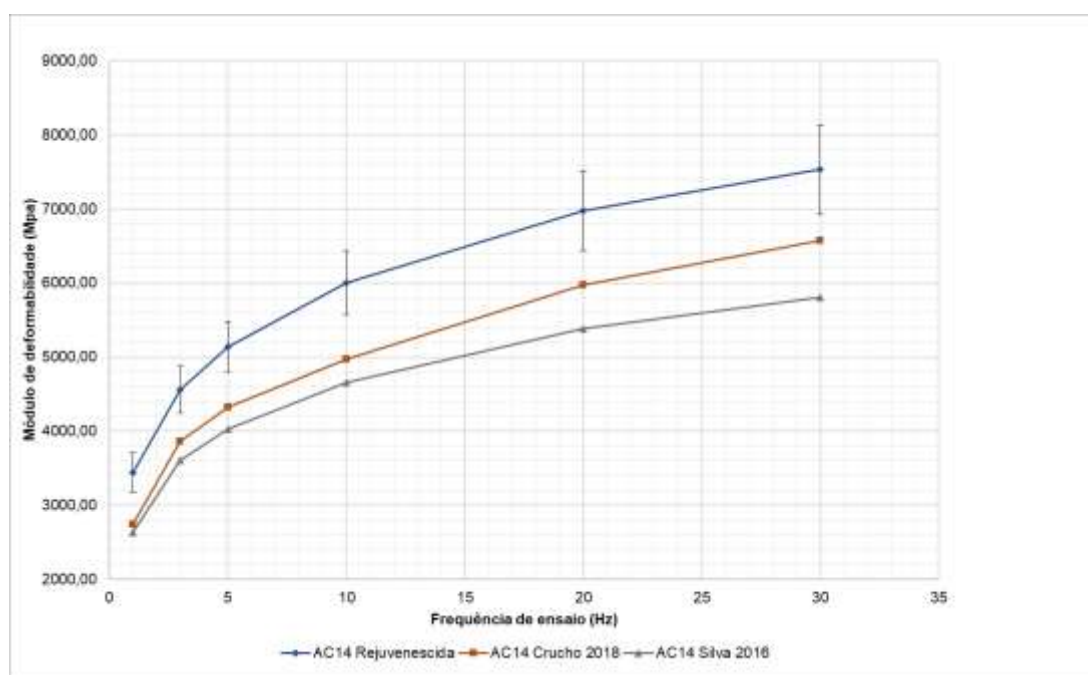


Figura 4.2 – Módulo de deformabilidade dos provetes ensaiados e misturas de referência

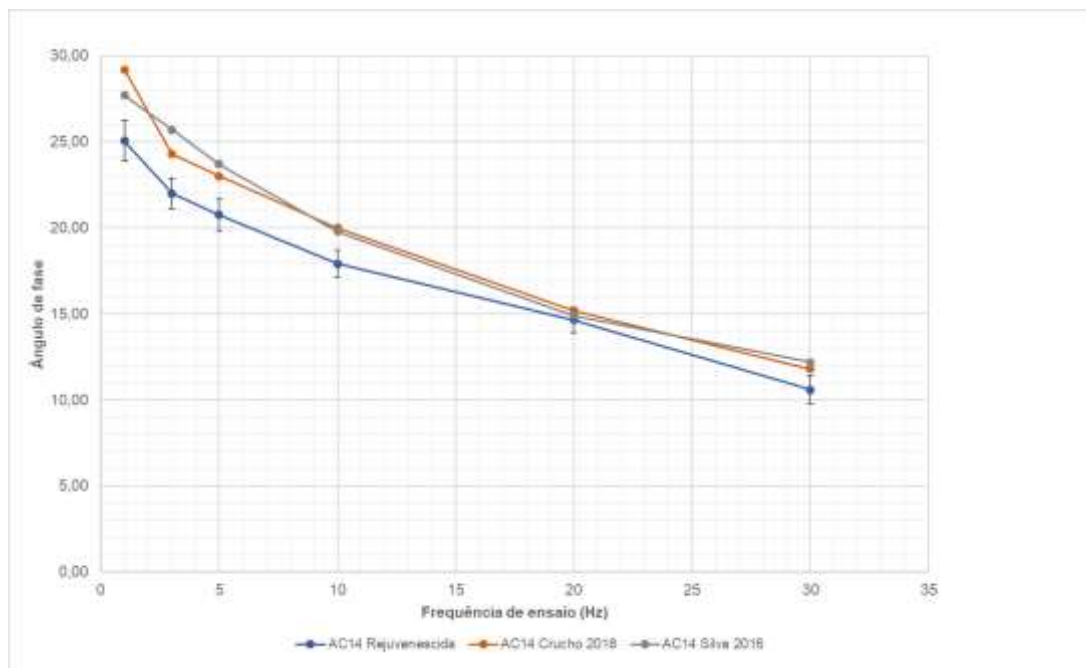


Figura 4.3 – Ângulo de fase dos provetes ensaiados e misturas de referência

Uma vez obtidos os resultados, procedeu-se à sua comparação com os valores de referência. Nos quadros 4.4 e 4.5, apresenta-se a percentagem na variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura rejuvenescida, em comparação com as restantes misturas de referência.

Quadro 4.4 – Variação do módulo de deformabilidade da mistura rejuvenescida (adaptado de Crucho, 2018)

Mistura	Temperatura de ensaio (°C)	Variação do módulo de deformabilidade (%)					
		1 Hz	3 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	30 Hz
AC14 Crucho 2018	20	+20,2	+15,2	+15,9	+17,1	+14,4	+12,7
AC14 Silva 2016	20	+23,6	+21,0	+21,6	+22,4	+22,8	+22,9

Quadro 4.5 – Variação do ângulo de fase da mistura rejuvenescida (adaptado de Crucho, 2018)

Mistura	Temperatura de ensaio (°C)	Variação do ângulo de fase (%)					
		1 Hz	3 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	30 Hz
AC14 Crucho 2018	20	-16,5	-10,5	-10,8	-11,6	-3,3	-11,3
AC14 Silva 2016	20	-10,5	-16,8	-14,2	-10,5	-1,7	-15,1

No que diz respeito aos resultados obtidos, estes encontravam-se dentro do que era expectável, tendo em conta a mistura em questão. Como é possível observar nos quadros anteriores, a mistura rejuvenescida apresentou um aumento de 14 a 24 % no módulo de deformabilidade e um decréscimo de 3 a 17 % no ângulo de fase. Estes resultados poderão ser explicados pela presença do betume envelhecido na mistura. Tal como foi referido anteriormente, a diluição do óleo no betume envelhecido é um fator muito importante para atingir uma homogeneidade do ligante final, o que por sua vez tem influência no desempenho da mistura rejuvenescida. Neste caso, pode existir a possibilidade de que o betume da mistura não tenha sido totalmente rejuvenescido e, portanto, na globalidade ficou mais enrijecido. Consequentemente a mistura apresentou-se com um comportamento mais resistente à deformação induzida a 20°C do que o apresentado por misturas preparadas com betume novo. No entanto, as variações obtidas não são significativas, tanto para o módulo de deformabilidade como para o ângulo de fase, mostrando que a mistura não parece apresentar um comportamento frágil, o qual poderia implicar uma fácil desagregação na aplicação de cargas.

4.2.2 Ensaio de resistência à fadiga

O ensaio de resistência à fadiga, foi executado segundo a norma EN 12697-24 (CEN 2004d), aplicando um conjunto de extensões de controlo aos provetes ensaiados até que fosse atingido o critério de falha correspondente. Assim sendo, para cada provete foi determinado o número de ciclos correspondente à diminuição em 50% do módulo de deformabilidade inicial de cada um.

Por forma a obter a resistência à fadiga da mistura, foram ensaiados 18 provetes, os quais foram divididos em três grupos diferentes, consoante a extensão de controlo aplicada. Para se proceder à divisão dos provetes por grupo, primeiramente foi calculada a baridade média de todos os provetes e de seguida foram escolhidos os provetes por grupo, de forma a que a baridade média de cada grupo fosse aproximada ao valor da baridade média total. No quadro 4.6 encontra-se a divisão dos provetes por cada grupo de extensão aplicada.

Nas figuras 4.4 a 4.6 encontram-se representados três exemplos do andamento dos ensaios de fadiga para cada uma das extensões definidas, os quais foram produzidos a partir dos dados fornecidos pelo *software* de ensaio.

Uma vez realizados os ensaios a todos os provetes escolhidos, foi possível calcular a lei de fadiga para a mistura rejuvenescida. Para o cálculo da mesma, foi utilizada a representação mais usual para misturas betuminosas, que pode ser descrita pela equação (4.1):

$$\varepsilon = a \times N^b \quad (4.1)$$

em que:

- ε é a extensão de tração inicial em ($\mu\text{m}/\text{m}$);
- N é o número de ciclos até se atingir o critério de rotura;
- a, b são constantes.

