

# CAMADA DESGASTE COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA POR VIA SECA – ANÁLISE COMPARATIVA FACE A SOLUÇÕES CONVENCIONAIS DE TRATAMENTO DA EVOLUÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE FENDAS

Luís da Silva<sup>1</sup>, Agostinho Benta<sup>2</sup>, Luís Picado Santos<sup>3</sup> e Paulo Barreto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Egis Road Operation Portugal, Departamento do Património, Quinta de Calvilhe, 5100-038 Lamego, Portugal  
email: [luis.silva@egisportugal.pt](mailto:luis.silva@egisportugal.pt)

<sup>2</sup> RISCO, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

<sup>3</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>4</sup> Egis Road Operation Portugal, Departamento do Património, Quinta de Calvilhe, 5100-038 Lamego, Portugal

---

## Sumário

*Trabalhos recentes têm demonstrado que as misturas betuminosas com alta percentagem de borracha adicionada por via seca apresentam um melhor desempenho estrutural que as misturas betuminosas sem borracha. É prioritário encontrar soluções de reabilitação de pavimentos cada vez mais simples e mais económicas, mantendo ou aumentando o nível de qualidade requerido para as mesmas. Assim, efetua-se uma análise comparativa que atesta a adequabilidade do reforço de pavimentos fendilhados com a aplicação de uma camada de desgaste com incorporação de borracha, por via seca, em detrimento da utilização de soluções convencionais que passem pela operação de fresagem e reposição de camadas betuminosas.*

---

**Palavras-chave:** Misturas betuminosas; borracha; via seca; reflexão de fendas.

## 1 INTRODUÇÃO

Trabalhos recentes têm demonstrado que as misturas betuminosas com alta percentagem de borracha adicionada por via seca apresentam um melhor desempenho estrutural do que as misturas betuminosas sem borracha, com um efeito pronunciado na resistência à progressão de fendilhamento na própria mistura. Este efeito traduz um comportamento que deve ser valorado quando se pretende reabilitar pavimentos com deterioração avançada provocada por esse tipo de degradação.

Num contexto de elevada degradação dos pavimentos da rede rodoviária nacional, é prioritário encontrar soluções de reabilitação de pavimentos cada vez mais simples e mais económicas, mantendo o nível de qualidade requerido para as mesmas.

Neste sentido, pretende-se com este trabalho efetuar uma análise comparativa que permita atestar a adequabilidade do reforço de pavimentos fendilhados com a aplicação de uma camada de desgaste com incorporação de borracha, por via seca, em detrimento da utilização de soluções convencionais que passem pela operação de fresagem e reposição de camadas betuminosas.

Será efetuado um enquadramento teórico das degradações dos pavimentos, das técnicas de reabilitação dos mesmos e das metodologias utilizadas, e de possível utilização, no tratamento da reflexão de fendas. Apresentar-se-ão os resultados da avaliação da resistência à progressão de fendilhamento de uma camada de desgaste com incorporação de borracha, por via seca, e efetuar-se-á a comparação desta solução com as soluções convencionais normalmente utilizadas no tratamento da reflexão de fendas.

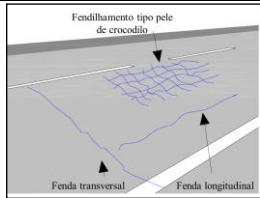
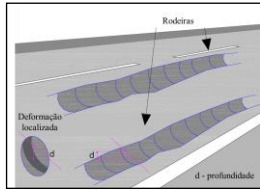
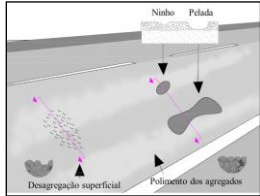
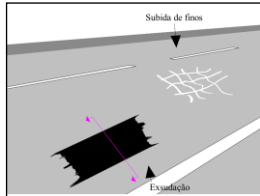
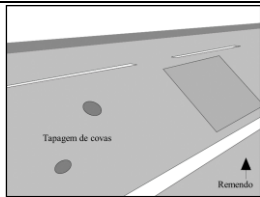
## 2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo efetua-se um enquadramento teórico das degradações dos pavimentos, das técnicas de reabilitação dos mesmos e das metodologias utilizadas, e de possível utilização, no tratamento da reflexão de fendas.

### 2.1 Degradação dos pavimentos

As degradações verificadas nos pavimentos flexíveis estão normalmente associadas a uma perda progressiva da qualidade inicial dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos, em particular das camadas betuminosas. Estas podem dever-se à atuação das solicitações do tráfego e a deficiências resultantes do projeto e/ou de problemas no processo construtivo [1]. As degradações podem agrupar-se em cinco principais grupos (Quadro 1), nomeadamente, fendilhamento, deformações, defeitos de superfície, movimento de materiais e reparações [2].

