

# RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS USANDO ÓLEO ALIMENTAR COMO REJUVENESCEDOR

Francisco Fernandes<sup>1</sup>, Luís Picado-Santos<sup>2</sup>, Silvino Capitão<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1409-001, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1409-001, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa & Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Pedro Nunes, 3030-199, Coimbra, Portugal

---

## Sumário

*Este estudo pretende analisar a viabilidade técnica e económica do rejuvenescimento de misturas betuminosas fresadas a partir da incorporação de óleo alimentar usado (OAU). A mistura 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 sua viabilidade económica. A partir dos resultados obtidos conclui-se que a mistura rejuvenescida se apresenta como uma alternativa viável às misturas convencionais aplicadas atualmente.*

---

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

## 1 INTRODUÇÃO

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 (agravados pela ação do tráfego e de condições atmosféricas adversas), são irreversíveis e na maioria das vezes impõem uma reposição das camadas afetadas.

Durante 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 uma 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 é a 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).

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.* [1], Chen *et al.* [2], ou ainda Zargar *et al.* [3], 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, 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.* [4], 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. De um modo geral os autores verificaram que o uso de OAU, permitiu melhorar algumas qualidades nas misturas recicladas, nomeadamente na suscetibilidade à fadiga.

Tendo isto em conta, 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.

## **2 ESTUDO EXPERIMENTAL**

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).

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.

### **2.1 Caracterização dos materiais em estudo**

Quanto ao fresado utilizado neste estudo, trata-se de um fresado obtido a partir da mistura betuminosa original, 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. De acordo com a caracterização efetuada ao mesmo pela empresa fornecedora, o material fresado apresenta uma percentagem de ligante de cerca de 4,5%.

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. Trata-se de uma granulometria consideravelmente mais fina que a composição inicial, devido ao esmagamento do agregado aquando da sua remoção.

## 2.2 Formulação da mistura

No que diz respeito à definição da “receita” em si, foi efetuado um processo iterativo de tentativa e erro, no qual foram ensaiadas um conjunto de combinações diferentes de óleo e betume. O plano de trabalhos realizado em cada uma das tentativas foi executado com base na metodologia Marshall, de acordo com a norma EN 12697-34 para a formulação de misturas betuminosas.

Para a formulação da mistura foram utilizados os valores do ensaio de compressão de Marshall, uma vez que eram aqueles que poderiam ser comparáveis com os valores de referência disponíveis.

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.

No Quadro 1 estão representados os valores obtidos para cada uma dessas tentativas, assim como os valores de referência apresentados pelo Caderno de Encargos da IP. Os valores apresentados para cada uma das misturas apresentadas correspondem à média dos valores obtidos.

Quadro 1. Valores de força de rotura e 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%.

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%).

## 2.3 Caracterização mecânica da mistura

Após escolhida a formulação da mistura, a segunda fase do trabalho experimental passou pela sua caracterização e pela avaliação da viabilidade do uso do OAU. O plano de trabalhos a realizar nesta fase pode ser descrito em duas etapas distintas. 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 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 standard, fabrica de estudos externos semelhantes. No caso do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga, os resultados foram comparados com os estudos de Crucho [5] e ainda Silva [6], visto que as misturas AC14 de referência utilizadas por ambos são semelhantes à utilizada neste estudo. No caso da resistência à deformação permanente e da sensibilidade à água, tal como foi referido 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.

### 2.3.1 Ensaio de rigidez

No estudo em questão, o ensaio foi realizado segundo a norma EN 12697-26, sendo aplicada uma carga sinusoidal com uma amplitude de extensão de 50  $\mu\text{m/m}$ , sob um conjunto de frequências de 1, 3, 5, 10, 20 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.

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 1 e 2, encontram-se representadas as médias dos valores obtidos para cada frequência, juntamente com as misturas de referência.