Quadro 4.6 – Grupos de vigas definidos segundo as baridades determinadas

Viga	Extensão	Baridade média por grupo	Baridade média
	$\mu m/m$	kg/m^3	kg/m^3
OA1	300	2381,9	2379,6
OA6			
OA11			
OA13			
OA16			
OA19			
OA2	400	2379,7	
OA4			
OA7			
OA14			
OA17			
OA18			
OA3	500	2379,2	
OA8			
OA10			
OA12			
OA15			
OA20			



Figura 4.4 – Ensaio de fadiga realizado para o provete OA13

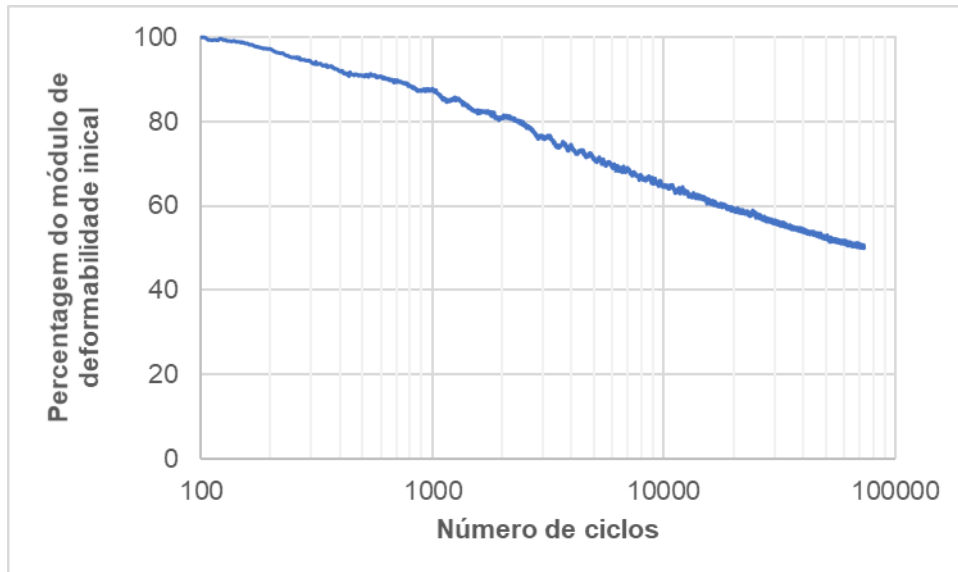


Figura 4.5 – Ensaio de fadiga realizado para o provete OA17

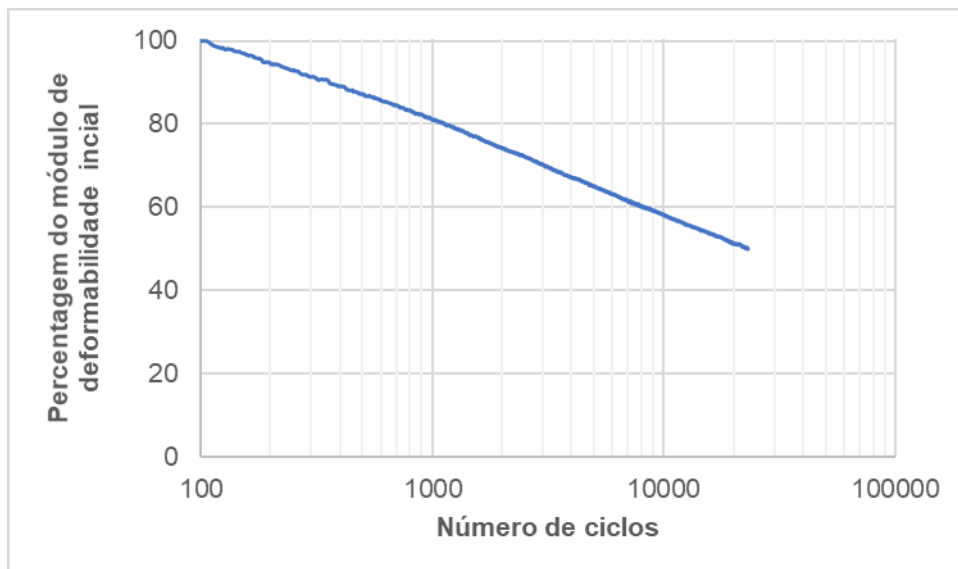


Figura 4.6 – Ensaio de fadiga realizado para o provete OA12

Na figura 4.7 encontra-se representada a lei de fadiga obtida para a mistura rejuvenescida, juntamente com as linhas de fadiga das misturas de referência, calculadas pelos autores dos respetivos estudos.

Um dos parâmetros que é indicado pela norma EN 12697-24 (CEN 2004d) para comparar as leis de fadiga corresponde ao valor de ϵ_6 , que indica a extensão para 1 milhão de ciclos de repetição no ensaio. Também o valor da inclinação de cada reta de fadiga indica a maior ou menor rapidez, em termos de nº de ciclos repetidos, com que se atinge a extensão de referência. No Quadro 4.7, apresentam-se os respetivos valores de cada parâmetro para cada uma das misturas.

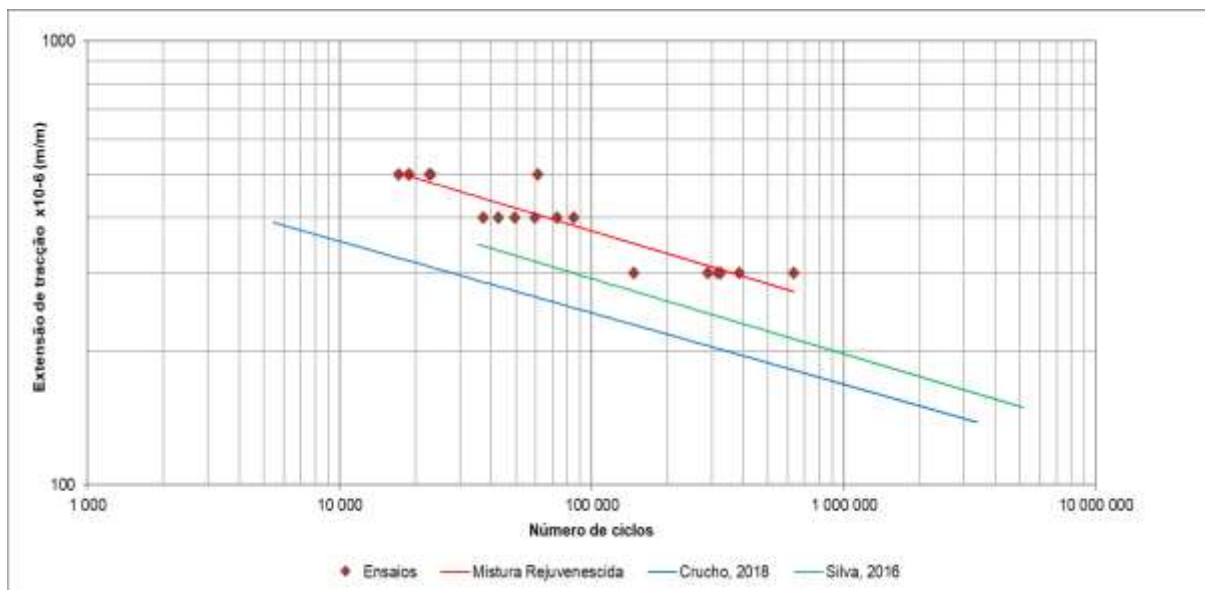


Figura 4.7 – Leis de fadiga da mistura rejuvenescida e das misturas de referência

Quadro 4.7 – Resultados da resistência à fadiga da mistura rejuvenescida e misturas de referência

Mistura	ϵ_6 ($\mu\text{m/m}$)	Inclinação da linha de fadiga
AC14 Rejuvenescida	252	-5.88
AC14 Crucho 2018	168	-6.21
AC14 Silva 2016	196	-5.88

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a mistura rejuvenescida apresentou um valor de ϵ_6 superior ao de ambas as misturas de referência e uma inclinação semelhante, o que significa que para a mesma extensão induzida suporta um maior número de repetições, traduzindo um melhor comportamento à fadiga.

Esta melhoria de comportamento pode ser explicada pela granulometria do fresado utilizado na mistura, que por apresentar uma granulometria mais fina que as misturas de referência pode indicar um mástique (ligante ativo mais finos) mais rico em betume, e como tal, é atingido um melhor comportamento à fadiga para a temperatura em questão. Este é um indicador de que o OAU pode, de facto, ter uma atuação interessante como rejuvenescedor.

4.2.3 Ensaio de resistência à deformação permanente

A resistência à deformação permanente foi avaliada segundo a norma EN 12697-22 (CEN 2003d), através do ensaio de *wheel-tracking*. Durante a execução do ensaio, foi aplicada a carga no topo da lajeta a uma temperatura de 60°, até que fosse atingido o limite de 10.000 ciclos.

Ao todo foram ensaiadas duas lajetas, sendo que no Anexo 5 se encontram descritas as propriedades e os resultados obtidos para cada uma delas. No que diz respeito à deformação por rodadura obtida para ambas, na Figura 4.8 encontra-se representada a curva de deformação permanente correspondente a cada lajeta. A partir dos resultados obtidos é possível verificar que as duas lajetas apresentaram alguma deformação, sendo que a média obtida para ambas é de cerca de 7,6 mm.