**Quadro 1. Grupos de degradações dos pavimentos flexíveis, adaptado de Estradas de Portugal [2]**

Grupo de degradações	Degradações	Esquema ilustrativo
Fendilhamento	Fendas longitudinais	
	Fendas transversais	
	Fendilhamento tipo pele de crocodilo	
Deformações	Deformações localizadas	
	Rodeiras	
Defeitos de superfície	Desagregações superficiais	
	Polimento dos agregados	
	Ninhos	
Movimento de materiais	Exsudação de betume	
	Subida de finos	
Reparações	Tapagem de covas	
	Remendos	

Quando se pretende reforçar um pavimento, é necessário ter em consideração todas as degradações existentes no momento da intervenção. No entanto, o grupo de degradações identificado no Quadro 1 como fendilhamento, é o principal responsável pela redução da vida útil dos reforços de pavimentos, especialmente devido à reflexão de fendas. A origem da reflexão de fendas está relacionada com os seguintes fatores [1], [3]:

- Tensões induzidas pelos ciclos térmicos na camada fendilhada, que ocorrem como resultado de variações cíclicas da temperatura, traduzindo-se na abertura e no fecho cíclicos das fendas existentes no pavimento;

- Ocorrência de tensões térmicas resultantes da redução rápida da temperatura na superfície do pavimento, atingindo valores críticos de tensão de tração potenciando a criação e propagação de fendas no reforço;
- Carregamento repetitivo do tráfego, induzindo um estado de tensão adicional na camada de reforço e aumentando a taxa de propagação do fendilhamento existente ou iniciando novo fendilhamento;
- Movimentos do solo de fundação normalmente concretizados por assentamentos diferenciais, expansão de solos devido a gelo e expansibilidade de argilas.

As principais opções para retardar, ou até evitar, o fenómeno de reflexão de fendas em reforços de pavimentos, são [1], [4]:

- Adoção de espessuras superiores às obtidas pela metodologia convencional de dimensionamento;
- Otimização da rigidez e da resistência à tração da mistura usada no reforço adicionando fibras ou aplicando betumes modificados (por exemplo, polímeros e borracha de pneus);
- Colocação de sistemas de absorção de tensões (SAMI);
- Aplicação de produtos de reforço na interface entre a camada de reforço e a camada fendilhada (por exemplo: fibra de vidro, poliéster, polipropileno e aço).

## 2.2 Reabilitação de pavimentos

A reabilitação de pavimentos compreende as seguintes intervenções: trabalhos de reposição de características funcionais e trabalhos de reposição das características estruturais (reforço ou reposição do pavimento) [5].

Para a reposição das características superficiais de um pavimento é necessário atuar ao nível da camada de desgaste, sendo que neste caso é necessário que os pavimentos apresentem um adequado comportamento estrutural. Existem diversas técnicas para a reposição das características superficiais, nomeadamente, revestimentos betuminosos superficiais, microaglomerado betuminoso a frio, lama asfáltica (também designada por *Slurry Seal*), microbetão betuminoso rugoso e argamassa betuminosa. Existem ainda outras técnicas como o betão betuminoso muito delgado, o betão betuminoso drenante e a regeneração térmica, esta última ainda pouco usada em Portugal. Para além das técnicas já mencionadas, podem ser aplicadas outras técnicas complementares, como por exemplo a ranhuragem do pavimento, de modo a auxiliar o escoamento das águas [5].

A reposição das características estruturais dos pavimentos compreende a execução de uma ou mais camadas (de desgaste, de ligação e de base) e, possivelmente, outros trabalhos complementares, nomeadamente melhoria do sistema de drenagem. Uma das principais medidas é o reforço com a aplicação de misturas betuminosas a quente, com o objetivo de aumentar a capacidade estrutural do pavimento existente. Os reforços consistem, assim, na aplicação de camadas betuminosas sobre o pavimento existente, no caso dos pavimentos pouco degradados, após a realização de trabalhos de reparação como selagem de fendas, tapagem das covas, melhoramento da drenagem, entre outros. Para os pavimentos mais degradados, pode recorrer-se à fresagem das camadas mais degradadas, à reparação posterior da camada remanescente e, por último, a execução das novas camadas de reforço. Caso os pavimentos apresentem uma elevada densidade e severidade de fendilhamento, a existência de fendas ativas poderá favorecer a sua propagação às camadas de reforço. Podem ser aplicadas geogrelhas de modo a evitar a propagação de fendas às camadas subjacentes [5].

