

Estudo para Produção de Misturas com Betume Borracha a Menores Temperaturas

Hugo M.R.D. Silva^{1,†}, Joel R.M. Oliveira², Liliana M.B. Costa³, Joana Peralta⁴

*Universidade do Minho, CTAC – Centro do Território Ambiente e Construção
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

Fátima Batista⁵

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil 101, P – 1700-066 Lisboa, Portugal*

RESUMO

As misturas com betume borracha precisam de temperaturas mais elevadas no seu processo de fabrico e compactação devido à maior viscosidade deste ligante betuminoso modificado com borracha granulada de pneus usados. Caso contrário, o betume borracha poderá não garantir o correto envolvimento dos agregados e a necessária trabalhabilidade da mistura para a sua correta compactação. As consequências previsíveis relacionam-se com uma maior sensibilidade à água, o que reduz a durabilidade destas misturas e potencia a ocorrência de desagregações superficiais no pavimento. No entanto, o uso de tecnologias temperadas que permitem reduzir as temperaturas de produção e compactação das misturas betuminosas, pode ser uma solução mais sustentável para produção das misturas com betume borracha a menores temperaturas, desde que isso não afete o seu desempenho. Este trabalho consiste no estudo da utilização de uma dessas tecnologias para produzir misturas com betume borracha a menores temperaturas. Assim, estudou-se o efeito que a aplicação de um aditivo surfactante tem nas propriedades dos ligantes com e sem borracha. Em seguida estudou-se a redução de temperatura de produção. Por fim comparou-se o desempenho de misturas betuminosas com betume borracha normais e temperadas. No estudo concluiu-se que é possível reduzir bastante a temperatura de fabrico sem comprometer o desempenho da mistura com betume borracha.

1. INTRODUÇÃO

Vários estudos realizados anteriormente mostraram que a utilização de misturas com betume borracha pode originar pavimentos mais eficazes na redução do ruído provocado pela

¹ Professor Auxiliar, PhD, CTAC, Universidade do Minho

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (hugo@civil.uminho.pt)

² Professor Auxiliar, PhD, CTAC, Universidade do Minho

³ Bolseira de doutoramento, MSc, CTAC, Universidade do Minho

⁴ Investigadora de pós doutoramento, PhD, CTAC, Universidade do Minho e CCEE, Iowa State University

⁵ Investigadora Auxiliar, PhD, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

circulação de tráfego, com maior resistência às deformações permanentes e ao fendilhamento e com custos de manutenção mais reduzidos. Estas vantagens fazem com que haja uma crescente procura deste tipo de solução com betume borracha para a produção de misturas a quente (Akisetty *et al.*, 2007). No entanto, estas misturas incorporam percentagens elevadas de granulado de borracha proveniente de pneus usados, o que aumenta a viscosidade do betume e leva à utilização de temperaturas de produção e compactação superiores às habituais para as misturas convencionais com betume puro.

As misturas temperadas são produzidas recorrendo a um conjunto de tecnologias que permitem diminuir a temperatura de fabrico e aplicação das misturas a quente, o que pode propiciar vários benefícios a nível económico, ambiental e operacional, tais como a redução do consumo de combustível utilizado para aquecimento dos agregados no tambor secador e os correspondentes custos associados, a redução do envelhecimento do betume, a melhoria das condições laborais e a redução do impacte ambiental devido à redução de gases/odores emitidos e à menor radiação de calor, entre outras. O maior desafio deste tipo de tecnologias é garantir um bom revestimento dos agregados a temperaturas mais baixas, para assegurar a necessária durabilidade das misturas. Para isso podem ser adicionados aditivos que reduzem a viscosidade do betume ou surfactantes que atuam ao nível das tensões superficiais entre o betume e os agregados. Também podem ser usados processos com betume espuma que permitem que o betume expanda e garanta um bom revestimento dos agregados a temperaturas inferiores. Devidos a todas estas vantagens, o uso de misturas temperadas tem sido alvo de crescente estudo e procura. Este tipo de tecnologias tem sido aplicado em especial em misturas convencionais ou recicladas, mas que apenas utilizam betume puro.

Assim, o grande desafio e inovação deste trabalho consistiram na aplicação da tecnologia das misturas temperadas ao fabrico de misturas com betume borracha. Contudo, a redução da temperatura de produção das novas misturas temperadas com betume borracha, em estudo neste trabalho, poderão influenciar a sua compactação, visto que a introdução de granulado de borracha pode originar problemas de desagregação caso não se utilizem temperaturas mais elevadas de compactação. Assim, o objetivo deste estudo passa por compreender se é possível produzir este novo tipo de misturas a menores temperaturas sem prejudicar o elevado desempenho tipicamente associado às misturas com betume borracha. O estudo da redução da temperatura de aplicação de misturas com betumes de borracha tem sido pouco investigado até agora, mas evidentemente é uma aplicação de sério interesse devido às numerosas vantagens que ambos apresentam (tecnologias temperadas e betume borracha), na procura de um ambiente rodoviário cada vez mais sustentável e amigo do ambiente.