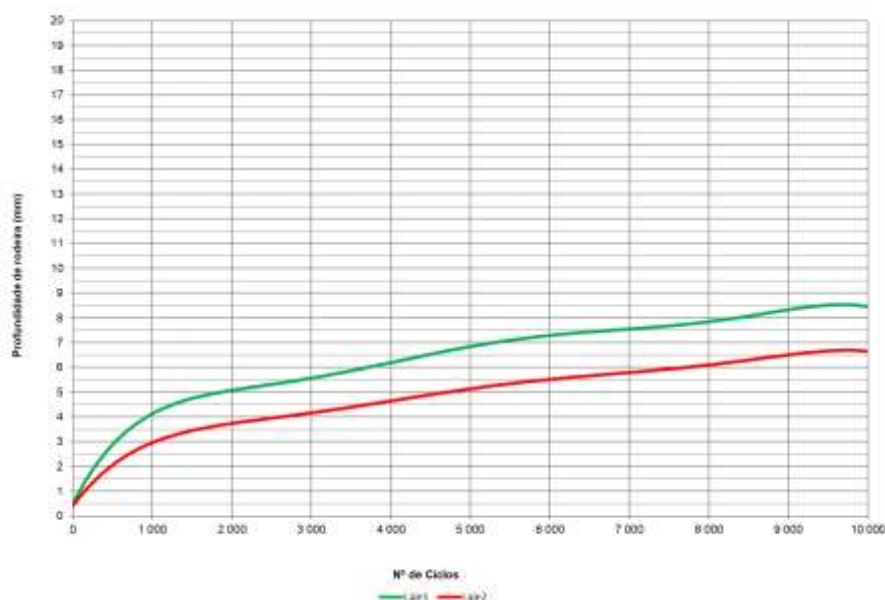


Figura 4.8 – Curvas de deformação obtidas do wheel-tracking, para as duas lajetas de mistura rejuvenescida

No Quadro 4.8, estão representados os resultados obtidos para as duas lajetas e ainda os valores apresentados pelas misturas de referência.

Quadro 4.8 – Resultados obtidos do wheel-tracking para todas as misturas

Mistura	RD _{air} (mm)	PRD _{air} (%)	WTS _{air} (mm/10 ³ ciclos)
AC14 Rejuvenescida	7.6	14.8	0.339
AC14 Crucho 2018	2.62	4.33	0.091
AC14 Silva 2016	2.39	3.9	0.052
AC14 JJR	4.9	12.1	0.2

Os resultados obtidos para a mistura rejuvenescida em estudo encontraram-se dentro do expectável, apresentando indicadores do ensaio de deformação permanente superiores às misturas de referência, pelo que o seu desempenho é inferior. A explicação para esse facto, possivelmente advém da quantidade de mástique presente na mistura. Tal como foi referenciado através doutros estudos, a diluição de OAU em misturas betuminosas aumenta a suscetibilidade das mesmas a temperaturas médias e altas, originando por isso a possibilidade de ocorrerem maiores deformações permanentes a temperaturas elevadas (60°C no caso deste ensaio). Noutro sentido, é provável que a quantidade de

ligante da mistura em estudo seja também superior à apresentada pelas misturas que servem de comparação, pelo que contribui para a mesma situação. Finalmente o facto da granulometria do fresado ser mais fina que o original induziu um esqueleto de agregado mais débil, pelo que a falta de elementos grossos de agregado também contribuiu para retirar capacidade resistente à deformação permanente.

Ainda assim, é importante referir que os valores obtidos para a mistura em estudo são aceitáveis quando comparados com a mistura que deu origem do fresado (AC14 fabricado pela JJR). Muito provavelmente uma correção da granulometria final com agregado grosso (intervenção de custo reduzido) possibilitaria a obtenção de uma resistência à deformação permanente já consentânea com uma possível aplicação da mistura sem problemas deste ponto de vista.

4.2.4 Ensaio de sensibilidade à água

Foi ainda avaliada a sensibilidade à água da mistura em estudo, recorrendo para tal ao cociente (ITSR) de força de tração indireta sobre provetes não condicionados e provetes condicionados em água. Para a realização de todo o ensaio, foram tidas em conta as normas EN 12697-12 (CEN 2008) e ainda EN 12697-23 (CEN 2003). No Anexo 6 encontram-se os resultados e as propriedades de todos os provetes cilíndricos utilizados no decorrer do ensaio, os quais se encontram divididos nos grupos condicionado e não condicionado já referidos.

Nas Figura 4.9, estão representados os resultados do pico de carga e ainda do ITS, obtidos para cada provete ensaiado. Como é possível verificar através dos mesmos, as diferenças entre os provetes não são significativas, havendo apenas um ligeiro aumento nos provetes condicionados ("wet").

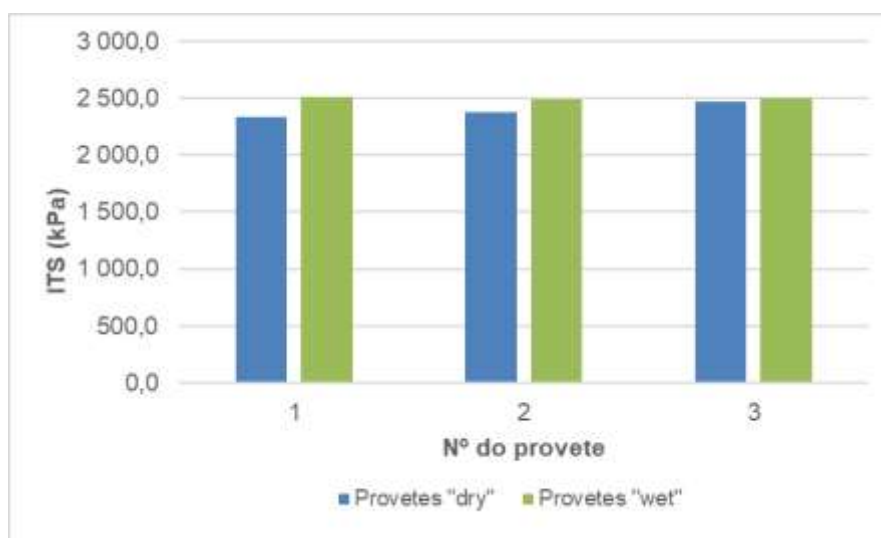


Figura 4.9 – Resultados obtidos do ITS para cada provete

Com base nestes resultados foi calculada a média do ITS para cada grupo de provetes e de seguida foi calculado o rácio ITSR. No Quadro 4.9, encontram-se os valores calculados para a mistura rejuvenescida e ainda os alguns dos valores disponibilizados das misturas de referência.

Quadro 4.9 – Valores do ITSr para as misturas AC14 (adaptado de Crucho, 2018)

Mistura	ITS _{dry} (kPa)	ITS _{wet} (kPa)	ITSr (%)
AC14 Rejuvenescida	2392,2	2499,1	104
AC14 Crucho 2018	1287,3	739,4	57
AC14 Silva 2016	-	-	86

A partir do valor do ITSr de cada mistura, foi possível verificar que a mistura rejuvenescida apresentou um desempenho superior no que à sensibilidade à água diz respeito. O valor do ITS aumentou ligeiramente no caso dos provetes condicionados, o que permite afirmar que a resistência da mistura não é afetada pelo condicionamento em água. O valor do ITSr quando comparado com as misturas usadas como referência é bastante superior. A diferença dos valores apresentados pode ser explicada pela porosidade da mistura rejuvenescida. Tendo em conta que a granulometria apresentada é contínua e bastante mais fina, a percentagem de vazios presente na mistura é mais reduzida, tornando-a mais fechada e conseqüentemente menos sensível à água.

No entanto, é importante referir que as condições de ensaio utilizadas em cada uma das três misturas apresentadas não foram semelhantes entre si. A fase de obtenção dos valores do ITS foi realizada a temperaturas diferentes em cada uma das misturas. Assim sendo os resultados apresentados para o ITSr não estão em total conformidade, uma vez que para obter a verdadeira diferença entre os valores apresentados, as condições de ensaio teriam de ser iguais em todas as misturas. Ainda assim acredita-se que a dos valores apresentados não fugiriam muito à realidade.

4.3 Custos da mistura estudada

Apesar da avaliação do desempenho da mistura rejuvenescida ser um fator importante e que demonstra a possibilidade da aplicação deste tipo de misturas em camadas de desgaste, é necessário demonstrar que os custos envolvidos são de forma a que a solução possa efetivamente ser usada.

Para analisar os custos de aplicação da mistura rejuvenescida deste estudo admitiu-se que esta seria aplicada em camada de desgaste de um pavimento como o exemplificado na Figura 4.10.

Por forma a simular o custo de pavimentação da mistura estudada, é necessário ter em consideração as operações que decorrem até à sua colocação em camada definitiva. No Quadro 4.10 encontram-se discriminadas todas essas operações e os custos associados a cada um deles.

Por forma a obter os custos apresentados no Quadro 4.10 foram tidos em conta os custos atuais que se podem encontrar na prática construtiva para cada operação. A partir das quantidades do material e atividades envolvidas em cada uma, os custos foram finalmente expressos em €/ton de uma mistura betuminosa a quente convencional (MBQ).