Todas estas intervenções que atuem ao nível da reposição das características estruturais do pavimento, atuam também ao nível das características superficiais do mesmo [5].

## 2.3 Técnicas anti-reflexão de fendas

Como referido anteriormente, quando os pavimentos apresentem uma elevada densidade e severidade de fendilhamento, a existência de fendas ativas poderá favorecer a sua propagação às camadas de reforço. Assim torna-se necessário recorrer à utilização de materiais e técnicas que permitam minimizar essa propagação. Para tal, poderá recorrer-se à aplicação de SAMI, geotêxtil impregnado com betume, armaduras e grelhas. Complementarmente à aplicação destes materiais poderão ser necessários trabalhos de fresagem das camadas do pavimento que apresentem um pior estado de conservação [6].

A SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*) consiste numa camada de reduzida espessura, 1 a 2 cm, constituída por uma grande quantidade de betume modificado com polímeros e agregado de pequenas dimensões (granulometria 0/6). Esta camada é criada entre o pavimento fendilhado e o reforço, tendo a propriedade de ser

bastante elástica e com isso absorver parte das tensões geradas na zona das fendas, deformando-se sem fendilhar e retardando a propagação das fendas ao reforço. A SAMI quando integra polímeros provenientes da reciclagem de pneus usados é conhecida por SAMI-R (*Rubberized Stress Absorbing Membrane Interlayer*) ou ARAMI (*Asphalt Rubber Aggregate Membrane Interlayers*) [3], [7].

À semelhança da SAMI, o geotêxtil impregnado com betume funciona como uma camada retardadora da propagação de fendas entre o pavimento fendilhado existente e a nova camada de reforço. O geotêxtil é um material utilizado na construção rodoviária, nomeadamente em aterros e drenos, e como elemento de separação entre as camadas betuminosas e granulares. Na sua forma original não dispõe de propriedades que o tornem benéfico no retardamento da reflexão de fendas, no entanto quando impregnado com betume asfáltico assume excelentes propriedades elásticas que lhe conferem capacidade para resistir a propagação de fendas [6], [8].

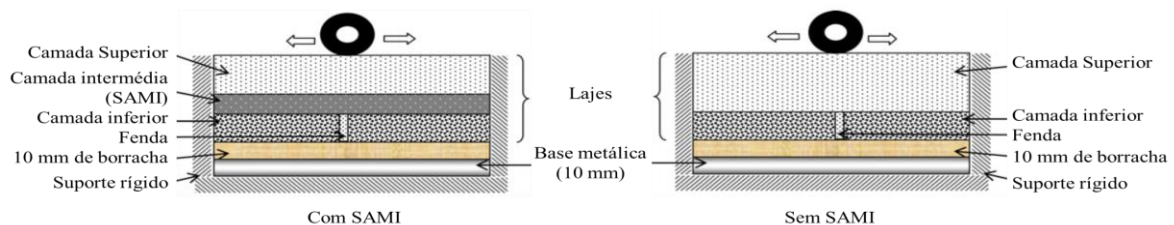
As armaduras e grelhas atuam, tal como no betão armado, absorvendo as elevadas tensões de tração que surgem na parte inferior do pavimento, nomeadamente na zona das fendas, impedindo a mistura betuminosa de fendilhar. As armaduras são metálicas e estão disponíveis sob diversas formas (malha de aço, rede, grelha tridimensional tipo favos de mel). As grelhas distinguem-se por serem constituídas por fibras de materiais sintéticos (polipropileno, poliéster, fibra de vidro e fibra de carbono), formando uma rede de malha quadrangular. As grelhas apresentam vantagens na facilidade de instalação por estarem disponíveis em rolos, serem leves e facilmente aderentes ao pavimento [9], [10].

A fresagem é um processo a frio de corte mecânico rotativo e contínuo das camadas betuminosas de um pavimento existente, no qual é permitido regular a profundidade a fresar. Esta técnica tem como finalidade a remoção do pavimento degradado antes de ser sobreposto um reforço betuminoso e traz como benefício a eliminação das patologias superficiais, eliminação total ou parcial do fendilhamento e ainda permite manter a cota do pavimento existente após aplicação do reforço betuminoso [5].