2. ESTADO DA ARTE SOBRE MISTURAS COM BETUME BORRACHA E SOBRE TECNOLOGIAS TEMPERADAS

2.1. Misturas betuminosas com betume borracha

Existem vários tipos de misturas betuminosas com betume borracha especificadas em Portugal. Neste trabalho optou-se por estudar uma mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha (MBR-BBA) por ser uma das mais utilizadas a nível nacional. Esta mistura descontínua é constituída por agregados, filer e um betume modificado com uma quantidade elevada de borracha reciclada de pneus usados (entre 18% e 22%), que é produzido junto à central de misturas betuminosas da obra. A quantidade de ligante nestas misturas pode variar entre 8% e 9% em massa, sobre a massa total da mistura betuminosa (EP, 2009). Esta mistura é habitualmente utilizada em camadas de desgaste de pavimentos devido às suas propriedades funcionais, pois aumenta a aderência entre os pneus

dos veículos e o pavimento devido à sua macrotextura, tem boa resistência ao envelhecimento e diminui o ruído de circulação dos veículos, embora também apresente excelentes propriedades estruturais, tais como baixa rigidez e elevada resistência à fadiga e à deformação (Fontes, 2009).

A utilização de misturas com betume borracha tem apresentado vantagens a vários níveis. A nível técnico apresenta como principais vantagens a redução da susceptibilidade térmica do betume, melhoria da viscoelasticidade e da ductilidade do ligante e melhora as propriedades das misturas betuminosas, principalmente a resistência à fadiga, à deformação permanente e à reflexão de fendas (Pestana *et al.*, 2006). Ao adicionar borracha ao betume quente, esta consegue fixar maltenos (fração volátil do betume) nos seus poros, limitando o desaparecimento destes ou a sua oxidação ao longo do tempo pelas ações climáticas e do tráfego, o que permite que o betume borracha apresente maior elasticidade ao longo do tempo, tornando-o mais resistente ao envelhecimento (Peralta *et al.*, 2010, 2012, 2014).

Devido às propriedades estruturais das misturas com betume borracha é possível conseguir uma redução na espessura destas camadas que pode atingir 50% em comparação com uma mistura convencional, o que pode ser uma vantagem competitiva desta mistura, apesar do seu custo mais elevado. Os custos de manutenção são inferiores devido à sua resistência à propagação de fendas, que lhe confere maior durabilidade comparativamente com os pavimentos tradicionais (RECIPAVE, 2007).

A nível ambiental, uma das principais vantagens foi a redução do ruído de circulação dos veículos, eliminando, em alguns casos, a necessidade de colocação de barreiras acústicas. De acordo com estudos feitos (Sacramento County, 1999) é possível uma redução de ruído na ordem dos 4 dB(A). Outra vantagem é a reutilização de pneus usados. Devido à sua textura superficial, as misturas com betume borracha proporcionam uma maior segurança e conforto aos utentes das infraestruturas rodoviárias bem como ao resto da população através da redução de ruído, principalmente em zonas urbanas (Santagata *et al.*, 2008).

Contudo, o uso de misturas com betume borracha também apresenta algumas limitações. O armazenamento do betume borracha em “condições estáticas” (quatro dias a 130 °C) provoca uma alteração das suas propriedades, originando a segregação entre o betume puro e o granulado de borracha, verificando-se nessas condições um mau desempenho em particular no que respeita à resistência às deformações permanentes (Pestana *et al.*, 2006). Outro problema das misturas com betume borracha está associado aos tempos de espera de abertura ao tráfego, pois precisa de mais tempo de arrefecimento em relação às misturas convencionais para evitar o aparecimento de rastos. As elevadas temperaturas utilizadas na produção destas misturas também potenciam um maior envelhecimento das misturas. Relativamente à compactação das misturas com betume borracha, esta deve ser executada com alguma cautela uma vez que estes materiais são mais sensíveis às variações de temperatura. Dependendo do tipo de betume e quantidade de borracha utilizados, abaixo de determinada temperatura é difícil compactar a mistura, o que pode dar origem a porosidades elevadas (Fontes, 2009). Assim, a utilização de tecnologias temperadas para reduzir a temperatura de produção destas misturas pode ser uma solução para evitar alguns dos problemas já detetados.