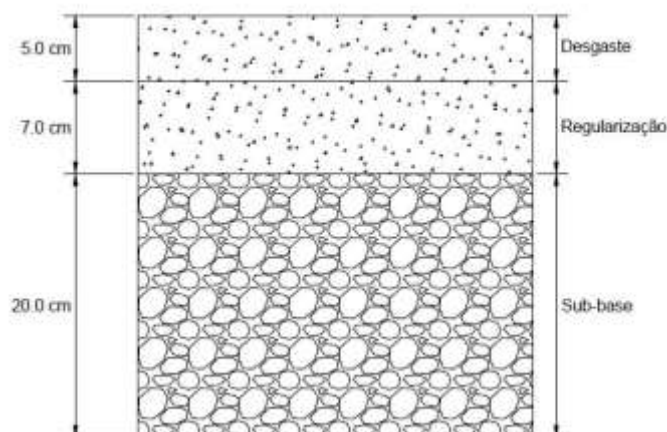


Figura 4.10 – Estrutura tipo de um pavimento de baixo a médio tráfego

Quadro 4.10 – Custos das operações associadas à pavimentação da mistura rejuvenescida

Operação	Custo (€/ton de MBQ)
Fresagem	0,47
Transporte+Crivagem	4,73
1% betume virgem	3,00
18% OAU	0,50
Fabrico	3,00
Pavimentação	5,04
Custo total	16.74

Uma vez obtido o custo de pavimentação da mistura rejuvenescida em estudo, foi determinado o valor correspondente em €/m². Tendo em conta o valor da baridade média obtida para os provetes prismáticos e a espessura de 5 cm assumida para a camada de desgaste, chegou-se então ao custo de **2 €/m²**. A partir do resultado obtido foi possível verificar que a mesma se apresentou como uma alternativa viável à solução equivalente, correspondente a um AC14 em que, a preços atuais, se admitiu ficar a 5 €/m². Na Figura 4.11, encontra-se representada essa diferença de custos, onde a mistura rejuvenescida apresentou uma redução nos mesmos, em cerca de **60%**.

Para além do custo de pavimentação apresentado anteriormente, existem ainda custos associados à deposição dos materiais fresados em vazadouros que não foram considerados. Neste caso, a mistura do estudo em questão promove a reutilização de material fresado, pelo que as quantidades a serem enviadas para vazadouro são também reduzidas, ou seja, os possíveis custos em que se poderia incorrer dessa operação não são contabilizados como adicional ao AC14 novo, pelo que a redução dos custos associada à utilização de mistura rejuvenescida com OAU seria maior do que a que foi apresentada na figura anterior.

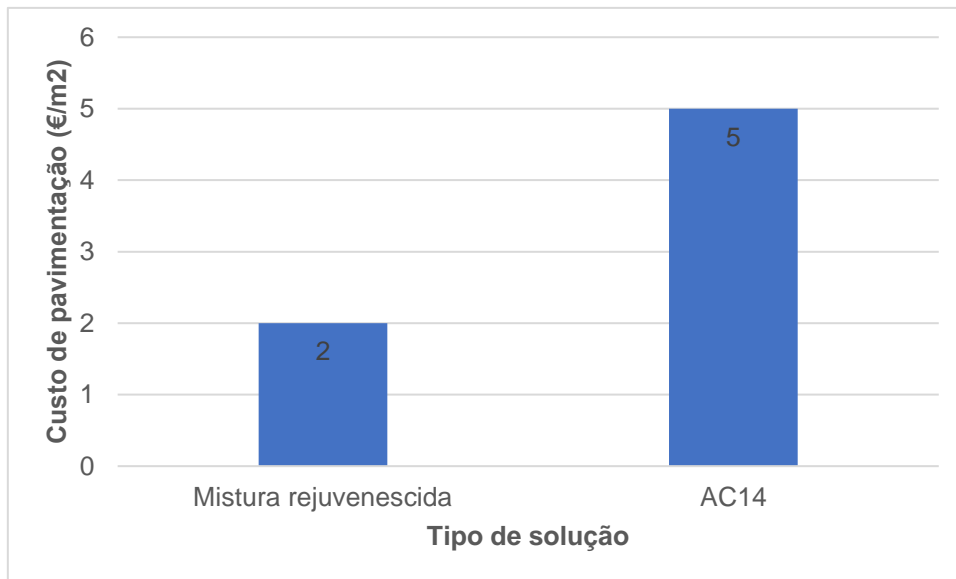


Figura 4.11. – Comparação dos custos por m² entre a mistura rejuvenescida em estudo e a solução AC14 equivalente

5. Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Trabalho realizado

No presente estudo foi produzida e caracterizada em laboratório, uma mistura betuminosa fresada de um pavimento em serviço, rejuvenescida com uma percentagem de OAU. Esta mistura foi previamente formulada no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), tendo por base uma metodologia Marshall.

A avaliação mecânica do desempenho da mistura rejuvenescida, efetuada no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do IST, foi efetuada através de um conjunto de ensaios, entre eles o ensaio de rigidez, o ensaio de resistência à fadiga, o ensaio de resistência à deformação permanente e ainda a avaliação da sensibilidade à água. Para avaliar a efetividade dos resultados obtidos, estes foram comparados com resultados obtidos em condições semelhantes para misturas AC14 surf equivalentes, as quais foram usadas por outros autores em trabalhos semelhantes. Por fim, foi ainda avaliada a viabilidade económica da mistura estudada, em termos de custos diretos de fabrico e colocação em obra.

5.2 Conclusões

Uma vez concluído todo o trabalho laboratorial e aferidos todos os resultados obtidos, pode-se afirmar que foram cumpridos os objetivos a que este estudo se propunha. A mistura fresada rejuvenescida foi fabricada e foi avaliada a sua viabilidade técnica e económica para reaplicação em pavimentos de baixo a médio tráfego.

Relativamente ao módulo de deformabilidade, a mistura rejuvenescida apresentou um valor do módulo de deformabilidade superior ao das misturas AC14 surf equivalentes, traduzindo-se num acréscimo máximo de cerca de 24%. Tal facto poderá ser explicado pela presença de betume envelhecido na mistura, que possivelmente não foi completamente rejuvenescido pela diluição do óleo, tornando-a ligeiramente mais rígida. Essa possibilidade foi constatada de forma análoga para os valores de ângulos de fase obtidos, sendo que a mistura rejuvenescida apresentou valores de ângulos de fase inferiores aos das misturas de referência. Essa diminuição de valores, está de acordo com os resultados obtidos para o módulo de deformabilidade e incrementa a possibilidade da presença de betume envelhecido na mistura, visto que as aproximações dos valores do ângulo de fase a zero traduzem um comportamento mais resistente da mistura à deformação induzida nas condições de ensaio.

Através da análise do comportamento da mistura à fadiga, verificou-se que a mistura rejuvenescida apresentou um comportamento bastante superior às misturas de referência para o mesmo número de ciclos de carga. Tal como foi referenciado aquando da constituição dos materiais presentes na mistura, verificou-se que o a granulometria do fresado presente na mesma apresentava-se mais fina que a mistura original, o que poderá indicar a presença de maior quantidade de mástique

(finos mais ligante) no conjunto da mistura, tornando-a resistente às condições de avaliação à fadiga. Tal facto é também corroborado pelas porosidades baixas obtidas. Relativamente aos valores em si, a mistura rejuvenescida apresentou um valor de ϵ_6 de cerca de 252 $\mu\text{m}/\text{m}$, o que se traduziu no dobro do valor do indicador quando comparado com o proveniente de uma das misturas de referência.

No que diz respeito ao comportamento à deformação permanente, verificou-se que a mistura rejuvenescida apresentou um desempenho inferior ao das misturas de referência, sendo que no final da realização do ensaio foi obtida uma profundidade média de rodeira de cerca de 7,6 mm. O mesmo sucedeu com os restantes parâmetros avaliados ao longo do ensaio, nomeadamente a média proporcional de profundidade da rodeira (PRD_{AIR}) e ainda a variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}). Em ambos a mistura rejuvenescida apresentou valores superiores às misturas de referência, o que demonstra a sua maior propensão para deformar. Este decréscimo do desempenho da mistura rejuvenescida em relação às misturas de referência, deverá estar associado à maior quantidade de mastique e baixa porosidade já referidos quando se descreveu a avaliação à fadiga. Acresce que uma maior suscetibilidade do betume rejuvenescido com OAU a médias e altas temperaturas, pode também condicionar o resultado desta avaliação, que é efetuada a 60°C. De qualquer forma, visto o resultado em valor absoluto, não se pode falar de um mau resultado, podendo dizer-se que é adequado a pavimentos menos exigentes como se pretende com a utilização da mistura em estudo.

A análise da sensibilidade à água permitiu ainda verificar que a mistura rejuvenescida apresenta uma sensibilidade menor que as misturas de referência, ou seja, trata-se de uma mistura com maior resistência à água. O valor do ITSR apresentado pela mesma é de cerca de 104%, o que traduz essa resistência. Tal ocorrência poderá ser explicada pela baixa porosidade da mistura, que por se apresentar como uma mistura mais “fechada” não apresentou uma suscetibilidade significativa à presença da água. No que diz respeito aos valores de ITSR, apesar da mistura rejuvenescida apresentar um valor superior, as condições de ensaio utilizadas pelos restantes autores não foram exatamente as mesmas, pelo que a diferença dos valores obtidos tem também a influência desta diferença.