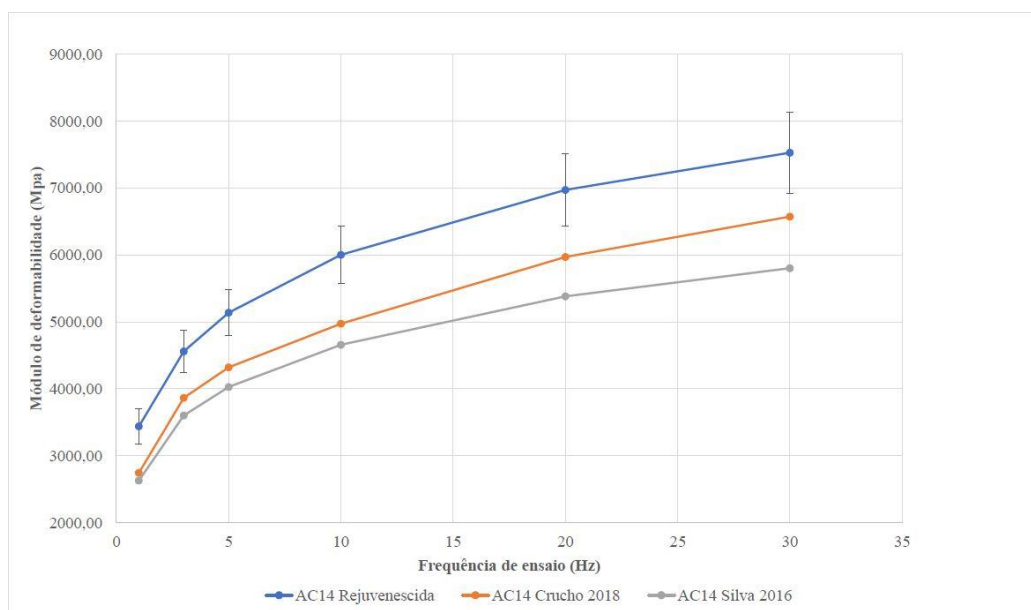


Figura 1. Módulo de deformabilidade dos provetes ensaiados e misturas de referência

No que diz respeito aos resultados obtidos, estes encontravam-se dentro do que era expectável, tendo em conta a mistura em questão. 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. Neste caso, pode existir a possibilidade de o betume da mistura não ter sido totalmente rejuvenescido e, portanto, na globalidade ficou mais enrijecido. 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.

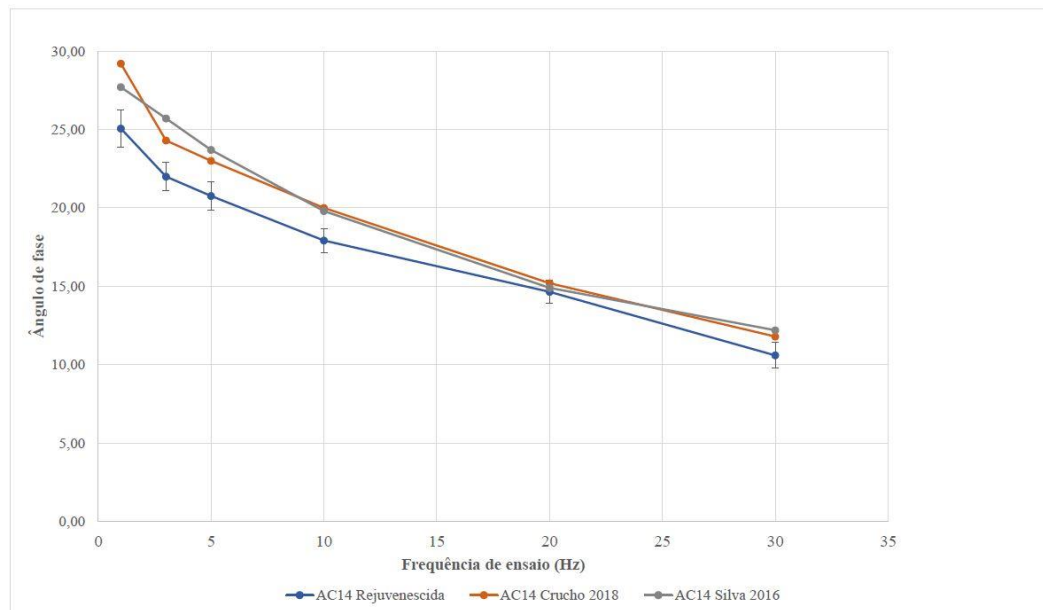


Figura 2. Ângulo de fase dos provetes ensaiados e misturas de referência

### 2.3.2 Ensaio de resistência à fadiga

Relativamente ao ensaio de resistência à fadiga, este foi realizado tendo em conta a norma EN 12697-24 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, correspondendo ao número de ciclos necessários para que o módulo de deformabilidade inicial seja reduzido em 50%.

Uma vez realizados os ensaios a todos os provetes escolhidos, foi possível calcular a lei de fadiga para a mistura rejuvenescida. Na Figura 3 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.

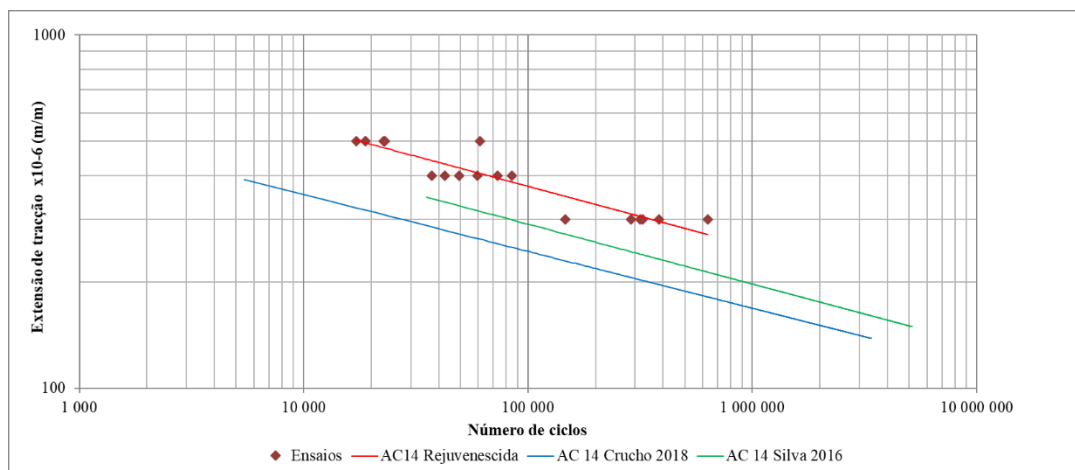


Figura 3. Leis de fadiga da mistura rejuvenescida e misturas de referência

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a mistura rejuvenescida apresentou um valor de  $\epsilon_6$  (extensão que conduz à rotura do material ao fim de um milhão de ciclos de carga) de 252  $\mu\text{m/m}$ , valor 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.