2.2. Tecnologias temperadas de produção de misturas betuminosas

As misturas temperadas são produzidas recorrendo a um conjunto de tecnologias que permitem reduzir a temperatura de produção e aplicação das misturas betuminosas a quente em cerca de 10 °C a 40 °C (Silva *et al.*, 2010a,b). Para atingir esse objetivo é necessário reduzir a viscosidade do betume ou a tensão superficial de contacto para garantir um completo envolvimento dos agregados a baixas temperaturas, o que permite diminuir as dificuldades de

compactação das misturas em climas frios e facilita a compactação das misturas mais duras (tal como as misturas com betume borracha), mesmo para um menor número de passagens dos cilindros compactadores. A melhor compactação conseguida com estas tecnologias temperadas tende a diminuir a permeabilidade e o endurecimento do ligante devido ao envelhecimento, o que resulta numa melhoria da resistência ao fendilhamento e numa maior durabilidade das misturas devido à menor suscetibilidade à água (Oliveira *et al.*, 2012).

Adicionalmente, este tipo de misturas tem claras vantagens a nível ambiental, uma vez que ao baixar a temperatura das misturas betuminosas reduzem-se os compostos orgânicos voláteis (COV) e os fumos libertados por estas. Ao baixar a temperatura usam-se menos combustíveis no aquecimento das misturas, o que reduz os custos e a necessidade de recorrer a recursos energéticos naturais que cada vez mais escassos. A redução de temperatura e diminuição dos fumos e gases libertados proporcionam melhores condições laborais aos operários, aumentando a sua segurança (D'Angelo *et al.*, 2008). Contudo, ainda há algumas limitações na utilização de misturas temperadas, pois estas ainda não vêm especificadas nos cadernos de encargos, ainda são pouco conhecidas por algumas agências rodoviárias, e em alguns casos têm custos adicionais, sem haver incentivos pelas vantagens ambientais que proporciona (Rubio *et al.*, 2012).

Os principais tipos de tecnologias que existem são aquelas que usam aditivos orgânicos (por exemplo, ceras, tais como *Sasobit*[®] e *Asphaltan-B*[®]), os que usam aditivos químicos surfactantes ou agentes de superfície (por exemplo, *Evotherm*[™] e *Cecabase*^{®RT}) e aqueles que usam água para reduzir a temperatura, onde também se inclui a utilização de zeólitas e de betume espuma (por exemplo, *Aspha-Min*[®], *Advera*[®]WMA, *LEA*[®], *EBE*[®] e o *WAM-Foam*[®]). Também existem outras tecnologias emergentes que recorrem a novos tipos de centrais para reduzir a temperatura de produção (por exemplo, *Double-Barrel*^{®Green}) (Anderson *et al.*, 2008).

Neste artigo foi utilizado um aditivo químico surfactante (*Cecabase*^{®RT}) fabricado pelo *Arkema Group* de França, e que é constituído por agentes tensioativos que permitem aumentar a trabalhabilidade das misturas betuminosas a menores temperaturas sem no entanto reduzir a viscosidade do ligante. Este aditivo surfactante é líquido e adiciona-se facilmente a qualquer tipo de betume (numa quantidade de 2 a 4 kg por tonelada de betume), antes ou durante o processo de mistura, sem que seja necessário efectuar alterações na central de produção, o que facilita o revestimento dos agregados, inclusive das partículas mais finas, a temperaturas mais baixas do que as utilizadas nas misturas convencionais. Este processo pode permitir reduzir a temperatura de fabrico das misturas até 45 °C, sem que as propriedades das misturas sejam afetadas (CECA, 2008; Oliveira *et al.*, 2012).

Com estas tecnologias temperadas, mesmo reduzindo a temperatura de fabrico e colocação das misturas, é possível melhorar as características de compactação da mistura, o que permite aumentar a densidade e reduzir a permeabilidade das misturas, o que se traduz num aumento de resistência ao envelhecimento, ao fendilhamento e à ação da água. Além disso, o envelhecimento do betume está directamente ligado à temperatura a que a mistura é produzida. Quanto maior for essa temperatura menor vai ser a resistência ao envelhecimento, uma vez que o betume oxida a temperaturas altas e sofre um envelhecimento imediato. Ao reduzir a temperatura de produção reduz-se o endurecimento oxidativo do betume, o que aumenta a flexibilidade e reduz a reflexão de fendas (Rubio *et al.*, 2012).