Finalizada a avaliação da resistência mecânica, foi ainda avaliada a viabilidade económica da aplicação da mistura rejuvenescida numa camada de desgaste de cerca de 5 cm. Foi estimado um custo de pavimentação de cerca de **2 €/m²**, que quando comparado com um AC14 surf equivalente, representa uma redução dos custos em cerca de 60% para a camada de desgaste de um pavimento de baixo a médio tráfego.

Com este trabalho pode concluir-se que as misturas betuminosas obtidas por fresagem de pavimentos e rejuvenescidas por OAU, poderão apresentar-se como uma alternativa viável às soluções de pavimentação correntes para camadas de desgaste. A avaliação do desempenho obtida no decorrer dos vários ensaios indica que as mesmas poderão apresentar um desempenho bastante satisfatório. Para além disso, tratam-se de misturas que ao reciclar quase totalmente materiais anteriormente aplicados contribuem fortemente para uma lógica de economia circular em pavimentação rodoviária.

5.3 Trabalhos futuros

Uma vez que o uso de misturas fresadas rejuvenescidas a partir de OAU como solução de pavimentação é ainda uma técnica pouco aplicada, a continuidade do estudo destas soluções é fundamental para melhorar o conhecimento sobre as mesmas.

Como tal, deve ser ajustada a formulação da mistura rejuvenescida de modo a que as propriedades mecânicas avaliadas possam ser melhoradas, como é o caso da resistência à deformação permanente. Para além disto, devem ser avaliadas as características de superfície da mistura, nomeadamente o coeficiente de atrito e a textura e, ainda, as características obtidas após o envelhecimento da mistura, de modo a que possa ser definido o seu modo de aplicação com maior segurança. Para tal, deve procurar-se robustecer a experiência de aplicação promovendo trechos experimentais que conduzam à obtenção de uma maior informação a cerca da aplicação destas misturas prometedoras.

Referencias e documentos normativos

Referências bibliográficas

Asli, H., Ahmadiania, E., Zargar, M., Karim, M. (2012). "Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder". *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 398-405.

Azahar, W., Jaya, R., Hainin, M., Bujang, M., Ngadi, N. (2016). "Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder". *Construction and Building Materials*, Vol. 126, pp. 218-226.

Baghae Moghaddam, T., Baaj, H. (2016). "The use of rejuvenating agentes in production or recycled hot mix asphalt: A systematic review". *Construction and Building Materials*, Vol. 114, pp. 805-816.

Batista, F. (2009). "Reabilitação de pavimentos flexíveis através de reciclagem com cimento". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.

Bowers, B. (2013). "Investigation of Asphalt Pavement Mixture Blending Utilizing Analytical Chemistry Techniques". Tese de Doutorado, Universidade do Tennessee

Branco, E., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2005). "Pavimentos Rodoviários". Livraria Almedina, Coimbra.

Burguete, L. (2013). "Contribuição para o estudo do comportamento de misturas betuminosas incorporando nanomateriais". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.

Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B., Wu, S. (2014). "High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking oil and cotton seed oils". *Construction and Building Materials*, Vol. 59, pp. 10-16.

Crucho, J. (2018). "Development of na Accelerated Asphalt Concrete Aging Method and Utilization of Nano-Modifiers to Improve Durability of Asphalt Concrete". Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico

Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., Navaro, J. (2013). "Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agente". *Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 175-181.

LNEC (2005). "Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários". Curso organizado por FUNDEC/LNEC/IST

Mahrez, A., Karim, M., Ibrahim, M., Katman, H. (2009). "Prospects of Using Waste Cooking Oil as Rejuvenating Agent in Bituminous Binder". *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, pp. 289.

Martinho, F. (2005). "Reciclagem de Pavimentos – Estado de Arte, Situação Portuguesa e Selecção do Processo Construtivo". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Silva, L. (2016). "Camadas de desgaste betuminosas com adição de borracha por via seca – Avaliação da resistência à reflexão de fendilhamento". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Singh-Ackbarali, D., Maharaj, R., Mohamed, N., Ramjattan-Harry, V. (2017). "Potential of used frying oil in paving material: solution to environmental pollution problema". *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, Issue 13, pp. 12220-12226.

Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D., Guo, C. (2016). "Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil". *Construction and Building Materials*, Vol. 102, pp. 496-504.

Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M. (2012). "Investigation of the possibility of using waste cooking oil as rejuvenating agente for aged bitumen". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 233-234, pp. 254-258.

Zaumanis, M., Mallick, R., Frank, R. (2014). "100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis". *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 92, pp. 230-245.

Zaumanis, M., Mallick, R., Frank, R. (2015). "Evaluation of diferente recycling agentes for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt" *Materials and Structures*, Vol. 48, Issue 8, pp. 2475-2488.

Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Woods, M. (2016). "Quantitative evaluation of blending and diffusion in high RAP and RAS mixtures". *Materials & Design*, Vol. 89, pp. 1161-1170.

Documentos normativos

CEN (2003a), "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens", EN 12697-6, Comité Européen de Normalisation

CEN (2003b), "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens", EN 12697-8, Comité Européen de Normalisation

CEN (2003c), "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor", EN 12697-33, Comité Européen de Normalisation

CEN (2003d), "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracking", EN 12697-22, Comité Européen de Normalisation

CEN (2003e), "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens", EN 12697-23, Comité Européen de Normalisation

CEN (2004a), "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test", EN 12697-34, Comité Européen de Normalisation

CEN (2004b), "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 30: Specimen preparation by impact compactor", EN 12697-30, Comité Européen de Normalisation

CEN (2004c), "Bituminous mixtures. Test methods. Part 35: Laboratory mixing", EN 12697-35, Comité Européen de Normalisation

CEN (2004d) "Bituminous mixtures. Test methods. Part 24: Resistance to fatigue", EN 12697-24, Comité Européen de Normalisation

CEN (2004e), "Bituminous mixtures. Test methods. Part 26: Stiffness", EN 12697-26, Comité Européen de Normalisation

CEN (2008), "Bituminous mixtures. Test methods. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens", EN 12697-12, Comité Européen de Normalisation

IPQ (2011a), "Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação", NP EN 12591, Instituto Português da Qualidade

IPQ (2011b), "Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso" NP EN 13108-1, Instituto Português da Qualidade

IPQ (2014a), "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método da peneiração", NP EN 933-1, Instituto Português da Qualidade

IPQ (2014b), "Misturas betuminosas. Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 5: Determinação da baridade máxima", NP EN 12697-5, Instituto Português da Qualidade

Anexos

Anexo 1 – Valores de referência do Caderno de Encargos da IP

Quadro 14.03.2n: Camadas de misturas betuminosas a quente							
Camada de desgaste							
Requisitos /Propriedades	Ref. normativa	Condições específicas de ensaio	Uni	Tipo de mistura			
				AC 14 surf (BB)	PA 12,5 (BBd)	AC10 surf (mBBr)	AC14 surf (BBr)
				rubrica 14.03.2.4.1	rubrica 14.03.2.4.2	rubrica 14.03.2.4.3	rubrica 14.03.2.4.4
Característ. Marshall	Estabilidade, máx.	EN 12697-34	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	KN	$S_{max15}^{(a)}$	NA	$S_{max15}^{(a)}$
	Estabilidade, mín.				$S_{min7,5}$		$S_{min12,5}$
	Deformação, máx.				F4		F4
	Deformação, mín.				F2		F2
	Quociente Marshall				Qmin3		Qmin3
Vazios na mistura de agregados (VMA), mín.	EN 12697-8	EN 12697-8 Calculada com base na bitudade máxima teórica ^(b) - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na bitudade ^(c) determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	VM _{Amin14}	VM _{AminNR}	VM _{Amin14}	
Porosidade, V _m	EN 12697-8	EN 12697-8 Calculada com base na – bitudade máxima teórica ^(b) - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na bitudade ^(c) determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	V _{min3,0-V_{max5}}	V _{min22-V_{max30}}	V _{min3,0-V_{max6}}	
Relação ponderal de filler /ligante	-	Estudo de formulação (item 15.03.2)	%	Item 14.03.0-3			
Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios de compressão Marshall, mín.	MIL-STD-620A	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas ^(d)	%	80			
Resistência à Deformação Permanente ("Wheel-tracking")	Taxa de deformação WT _{SUR}	EN 12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, temperatura do ensaio a 60 °C	mm/10 ³ ciclos de carga	Categoria a declarar	NA	Categoria a declarar
	Profundidade de rodagem máxima, PRD _{ART}						
% de ligante, mín.	-	-	%	$B_{min4,0}^{(e)}$	$B_{min4,0}^{(f)}$	$B_{min5,0}^{(f)}$	$B_{min4,0}^{(g)}$
Sensibilidade à água, ITSR, mín	EN 12697-12	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 – 75 pancadas, temperatura do ensaio: 15° C ^(h)	%	Categoria a declarar			
Permeabilidade <i>in situ</i>	EN 12697-40	-	s	NA	Categoria a declarar	NA	NA
Permeabilidade <i>in situ</i> (permeâmetro LCS)	NLT 327	-	s		10-30		
Perda de massa, PL	EN 12697-17	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas, temperatura do ensaio: 25	%		Categoria a declarar		
Ensaio Cântabro húmido ⁽ⁱ⁾ , máx	NL T36 2 ^(j)	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 perda por desgaste: NP EN 1097-2, temperatura do ensaio: 25° C	%		≤ 25		