### 2.3.3 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, equipamento pequeno, procedimento B, testado ao ar. Durante o ensaio foi aplicada uma carga de  $700 \pm 10$  N no topo da lajeta a partir do movimento de uma roda normalizada. 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.

No Quadro 2 estão representados os resultados obtidos para as duas lajetas e, ainda, os valores apresentados pelas misturas de referência.

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. 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.

Quadro 2. Resultados obtidos do wheel-tracking para todas as misturas

Mistura	RD <sub>air</sub> (mm)	PRD <sub>air</sub> (%)	WTS <sub>air</sub> (mm/10 <sup>3</sup> 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

### 2.3.4 Ensaio de sensibilidade à água

O último ensaio a ser realizado, tratou-se do ensaio de sensibilidade à água, uma vez que a água é 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 e ainda o ensaio de tração indireta (ITS), descrito pela norma EN 12697-23.

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<sub>wet</sub>” e ITS<sub>dry</sub>”, correspondentes ao grupo condicionado e não condicionado, respetivamente. No Quadro 3, encontram-se os valores calculados para a mistura rejuvenescida e ainda alguns dos valores disponibilizados das misturas de referência.

Quadro 3. Valores do ITSR para as misturas AC14 (adaptado de Crucho [5])

Mistura	ITS <sub>dry</sub> (kPa)	ITS <sub>wet</sub> (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.

### 2.3.5 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 de baixo a médio tráfego e foram ainda tidas em consideração as operações que decorrem até à sua colocação em camada definitiva.

Por forma a obter os custos apresentados no Quadro 4, foram tidos em conta os custos atuais que podem encontrar-se 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).

Uma vez obtido o custo de pavimentação da mistura rejuvenescida em estudo, foi determinado o valor correspondente em €/m<sup>2</sup>. 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 €/m<sup>2</sup> [7]. 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 €/m<sup>2</sup>. Na Figura 4, 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.

Quadro 4. 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
<b>Custo total</b>	<b>16,74</b>

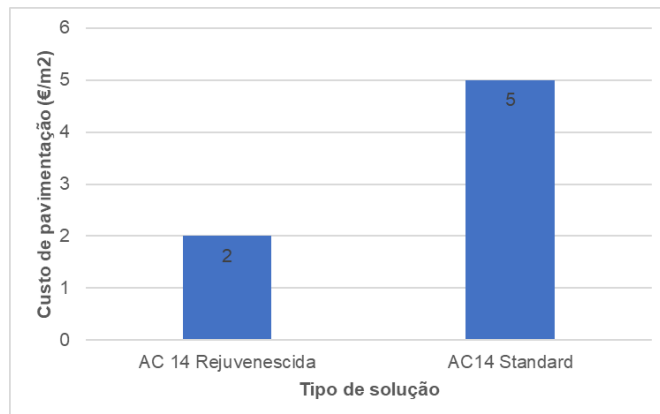


Figura 4. Comparação dos custos por m<sup>2</sup> entre a mistura rejuvenescida em estudo e a solução AC14 equivalente

### 3 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 replicação 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  $\epsilon_6$  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 ( $\text{PRD}_{\text{AIR}}$ ) e ainda a variação da deformação permanente ao ar ( $\text{WTS}_{\text{AIR}}$ ). 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 mástique e baixa porosidade. 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 pode considerar-se 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 €/m<sup>2</sup>, 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, trata-se de misturas que ao reciclar quase totalmente materiais anteriormente aplicados contribuem fortemente para uma lógica de economia circular em pavimentação rodoviária.

#### **4 AGRADECIMENTOS**

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 do estudo.

#### **5 REFERÊNCIAS**

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Zaumanis, M., Mallick, R., Frank, R. (2015). “Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt” *Materials and Structures*, Vol. 48, Issue 8, pp. 2475-2488
5. Crucho, J. (2018). “Development of an Accelerated Asphalt Concrete Aging Method and Utilization of Nano-Modifiers to Improve Durability of Asphalt Concrete”. Phd Thesis, Civil Department of Instituto Superior Técnico
6. Silva, L. (2016). “Camadas de desgaste betuminosas com adição de borracha por via seca – Avaliação da resistência à reflexão de fendilhamento”. Phd Thesis, Civil Department of Aveiro University
7. Fernandes, F. (2018). “Reciclagem total de misturas betuminosas usando óleo alimentar como rejuvenescedor”. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.