## 2.4 Comportamento estrutural de soluções anti-reflexão de fendas

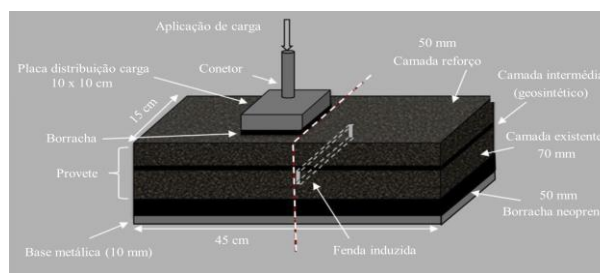
Ge et al. [11] efetuaram a avaliação laboratorial da resistência ao corte e à fadiga (flexão em quatro pontos) do reforço de um pavimento rígido com uma mistura betuminosa e com diferentes soluções retardadoras de propagação de fendas, nomeadamente, membranas com asfalto emulsionado (MEA), membranas de asfalto (MA), membranas de fibra de vidro reforçadas com asfalto emulsionado (GFMEA) e membranas de fibra de vidro reforçadas com asfalto (GFMA). Da análise efetuada, os autores verificaram que a solução que apresentou uma maior resistência à propagação de fendas foi a solução que incluía a GMFA.

Ogundipe et al. [12] avaliaram, recorrendo a uma adaptação do ensaio *wheel tracking*, a influência da utilização de uma SAMI na resistência à propagação de fendas de uma laje com uma fenda induzida para uma laje sem fendilhamento (Figura 1). Os autores verificaram que a capacidade da SAMI contribuir para a redução da reflexão de fendas depende de fatores como a rigidez e a espessura da SAMI, a espessura da camada de reforço, a carga aplicada e a temperatura. A diferença de comportamento do reforço com a utilização da SAMI face ao reforço sem utilização da SAMI, foi mais significativa para a combinação espessura de reforço mais espessura da SAMI mais baixa. A solução com SAMI suportou até três vezes mais ciclos de carga que a solução sem SAMI.



**Fig. 1. Esquema de ensaio adaptado *wheel tracking* (adaptado de Ogundipe et al. [12])**

Nejad et al. [13] efetuaram um estudo estatístico-experimental do desempenho de geossintéticos (geogrelha de fibra de vidro e geotêxtil de polipropileno) na reflexão de fendas em pavimentos betuminosos, recorrendo ao ensaio *PRReSBox Compactor* (Figura 2). Foi verificado o efeito da temperatura, da largura da fenda induzida e do tipo de geossintético, e a relação destes parâmetros com a reflexão de fendas. A geogrelha de vidro apresentou o maior contributo para a minimização da propagação de fendas à camada de reforço (esta solução suportou duas a três vezes mais ciclos de carga que a solução sem qualquer elemento retardador de propagação de fendas).



**Fig. 2. Esquema de ensaio PReSBox Compactor (adaptado de Nejad et al. [13])**

Similarmente aos estudos apresentados, outros autores têm verificado que o reforço de pavimentos betuminosos fendilhados terá um comportamento melhorado se tiver em consideração a colocação de elementos que retardem a propagação de fendas das camadas existentes para as camadas novas dos pavimentos, como por exemplo, geossintéticos [14]–[16], grelhas de aço [17] ou SAMI [6], [18].

## 2.5 Misturas betuminosas com incorporação de borracha

A incorporação de borracha granulada em misturas betuminosas pode ser feita através do processo húmido (*wet process*) e do processo seco (*dry process*). No processo húmido, a borracha granulada é adicionada ao betume convencional produzindo um “novo tipo de betume” denominado betume-borracha (BB). No processo a seco, as partículas de borracha (normalmente 1% a 3% por massa do agregado total na mistura) são utilizadas em substituição de parte dos agregados finos [19].

O conhecimento das misturas betuminosas com a adição de borracha por via seca assume-se como uma necessidade da atualidade. Estas têm um processo de fabrico muito mais barato e menos complexo do que as fabricadas por via húmida, e potencialmente podem constituir uma alternativa vantajosa não só às misturas produzidas por via húmida, como principalmente às tradicionais [20].

Recentemente têm sido realizados estudos que procuram contribuir para o melhor conhecimento das misturas betuminosas com partículas ultrafinas de borracha adicionadas por via seca. Tem sido utilizado granulado de borracha com dimensões até 0,8 mm, numa percentagem que varia entre 0,5% e 1,5% em relação à massa total da mistura betuminosa. As principais propriedades avaliadas neste tipo de misturas betuminosas são a sensibilidade à água, a resistência à deformação permanente (ensaio *wheel tracking*) e a resistência à fadiga (ensaio de flexão em quatro pontos) [19], [21], [22].