Anexo 2 – Caracterização e calibração do fresado fornecido pela JJR



Código da obra:	Tipo de Mistura
Nome da obra:	AC 14 surf 35/50 (BB)
Dono de Obra:	Amostra n.º

Percentagem de Betume

Código do ensaio:	Gr: P; Pass: Vm; S: B	Norma:	NP EN 933; EN 12697-6; EN 12697-8; EN 12697-34; EN 12697-39
-------------------	-----------------------	--------	---

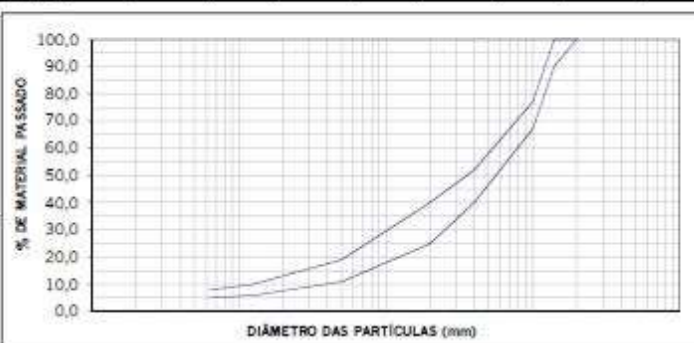
Dia da colheita	18-06-2018	Temperatura	
Localização	A23	Hora	

	Peneiros mm	Material Retido		Mat. Acumulado		Fuso	
		C. J.J.R. (g)	Perc. (%)	Passado (%)	Retido (%)	Limite inferior	Limite superior
	20	0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	14	0	100,0		100,0	90,0	100,0
	10	0	0,0		100,0	67,0	77,0
Provetes (Compactador de impacto com pedestral de madeira)	4	0	0,0		100,0	40,0	52,0
Nº pancadas	75	2	0,0		100,0	25,0	40,0
Temperatura compactação	165 °C	0,5	0,0		100,0	11,0	19,0
	0,125	0	0,0		100,0	6,0	10,0
Baridade máxima teórica (Procedimento A - Volumétrico)	0,063	0	0,0		100,0	5,0	8,0
	< 0,063	0	0,0		100,0		
#REF!	Total		100,0	100,0	100,0		

Nº prov.	h média h (mm)	ρ _w (Kg/m³)	Peso (g)			Baridade ρ _{bet} (kg/m³)	Caract. Volumétricas			Estabilidade (S)		Deform. F ₁ (mm)	Deform. F ₂ (mm)	Quociente Marshall (kN/mm)
			no ar (m ₁)	na água (m ₂)	sup. seca (m ₃)		V _a (%)	VMA (%)	VFB (%)	Medida (N)	Corrig. (N)			
1	63													
2	63													
3	63													
4	63													
Procedimento	B	Temp.			Médias									

Pesos (g)		
Tara	W _t	3 910,4 g
Tara+Amostra	W ₁₊₂	5 528,7 g
Tara+Agregado	W ₁₊₃	1 618,3 g
Amostra	W ₄	1 618,3 g
Agregado	W ₅	1 541,2 g
Betume	W _{bet}	77,1 g

Betume	
Método/Valor de calibração	
% betume	4,76%
Baridade betume	1020
Rel. ponderal filler/betume	0,00



Ensaio:	Verificou:	Em conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
Operador Laboratório		Obs: % betume amostra

Código da obra:	Tipo de Mistura AC 14 surf 35/50 (BB)
Nome da obra:	
Dono de Obra:	
Amostra n.º	

Percentagem de Betume

Código do ensaio:	Gr: Passa; Vm: 5; B	Norma:	NP EN 933; EN 12697-6; EN 12697-8; EN 12697-34; EN 12697-39
-------------------	---------------------	--------	--

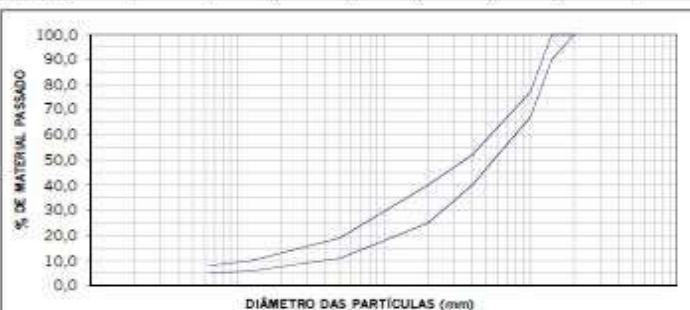
Dia da colheita:	18-06-2018	Temperatura:	
Localização:	A23	Hora:	

Peneiros	Material Retido		Mat. Acumulado		Fuso		
	mm	C. J.J.R. (g)	Perc. (%)	Passado (%)	Retido (%)	Limite inferior	Limite superior
20	0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
14	0	100,0		100,0	100,0	90,0	100,0
10	0	0,0		100,0	100,0	67,0	77,0
4	0	0,0		100,0	100,0	40,0	52,0
Provetes (Compactador de impacto com pedestral de madeira)							
Nº pancadas	75	2	0	0,0	100,0	25,0	40,0
Temperatura compactação	165 °C	0,5	0	0,0	100,0	11,0	19,0
		0,125	0	0,0	100,0	6,0	10,0
Bandeja máxima teórica (Procedimento A - Volumétrico)							
		0,063	0	0,0	100,0	5,0	8,0
		< 0,063	0	0,0	100,0		
Total			100,0	100,0	100,0		

Nº prov.	h média (mm)	ρ_w (kg/m³)	Peso (g)			Bandeja ρ_{mist} (kg/m³)	Caract. Volumétricas			Estabilidade (S)		Deform. F (mm)	Deform. F ₂ (mm)	Quociente Marshall (kN/mm)
			no ar (m ₁)	na água (m ₂)	sup. seca (m ₃)		V _m (%)	VMA (%)	VFB (%)	Medida (N)	Corrig (kN)			
1	63													
2	63													
3	63													
4	63													
Procedimento		B	Temp.	21,0 °C	Médias									

Pesos (g)		
Tara	W_1	3 910,4 g
Tara+Amostra	W_{1+a}	5 415,0 g
Tara+Agregado	W_{1+a}	5 411,8 g
Amostra	W_a	1 504,6 g
Agregado	W_g	1 501,4 g
Betume	W_{bet}	3,2 g

Betume	
Método/Valor de calibração	
% betume	0,21%
Baridade betume	1,020
Rel. ponderal filler/betume	0,00



Ensaio:	Verificou:	Em conformidade: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
Operador Laboratório		Obs: Calibração:

Anexo 3 – Relatório da JJR para a mistura AC14 surf 35/50 original



Tipo de Estudo: ENSAIOS DE TIPO Local de Recolha: CENTRO DE PRODUÇÃO DE MOURISCAS Cliente: CONSTRUÇÕES J.J.R. & FILHOS S.A.	Tipo de Material em Estudo AC 14 surf 35/50 (BB)
--	--

RELATÓRIO DE ENSAIO

Relatório nº: _____

Norma: **EN 13108-20**

OBJECTIVO
 Caracterização inicial de mistura betuminosa

RELATÓRIO

ENSAIO	MÉTODO	CATEGORIA	BOLETIM
Granulometria	EN 12697-2	(em anexo)	5DT08
Percentagem de ligante	EN 12697-39	B _{med,0}	5DT08
Porosidade	EN 12697-8 Compactador impacto, 75 pancadas, Baridade determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B e Baridade máxima teórica, determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A	V _{med,0} a V _{max,0}	5DT08
Sensibilidade à água	EN 12697-12, 23	ITSR ₄₀	5DT112
Resistência à deformação permanente	EN 12697-22, Equipamento pequeno, método B, ao ar e a 60°C, compactador de rolos	WTS _{24/6,30}	5DT110
Temperatura		150°C a 190°C	

OBSERVAÇÕES

Elaborou:	Verificou:	Em conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
 09-06-2017	 09-06-2017	Obs:

Tipo de Estudo: ENSAIOS DE TIPO Local de Recolha: CENTRO DE PRODUÇÃO DE MOURISCAS Cliente: CONSTRUÇÕES J.J.R. & FILHOS S.A.	Tipo de Material em Estudo AC 14 surf 35/50 (BB)
--	--

RELATÓRIO DE ENSAIO

QUADRO RESUMO

Materiais		PO DE PEDRA 0/4	AGREGADO 0/6,3	AGREGADO 8/10	AGREGADO 10/16	FLER COMERCIAL	BETUME	ADITIVO	MISTURA	
Origem		TÁTIMA	ZAMBUAL	ZAMBUAL	ZAMBUAL	RIO MAIOR	25/50	POLYRAM		
Tipo		CALCÁRIO	QUARTZITO	QUARTZITO	QUARTZITO	CALCÁRIO	Trimerização			
COMPOSIÇÃO NA MISTURA		15%	36%	24%	22%	2%	5,0%	3 kg/ton		
CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	GRANULOMETRIA (% de passados)	20,0 mm	100	100	100	100	100		100	
		14,0 mm	86	99	100	100	72	100	94	
		10,0 mm	66	80	100	100	61	4	100	73
		4,0 mm	40	54	96	83	1	1	100	47
		2,0 mm	26	38	66	53	1	0	100	32
		0,5 mm	12	20	32	24	1	0	100	16
		0,125 mm	4	12	9	11	1	0	88	8
		0,063 mm	3,1	7,1	7,1	6,6	0,5	0,3	70,5	5,1
	Massa volúmica das partículas (g/cm ³)	Aparente		2,69	2,62	2,65	2,64	2,61*		
		Secas		2,65	2,58	2,61	2,59			
Saturadas c/ a superfície seca		2,65	2,59	2,63	2,61					
Média ponderada das partículas secas							2,60			
Absorção de água (%)		0,0	0,0	0,0	0,7					
Penetração do betume (mm)							45*			
CARACTERÍSTICAS DA MISTURA	Betume (%)								5,0%	
	B _{max} - Betume corrigido (%)								5,0%	
	Porosidade (%)								4,2	
	VMA _{max}								14	
	VFB _{max}								80	
	Sensibilidade à água (%)								90%	
	Resist. à deformação permanente (mm/10 ⁵ ciclos)								0,2	

OBSERVAÇÕES

* - Dados do fornecedor (ficha técnica).

Elaborou:	Verificou:	Em conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
 09-06-2017	 09-06-2017	Obs:

Código da obra: ENSAIOS DE TIPO	Tipo de Mistura
Nome da obra: CENTRO DE PRODUÇÃO DE MOURISCAS	AC 14 surf 35/50 (BB)
Dono de Obra: CONSTRUÇÕES J.J.R. & FILHOS S.A.	Amostra n.º

Percentagem de Betume

Código do ensaio: Gr, P _{base} , Vm, S, B	Norma: NP EN 933; EN 12697-6; EN 12697-8; EN 12697-34; EN 12697-39
--	--

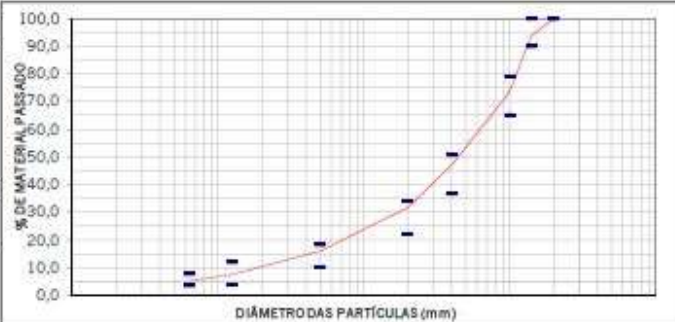
Dia da colheita: 09-06-2017	Temperatura: 172,0 °C
Localização: LABORATÓRIO	Hora: 10:30

Peneiros	Material Retido		Mat. Acumulado		Fuso			
	mm	Peso (g)	Perc. (%)	Passado (%)	Retido (%)	Limite inferior	Limite superior	
20	0	0,0	100,0	0,0	100,0	100,0		
14	95	6,3	93,7	6,3	90,0	100,0		
10	302	20,3	73,4	26,6	65,1	79,1		
4	395	26,5	46,9	53,1	36,9	50,9		
Nº bancadas	75	2	227	15,2	31,8	68,2	22,2	34,2
Temperatura compactação	165 °C	0,5	236	15,8	15,9	84,1	10,3	18,3
	0,125	125	8,4	7,5	92,5	4,0	12,0	
Bandade máxima teórica (Procedimento A - Volumétrico)	0,063	36	2,4	5,1	94,9	3,7	7,7	
	< 0,063	76	5,1	0,0	100,0			
2489	Total	1493	100,0	0,0	100,0			

Nº prov.	h média (mm)	P _w (kg/m³)	Peso (g)			Bandade P _{best} (kg/m³)	Caract. Volumétricas			Estabilidade (S)		Deform. F (mm)	Deform. F _r (mm)	Quociente Marshall (MN/mm)
			no ar (m _a)	na água (m _w)	sup. seca (m _s)		V _m (%)	V _{MA} (%)	V _{FB} (%)	Medida (N)	Corrig. (N)			
1	64	997,1	1199,8	700,9	1202,6	2385	4,2	15,7	73,3					
2	64	997,1	1200,4	701,4	1203,5	2384	4,2	15,7	73,1					
3	64	997,1	1199,2	700,8	1202,4	2384	4,2	15,7	73,1					
4	64	997,1	1200,7	701,1	1203,9	2381	4,3	15,8	72,6					
Procedimento	B	Temp.	25,0 °C	Médias	2383	4,2	15,7	73,0						

Pesos (g)		
Tara	W _t	3 907,1 g
Tara+Amostra	W _{t+a}	5 478,0 g
Tara+Agregado	W _{t+a}	5 400,2 g
Amostra	W _a	1 570,9 g
Agregado	W _a	1 493,1 g
Betume	W _{bet}	77,8 g

Betume		
Método/Valor de calibração		
% betume		5,0%
Bandade betume		1030
Rel. ponderal filler/betume		1,03



Ensaio: Operador Laboratório	Verificou: José Matos	Em conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
José Matos 09-06-2017	 09-06-2017	Obs:

Código da obra: ENSAIOS DE TIPO	Tipo de Mistura em Estudo:
Nome da obra: CENTRO DE PRODUÇÃO DE MOURISCAS	AC 14 surf 35/50 (BB)
Dono de Obra: CONSTRUÇÕES J.J.R. & FILHOS S.A.	Amostra n.º

Baridade Máxima Teórica pelo Método Volumétrico

Código do ensaio: ρ_{mv}	Norma ou especificação: EN 12697-5
-------------------------------	------------------------------------

Número do Ensaio		1	2	3	4
T	Temperatura do ensaio (°C)	25°C			
m_1	Picnómetro sem encher (g)	1.092,0			
m_2	Picnómetro sem encher de água + Amostra (g)	2.305,0			
m_3	Picnómetro+ água + Amostra (g)	10.904,0			
ρ_w	Massa volúmica da água (kg/m³)	997,1			
m_4	Picnómetro cheio de água à T _{calibração} (g)	10.177,0			
ρ_{wc}	Massa volúmica da água à T _{calibração} (kg/m³)	997,1			
$V_p = \frac{m_4 - m_1}{\rho_{w,c}}$	Volume do picnómetro (m³)	9,1			
$\rho_m = \frac{m_3 - m_1}{V_p - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_w}\right)}$	Baridade máxima teórica (kg/m³)	2.489			

Baridade máxima teórica $\rho_m = 2489 \text{ kg/m}^3$

OBS:

Ensaiou: Operador Laboratório	Verificou: 	Em conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
José Matos 09-06-2017	09-06-2017	Obs:

Código da obra: ENSAIOS DE TIPO	Tipo de Mistura
Nome da obra: CENTRO DE PRODUÇÃO DE MOURISCAS	AC 14 surf 35/50 (BB)
Dono de Obra: CONSTRUÇÕES J.J.R. & FILHOS S.A.	Amostra n.º

BARIDADE

 Código do ensaio: ρ_{dry}

Norma: EN 12697-6

DATA DA COLHEITA	09-06-2017
LOCALIZAÇÃO	Central/Km: LABORATÓRIO
	Lado:

Provetes:	
(Compactador de impacto com pedaleira de madeira)	
N.º pancadas:	75
Temperatura compactação:	165 °C

% Betume	Provetes	Diâmetro médio D (mm)	Altura média h (mm)	Temp. (°C)	ρ_w (Kg/m³)	Peso (g)			Baridade ρ_{sec} (Kg/m³)
						no ar (m_a)	na água (m_w)	Sup. seca (m_s)	
5,0%	1	101,0	64,0	25	997,1	1199,8	700,9	1202,6	2385
	2	101,0	64,0	25	997,1	1200,4	701,4	1203,5	2384
	3	101,0	64,0	25	997,1	1199,2	700,8	1202,4	2384
	4	101,0	64,0	25	997,1	1200,7	701,1	1203,9	2381
Valores médios:									2383

% Betume	Provetes	Diâmetro médio D (mm)	Altura média h (mm)	Temp. (°C)	ρ_w (Kg/m³)	Peso (g)			Baridade ρ_{sec} (Kg/m³)
						no ar (m_a)	na água (m_w)	Sup. seca (m_s)	
5,0%	5	101,0	64,0	25	997,1	1201,0	701,5	1204,5	2381
	6	101,0	64,0	25	997,1	1200,1	701,4	1203,2	2385
	7	101,0	64,0	25	997,1	1199,6	700,3	1202,7	2381
	8	101,0	64,0	25	997,1	1199,4	700,7	1202,5	2383
Valores médios:									2382

Baridade (Kg/m³)	2383
------------------	------

 OBS.:

Ensaiou:	Verificou:	Em Conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
Operador Laboratório:		
José Matos 09-06-2017	 09-06-2017	