Assim reforça-se a convicção que o processo de fabrico por via seca, que utiliza partículas de borracha de dimensões ultrafinas (como no processo por via húmida, diâmetro nominal inferior a 0,8 mm), produz misturas betuminosas descontínuas com qualidade similar às produzidas por via húmida [21], [23]. Fortalecendo esta convicção, num recente estudo laboratorial [24] comparou-se a resistência estrutural de uma mistura betuminosa com alta percentagem de borracha adicionada por via seca, MBR-BA, com uma mistura betuminosa sem borracha, AC14 Surf. Verificou-se que a mistura MBR-BA apresenta um melhor desempenho estrutural do que a mistura AC14 Surf, com um efeito pronunciado na resistência à progressão de fendilhamento na própria mistura [25].

## 3 CASO DE ESTUDO

Para atestar a adequabilidade do reforço de pavimentos fendilhados com a aplicação de uma camada desgaste com incorporação de borracha, por via seca, de seguida apresenta-se uma análise comparativa entre a aplicação deste método de intervenção e a utilização de soluções convencionais, que passem pela operação de fresagem e reposição de camadas betuminosas.

### 3.1 Resistência à progressão de fendilhamento de uma camada de desgaste com incorporação de borracha, por via seca

Neste subcapítulo apresenta-se uma análise laboratorial que demonstrará a adequabilidade de misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca no reforço de pavimentos betuminosos. É apresentada a

avaliação do comportamento à fadiga, do comportamento à deformação permanente e da evolução da propagação de fendas de uma mistura betuminosa sem borracha, AC14 Surf (5% de betume), e de uma mistura betuminosa com partículas ultrafinas de borracha adicionadas por via seca, MBR-BA (8% de betume). Encontra-se aqui um resumo das principais conclusões da análise laboratorial efetuada, pelo que a consulta dos resultados detalhados da mesma poderá ser efetuada em [24] e [25].

A avaliação do comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas foi efetuada recorrendo ao ensaio *wheel tracking* [26]. Desta avaliação verificou-se que a mistura AC14 Surf apresentou mais do dobro da média da variação da deformação permanente ao ar,  $WTS_{AIR}$ , da média proporcional da profundidade da rodeira,  $PRD_{AIR}$ , e da profundidade média da rodeira,  $RD_{AIR}$ , em relação à mistura MBR-BA, concluindo-se assim que a mistura MBR-BA apresenta maior resistência à deformação permanente do que a mistura AC14 Surf [24], [25].

Para a avaliação do comportamento à fadiga recorreu-se ao ensaio de flexão em quatro pontos [27]. Verificou-se que para o mesmo número de ciclos de carga, a mistura MBR-BA suportou um nível de extensão bastante superior à mistura AC14 Surf. De forma análoga, para o mesmo nível de extensão, a mistura MBR-BA suportou um número de ciclos de carga, também, bastante superior (pelo menos seis vezes mais).

A avaliação da resistência à progressão ao fendilhamento foi efetuada recorrendo à adaptação do ensaio de fadiga e do ensaio de deformação permanente [24], [25].

No ensaio de fadiga adaptado foram utilizadas vigas com uma fenda transversal a meia extensão da sua base (Figura 3). Optou-se por um critério de paragem do ensaio diferente, ou seja, o ensaio terminou quando o provete apresentou um módulo de deformabilidade de 20% em relação ao módulo de deformabilidade inicial.

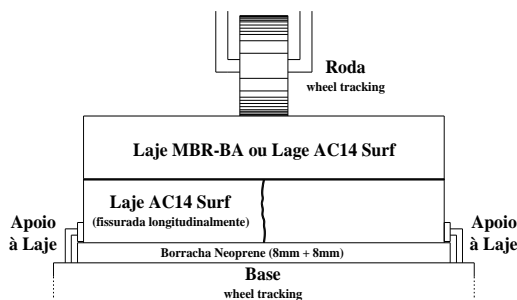


**Fig. 3. Provete betuminoso com fenda induzida [25]**

Deste ensaio verificou-se que para o mesmo nível de ruína da viga betuminosa, critério de paragem de 20% do módulo de deformabilidade inicial, a mistura MBR-BA suportou cerca de 40 vezes mais ciclos de carga que a mistura AC14 Surf. Observou-se, ainda, que a diferença entre o número de ciclos que suportaram os provetes com fenda induzida e sem fenda induzida foi mais alargada na mistura AC14 Surf.

O procedimento do ensaio de deformação permanente adaptado consistiu em (Figura 4):

- O ensaio considerou-se terminado ao fim de 20.000 ciclos;
- Utilizaram-se duas lajes coladas, sendo que a laje inferior possuía uma fenda longitudinal central em toda a espessura da laje;
- O conjunto das duas lajes passou a estar apoiado sobre duas membranas de borracha neoprene;
- As lajes, durante o ensaio, deixaram de estar confinadas por um molde metálico, estando apenas amparadas por dois apoios laterais;
- A temperatura do ensaio foi de 20°C e 40°C;
- A espessura de cada laje foi de 45 mm.



**Fig. 4. Disposição das lajes no ensaio de deformação permanente com fenda induzida [24]**

Este ensaio permitiu verificar que, principalmente à temperatura de 40°C, o valor de  $WTS_{AIR}$  da mistura AC14 Surf foi bastante superior ao da mistura MBR-BA, concluindo-se também daqui que a mistura MBR-BA apresenta uma melhor resposta à presença de fendas nas camadas que a suportam.

Para efeitos de dimensionamento de um reforço sobre um pavimento fendilhado, considerando plausível a utilização dum coeficiente de translação de 2 para aplicação real (hipótese também verificada em Claessen et al. [28], embora a indicação para a avaliação, por exemplo, à fadiga pelo método da Shell tivesse sido dada noutro sentido) ou seja sendo muito conservador, considerando que a vida útil da mistura betuminosa em serviço é metade da vida útil verificada em laboratório, o estudo permitiu indicar o seguinte como orientação prática [24], [25]:

- No que respeita à resistência à fadiga, para um valor final do módulo de deformabilidade de 50% do valor inicial, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 10 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura duma mistura do tipo AC14 Surf;

- Ainda relativamente à resistência à fadiga, para um valor final do módulo de deformabilidade de 20% do valor inicial, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 20 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura duma mistura do tipo AC14 Surf;

- Em termos de comportamento à deformação permanente, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 2,5 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura duma mistura do tipo AC14 Surf.

Desta forma, o estudo permitiu concluir que a mistura MBR-BA estudada apresenta um melhor desempenho estrutural do que uma mistura do tipo AC14 Surf estudada, com um efeito pronunciado na resistência à progressão de fendilhamento na própria mistura. Isto traduz-se num comportamento que deve ser valorado quando se pretende reabilitar pavimentos com deterioração avançada provocada por este tipo de degradação.

### **3.2 Análise comparativa entre tipos de intervenção**

Neste subcapítulo, apresenta-se uma análise comparativa que visa atestar a adequabilidade do reforço de pavimentos fendilhados com a aplicação de uma camada de desgaste com incorporação de borracha, por via seca (mistura MBR-BA), em detrimento da utilização de soluções convencionais que passem pela operação de fresagem e reposição de camadas betuminosas.

Como soluções convencionais entendem-se aquelas que passam pela colocação de elementos retardadores de propagação de fendas na ligação entre o pavimento existente e as camadas de reforço do mesmo, normalmente associadas à necessidade de fresagem das camadas mais degradadas do pavimento existente (quer pelo nível de gravidade quer pela necessidade da manutenção da cota final do pavimento).

Esta análise pretende-se para estradas com baixo a médio tráfego, com um estado de degradação não muito elevado (condicionado principalmente pela fadiga das misturas betuminosas – comportamento relacionado com a propagação de fendas), de forma a que o reforço com uma camada betuminosa (com ou sem a fresagem das camadas mais degradadas do pavimento) seja suficiente para reestabelecer a sua capacidade de carga.

Dos estudos apresentados anteriormente, no subcapítulo 2.4, relativos às soluções de materiais para o controlo da propagação de fendas às camadas de reforço dos pavimentos, principalmente SAMI e geogrelhas, é possível verificar que as vantagens conferidas pela sua utilização são evidentes. Com estas soluções verificou-se que o pavimento suporta até três vezes mais ciclos de carga [11]-[13]. Esta diferença, poderá permitir uma redução da espessura do reforço do pavimento, ou evitar a necessidade de fresagem das camadas mais degradadas, face a soluções sem materiais para o controlo da propagação de fendas às camadas de reforço.

Por outro lado, tendo por base os resultados laboratoriais apresentados no subcapítulo 3.1, o ganho conseguido com o recurso a uma mistura MBR-BA face a uma mistura betuminosa convencional é bastante superior (a estrutura suporta pelo menos dez vezes mais ciclos de carga).

Esta diferença tem uma implicação direta na vida útil do pavimento reforçado, pois mesmo com a mesma espessura de reforço a velocidade de propagação de fendas à superfície será muito mais lenta. Por outro lado, como o ganho conseguido com a mistura MBR-BA é elevado, esta solução poderá permitir um reforço do pavimento sem necessidade de fresagem das camadas mais degradadas, com espessuras bastante mais reduzidas e sem necessidade de instalação de materiais para o controlo da propagação de fendas.