Código da obra: ENSAIOS DE TIPO	Tipo de Mistura
Nome da obra: CENTRO DE PRODUÇÃO DE MOURISCAS	AC 14 surf 35/50 (BB)
Dono de Obra: CONSTRUÇÕES J.J.R. & FILHOS S.A.	Amostra n.º

Sensibilidade à Água

Código do ensaio: ITSR	Norma: EN 12697-12, 23
DATA DA COLHEITA: 09-06-2017	Provetes
LOCALIZAÇÃO: Central/Km: LABORATÓRIO	(Compactador de impacto com pedestal de madeira)
Lado:	Nº pancadas: 75
	Temperatura compactação: 165

A seco a (20 ± 5) °C

% Retorno	Nº Provetes	Dímetro médio D (mm)	Altura média inicial h (mm)	Altura média final h (mm)	Baridade P _{bras} (kg/m³)	P (kN)	ITS _v (kPa)	Deformação (mm)	Tensão (mm)	Tipo de Fissura / Obs. Agregado
5,0%	1	101,0	64,0	64,0	2385	15,240	0,063			Combinação/ Agr. Intactos
	2	101,0	64,0	64,0	2384	14,895	0,061			Combinação/ Agr. Intactos
	3	101,0	64,0	64,0	2384	15,341	0,063			Combinação/ Agr. Intactos
	4	101,0	64,0	64,0	2381	14,689	0,060			Combinação/ Agr. Intactos
Valores médios:					2383		0,062			

Imersão em água a (60 ± 1) °C / 24 h

% Retorno	Nº Provetes	Dímetro médio D (mm)	Altura média inicial h (mm)	Altura média final h (mm)	Baridade P _{bras} (kg/m³)	P (kN)	ITS _v (kPa)	Deformação (mm)	Tensão (mm)	Tipo de Fissura / Obs. Agregado
5,0%	5	101,0	64,0	64,0	2381	13,465	0,055			Combinação/ Alguns agr. Partidos
	6	101,0	64,0	64,0	2385	13,751	0,057			Combinação/ Alguns agr. Partidos
	7	101,0	64,0	64,0	2381	13,362	0,055			Combinação/ Alguns agr. Partidos
	8	101,0	64,0	64,0	2383	13,448	0,055			Combinação/ Alguns agr. Partidos
Valores médios:					2382		0,056			

Resistência à Tração Indirecta

90%

OBS.:

Ensaiou:	Verificou:	Em Conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
Operador Laboratório		
José Matos 09-06-2017	09-06-2017	

Código da obra: ENSAIOS DE TIPO	Tipo de Mistura
Nome da obra: CENTRO DE PRODUÇÃO DE MOURISCAS	AC 14 surf 35/50 (BB)
Dono de Obra: CONSTRUÇÕES J.J.R. & FILHOS, S.A.	Amostra n.º

Resistência à Deformação Permanente

Código do ensaio: WTS	Norma: EN 12697-22
------------------------------	---------------------------

DATA DA COLHEITA/FABRICO	09-06-2017
LOCALIZAÇÃO	LABORATÓRIO

EQUIPAMENTO	Small-size device
PROCEDIMENTO	B ao ar

Condições de Compactação		
Provete N°	1	2
Norma	EN 12697-33	EN 12697-33
Método	rolo de aço liso	rolo de aço liso
Massa (kg)	8026	8014
Temp. (°C)	160	160

Condições de Ensaio	
N° Ciclos	10000
Temperatura (°C)	60
Curso (mm)	230
Frequência (Ciclos/min)	26,5
Carga (N)	700

Baridade (EN 12697-6)			
Procedimento B	T	Temperatura (°C)	24,8
	ρ_w	Baridade da água (Kg/m³)	997,4
	m_1	Peso no ar (g)	8012
	m_2	Peso na água (g)	4628
	m_3	Peso superfície seca (g)	7990
	$\rho_{bet} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w =$	Baridade do provete (g/cm³)	2,38

Provete N°		1	2	Média
L	Comprimento (mm)	320	320	
I	Largura (mm)	260	260	
e	Espessura (mm)	40	40	
PRD_{AIR}	Profundidade da rodeira (%)	12,5	11,8	12,1
RD_{AIR}	Profundidade da rodeira (mm)	5,0	4,7	4,9
$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10000} - d_{5000})}{5}$	WTS - Taxa de deformação (mm/10³ ciclos)	0,2	0,2	0,2

Ensaiou:	Verificou:	Em conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
Operador Laboratório		Obs:
José Matos 09-06-2017	09-06-2017	

Anexo 4 – Propriedades e resultados dos provetes prismáticos

Quadro A.1 – Propriedades e resultados dos provetes prismáticos (5 x 5 x 40 cm)

Provete	Comprimento mm	Largura mm	Altura mm	Massa seca g	Baridade kg/m ³	Vm %	VMA %	Extensão um/m	Nº Ciclos
OA1	400	50,99	51,26	2413,20	2367,15	2,8	13,22	300	631996
OA2	400	51,34	51,24	2465,15	2375,46	2,5	12,92	400	37152
OA3	400	50,98	51,63	2450,45	2374,61	2,5	12,95	500	61091
OA4	400	51,68	51,38	2463,70	2373,72	2,5	12,98	400	49434
OA5	400	51,06	50,77	2405,85	2373,13	2,6	13,00	500	12297
OA6	400	50,69	51,15	2432,45	2374,59	2,5	12,95	300	288116
OA7	400	51,06	50,79	2422,25	2364,98	2,9	13,30	400	84698
OA8	400	51,43	51,04	2453,05	2368,38	2,8	13,18	500	18824
OA9	400	50,67	51,26	2427,30	2380,75	2,2	12,73	300	141033
OA10	400	51,38	51,06	2457,65	2373,97	2,5	12,97	500	22699
OA11	400	51,73	51,20	2457,40	2379,72	2,3	12,76	300	146487
OA12	400	51,54	51,42	2500,15	2388,65	1,9	12,44	500	23061
OA13	400	52,21	51,43	2527,75	2394,71	1,7	12,21	300	383583
OA14	400	51,45	51,25	2491,85	2389,65	1,9	12,40	400	59498
OA15	400	50,41	50,48	2393,90	2384,34	2,1	12,59	500	17139
OA16	400	51,55	50,79	2440,35	2376,02	2,4	12,90	300	315170
OA17	400	51,39	51,36	2467,80	2384,47	2,1	12,59	400	73020
OA18	400	51,51	51,28	2471,55	2389,71	1,9	12,40	400	42611
OA19	400	51,76	51,40	2492,45	2392,98	1,7	12,28	300	324373
OA20	400	50,74	50,85	2414,05	2385,46	2,1	12,55	500	18904

Anexo 5 – Propriedades e resultados das lajetas

Quadro A.2 – Propriedades e resultados das lajetas (5 x 30 x 40 cm)

Provete	Altura mm	Massa seca g	Baridade geométrica kg/m ³	Vm %	VMA %	Rdair mm	PRDair %	WTSair mm/10 ³ ciclos
Laje 1	51,445	14250	2308,290407	5,2	15,4	8,5	16,6	0,344
Laje 2	51,3075	14250	2314,476441	5,0	15,2	6,7	13,1	0,334

Quadro A.3 – Resultados fornecidos pelo ensaio wheel-tracking

Ciclos	Deformação (mm)	
	L1	L2
0	0,00	0,05
250	2,33	1,74
500	3,22	2,27
750	3,76	2,6
1000	4,04	2,91
1250	4,32	3,15
1500	4,53	3,33
1750	4,75	3,5
2000	4,95	3,65
2250	5,14	3,81
2500	5,33	3,95
2750	5,5	4,09
3000	5,64	4,23
3250	5,87	4,33
3500	5,93	4,48
3750	6,17	4,61
4000	6,29	4,72
4250	6,43	4,8
4500	6,49	4,91
4750	6,71	4,98
5000	6,8	5,06
5250	6,79	5,18
5500	6,92	5,29
5750	7,12	5,37
6000	7,21	5,47
6250	7,35	5,56
6500	7,42	5,64
6750	7,54	5,71
7000	7,59	5,83
7250	7,69	5,9
7500	7,75	5,99
7750	7,83	6,06
8000	7,87	6,13
8250	7,96	6,24
8500	8,07	6,3
8750	8,2	6,39
9000	8,26	6,47
9250	8,36	6,54
9500	8,4	6,58
9750	8,58	6,67
10000	8,52	6,73

Anexo 6 – Propriedades e resultados dos provetes cilíndricos

Quadro A.4 – Propriedades e resultados dos provetes cilíndricos

Provetes	Ref	massa seca	baridade	Vm	VMA	Pico de carga	ITS
		g	kg/m ³	%	%	kN	kPa
Não condicionados	OA1	1252,85	2385,102	2,070511	12,56588	24,469	2333,131
	OA2	1240,7	2387,266	1,981652	12,48655	24,905	2373,467
	OA3	1257,45	2385,661	2,047556	12,54539	26,013	2470,133
Condicionados	OA4	1234,6	2384,27	2,104665	12,59638	26,152	2506,253
	OA5	1255,3	2391,136	1,822776	12,3447	26,216	2492,796
	OA6	1262,1	2383,599	2,132217	12,62098	26,646	2498,176