Assim para a análise comparativa considerar-se-ão os seguintes tipos de intervenção no pavimento:

1. Pavimento reforçado com uma mistura betuminosa convencional (com fresagem da camada de desgaste e sem material anti-reflexão de fendas) – solução tradicional sem material anti-reflexão de fendas;
2. Pavimento reforçado com uma mistura betuminosa convencional (sem fresagem da camada de desgaste e com material anti-reflexão de fendas) – solução tradicional com material anti-reflexão de fendas;
3. Pavimento reforçado com uma mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca (sem fresagem da camada de desgaste e sem material anti-reflexão de fendas) – solução em estudo.

Para analisar estas soluções, é necessário ter em consideração que uma intervenção num pavimento terá associados custos diretos e custos indiretos. Os custos diretos estão relacionados com o custo dos materiais utilizados e com o custo da realização dos trabalhos. Os custos indiretos estão relacionados com a interferência que a intervenção no pavimento terá nos utilizadores da via onde se situa o mesmo (eventuais congestionamentos de tráfego ou desvios provocados pelas obras). Apresentam-se, no Quadro 2, as vantagens e desvantagens das soluções apresentadas, considerando a pertinência dos resultados laboratoriais apresentados no subcapítulo anterior

**Quadro 2. Comparação entre tipos de intervenção**

Intervenção	Vantagens		Desvantagens	
1	Não requer aplicação de material de anti-reflexão de fendas	Menos custos diretos e indiretos	Requer fresagem do pavimento	Mais custos diretos e indiretos
			Requer maior espessura de reforço	Mais custos diretos
2	Requer menor espessura de reforço	Menos custos diretos	Requer aplicação de material de anti-reflexão de fendas	Mais custos diretos e indiretos
	Não requer fresagem do pavimento	Menos custos diretos e indiretos		
3	Requer menor espessura de reforço	Menos custos diretos	Requer maior quantidade de betume que uma mistura betuminosa convencional	Mais custos diretos
	Não requer aplicação de material de anti-reflexão de fendas	Menos custos diretos e indiretos		

A mistura betuminosa da solução 3 (solução alvo deste estudo) requer mais betume do que uma mistura betuminosa convencional. No entanto, os custos diretos e indiretos associados à aplicação de material de anti-reflexão de fendas (solução 2) e associados ao aumento da espessura e da necessidade de fresagem do pavimento (solução 1), são claramente superiores aos custos diretos relativos à maior quantidade de betume da solução 3.

Por outro lado, a solução 1 é a solução menos eficiente na minimização no retardamento da ascensão do fendilhamento no pavimento reforçado por não utilizar material anti-reflexão de fendas.

## 4 CONCLUSÕES

Da análise comparativa efetuada, conclui-se que o reforço de pavimentos fendilhados com a aplicação de uma camada de desgaste constituída por uma mistura betuminosa com alta percentagem de borracha adicionada por via seca, MBR-BA (mistura considerada neste estudo), é potencialmente mais vantajoso do que o efetuado com recurso a soluções convencionais.

As vantagens identificadas, no contexto da análise laboratorial descrita e da interpretação efetuada, passam pelo incremento da capacidade estrutural associada ao aumento do número de ciclos de carga suportadas, sendo que este poderá ser mais de dez vezes superior ao verificado numa solução de reforço sem material anti-reflexão de fendas. Quando comparado com uma solução de reforço com material anti-reflexão de fendas, este aumento será de pelo menos três vezes.



Deve sublinhar-se que as indicações resultantes deste trabalho são mais aplicáveis a estradas com baixo a médio tráfego, com um estado de degradação não muito elevado embora com fendilhamento estrutural, admitindo que a recuperação pode ser efetuada com uma camada betuminosa mais resistente à propagação de fendas.

Pode ainda dizer-se que é muito provável que este tipo de reforço poderá implicar uma redução dos custos diretos e indiretos face às soluções de reforço convencionais, ao longo do ciclo de vida dos pavimentos.

Como se sublinhou, esta análise comparativa está assente em pressupostos de comportamento estrutural, das soluções de reforço de pavimentos, obtidos laboratorialmente. Neste sentido, para futuros desenvolvimentos, é importante testar o desempenho das soluções proposta em casos reais de aplicação, no sentido de poder avaliar as indicações dadas quando se introduz a variabilidade própria da construção.

## 5 AGRADECIMENTOS

Fundação para a Ciência e a Tecnologia, FCT, pela bolsa de doutoramento de referência SFRH/BD/79151/2011.

Laboratório de Vias de Comunicação do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Egis Road Operation Portugal.

## 6 REFERÊNCIAS

1. M. J. da C. Minhoto, “Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis,” Universidade do Minho, Guimarães, 2005.
2. E. de Portugal, “Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários. Volume 1: Projecto de Reabilitação.” Gabinete de gestão da rede, Almada, 2008.
3. J. Pais, M. Minhoto, and S. Shatnawi, “Multi-cracks Modeling in Reflective Cracking,” *7th RILEM Int. Conf. Crack. Pavements*, vol. 4, pp. 441–452, 2012.
4. M. Minhoto, P. Pereira, and J. Pais, “Consideração das variações de temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos,” in *XIV CILA: Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*, 2007.
5. F. Branco, P. Ferreira, and L. Picado-Santos, *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Edições Almedina, SA, 2006.
6. N. Dhakal, M. A. Elseifi, and Z. Zhang, “Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements – A synthesis,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 228–239, 2016.
7. S. Shatnawi, J. Pais, and M. Minhoto, “Asphalt Rubber Interlayer Benefits in Minimizing Reflective Cracking of Overlays over Rigid Pavements,” vol. 4, pp. 1157–1167, 2012.
8. N. Correia, “Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão de trincas,” Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.
9. H. Rathmayer, “Reinforcement of Pavements with Steel Meshes and Geosynthetics,” in *Design and Construction of Pavements and Rail Tracks*, 1st ed., CRC Press, 2007, pp. 3–15.
10. G. N. Goud, C. Hariprasad, and B. Umashankar, “Experimental Study on Steel-Wire-Mesh Reinforced Flexible Pavements,” in *Geo-Chicago 2016*.
11. Z. Ge, H. Wang, Q. Zhang, and C. Xiong, “Glass fiber reinforced asphalt membrane for interlayer bonding between asphalt overlay and concrete pavement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 918–925, 2015.
12. O. M. Ogundipe, N. Thom, and A. Collop, “Investigation of crack resistance potential of stress absorbing membrane interlayers (SAMIs) under traffic loading,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 658–666, 2013.

13. F. M. Nejad, S. Asadi, S. Fallah, and M. Vadood, "Statistical-experimental study of geosynthetics performance on reflection cracking phenomenon," *Geotext. Geomembranes*, vol. 44, no. 2, pp. 178–187, 2016.
14. S. K. Ahirwar and J. N. Mandal, "Finite Element Analysis of Flexible Pavement with Geogrids," *Procedia Eng.*, vol. 189, pp. 411–416, 2017.
15. A. Al-Hedad and M. Hadi, "Flexural behaviour of concrete pavements reinforced with geogrid materials," in *24th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM24)*, 2016.
16. A. Zofka, M. Maliszewski, and D. Maliszewska, "Glass and carbon geogrid reinforcement of asphalt mixtures," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 18, 2016.
17. D. Omprakash Netula, "Study of Open Graded Asphalt Concrete Overlay on Mitigation of Reflection Cracking," vol. 8, pp. 495–502, 2018.
18. B. Yu, Q. Lu, and J. Yang, "Evaluation of anti-reflective cracking measures by laboratory test," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 14, pp. 553–560, 2013.
19. F. J. López-Moro, M. C. Moro, F. Hernández-Olivares, B. W. Schultz, and M. Alonso-Fernández, "Microscopic Analysis of the Interaction Between Crumb Rubber and Bitumen in Asphalt Mixtures Using the Dry Process," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 691–699, 2013.
20. L. Picado-Santos and J. Feiteira Dias, "Assessment Performance of Bituminous Mixtures Incorporating Rubber Modified Bitumen," in *Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPA6)*, 2009.
21. J. Feiteira Dias, L. Picado-Santos, and S. D. Capitão, "Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 247–254, 2014.
22. N. A. Hassan, M. R. Hainin, H. Yaacob, C. R. Ismail, and N. Z. M. Yunus, "Evaluation on Mix Design and Rutting Resistance of Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures," *J. Teknol.*, vol. 65, pp. 115–120, 2013.
23. J. Feiteira Dias and L. Picado-Santos, "Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas Rugosas com Incorporação de Alta Percentagem de Granulado de Borracha de Pneus Usados," in *XV Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto*, 2009.
24. L. da Silva, "Camadas de desgaste betuminosas com adição de borracha por via seca - avaliação da resistência à reflexão de fendilhamento," Universidade de Aveiro, PhD Thesis, 2016.
25. L. da Silva, A. Benta, and L. Picado-Santos, "Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking," *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 539–550, Jan. 2018.
26. CEN, "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: wheel tracking. EN 12697-22," European Committee for Standardization, Bruxelles, 2003.
27. CEN, "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue. EN 12697-24," European Committee for Standardization, Bruxelles, 2004.
28. A. Claessen, J. Edwards, P. Sommer, and P. Ugé, "Asphalt Pavement Design Manual: the SHELL Method," in *4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, 1977.