Contudo, também há alguns problemas associados a algumas tecnologias temperadas. Há algum receio que a água utilizada em algumas técnicas de redução da viscosidade do betume para melhorar o processo de revestimento dos agregados, como por exemplo nas espumas, possa reduzir a durabilidade, aumentando a sensibilidade à água e a tendência para as misturas desagregarem, embora este problema não seja exclusivo das misturas temperadas (D'Angelo *et al.*, 2008). A redução do envelhecimento pode ser benéfica para a redução da

fissuração do pavimento, mas em climas quentes poderá levar ao aumento das deformações permanentes. Uma das formas de contrariar este efeito consiste na utilização de agregados angulares que aumentem a resistência à deformação (Zhao *et al.*, 2012). Por fim, outra das preocupações associadas a este tipo de misturas é o tempo de abertura ao tráfego, pois a utilização de aditivos poderá levar a tempos de “cura” superiores ao tempo de abertura ao tráfego. A solução para este problema passa pela realização de ensaios em laboratório para ver se há alguma influência no desempenho dos pavimentos para tempos de espera diferentes (D’Angelo *et al.*, 2008). Apesar destes problemas, um vasto estudo realizado com trechos reais na Europa revelou que os pavimentos feitos com misturas temperadas apresentaram desempenhos idênticos ou melhores do que as misturas convencionais a quente, no que diz respeito a fendilhamento, deformações permanentes e fenómenos de pós-compactação (D’Angelo *et al.*, 2008).

3. ESTUDO DO BETUME BASE E DO BETUME BORRACHA ANTES E APÓS APLICAÇÃO DUM ADITIVO SURFACTANTE (TECNOLOGIA TEMPERADA)

Neste trabalho foram produzidos dois tipos de betume modificado com alta percentagem de borracha: i) um fabricado pelo processo convencional (BBA); ii) e outro em que foi introduzido adicionalmente 0,5% de um aditivo surfactante (*Cecabase[®]RT*) em relação ao peso total do ligante (BBA+Surf), com o objetivo de posteriormente ser produzida uma mistura temperada com betume borracha.

Para produção do BBA sem aditivo surfactante, o betume base (50/70) foi aquecido à temperatura de 175 °C. Depois de aquecido retirou-se uma amostra (o betume 50/70) para análise das suas propriedades. De seguida acrescentou-se a borracha reciclada granulada, com uma dimensão máxima de 0,6 mm, numa percentagem de 21% em relação ao peso total do betume BBA, que ficou em digestão num misturador de baixa velocidade (600 rpm) durante 60 minutos, tempo ao fim do qual foi retirada outra amostra (o betume BBA) para ensaio.

Para produção do BBA com aditivo surfactante, colocou-se o betume base 50/70 à temperatura de 175 °C e adicionou-se 0,5% dum aditivo surfactante (*Cecabase[®]RT*), que foi misturado com o betume base durante 5 minutos no misturador de baixa velocidade, para se proceder à recolha duma amostra do betume base aditivado (50/70+Surf). Posteriormente acrescentou-se o granulado de borracha da forma já descrita (21% de borracha com dimensão máxima 0,6 mm, 60 minutos no misturador a 600 rpm) e retirou-se uma nova amostra do BBA aditivado com surfactante (BBA+Suf) para ensaio.

As amostras dos betumes base antes e após aditivação com surfactante (50/70; 50/70+Surf), e dos betumes borracha antes e após aditivação com surfactante (BBA; BBA+Suf), foram ensaiadas em seguida. A caracterização foi feita através de ensaios de penetração (EN 1426), ponto de amolecimento “anel e bola” (EN 1427), viscosidade em contínuo no viscosímetro rotacional (EN 13302) e resiliência (EN 13880-3), este último ensaio apenas para os betumes borracha. Em seguida, no Quadro 1 apresentam-se os resultados obtidos nesses ensaios.

Todas as propriedades determinadas para os betumes base e para os betumes borracha, antes ou após aditivação, cumprem os requisitos do caderno de encargos para obras de pavimentação (EP, 2009) e o documento de aplicação da mistura MBR-BBA (LNEC, 2008). Os resultados anteriores estão graficamente ilustrados na Figura 1 para se compreender de forma mais evidente qual o efeito que o aditivo surfactante teve sobre as propriedades básicas do betume base 50/70 e do betume borracha BBA.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento “anel e bola” e resiliência realizados aos betumes em estudo

Betume	Penetração – Pen			Anel e Bola – AeB			Resiliência	
	(dmm)	Δ (dmm)	Δ (%)	(°C)	Δ (°C)	Δ (%)	(%)	Δ (%)
50/70	57,10			52,05			-	-
50/70+Surf	58,88	1,78	3,12	51,02	-1,03	-1,99	-	-
BBA	26,59			76,22			53,08	
BBA+Surf	25,53	-1,06	-3,99	76,60	0,38	0,50	54,33	1,25

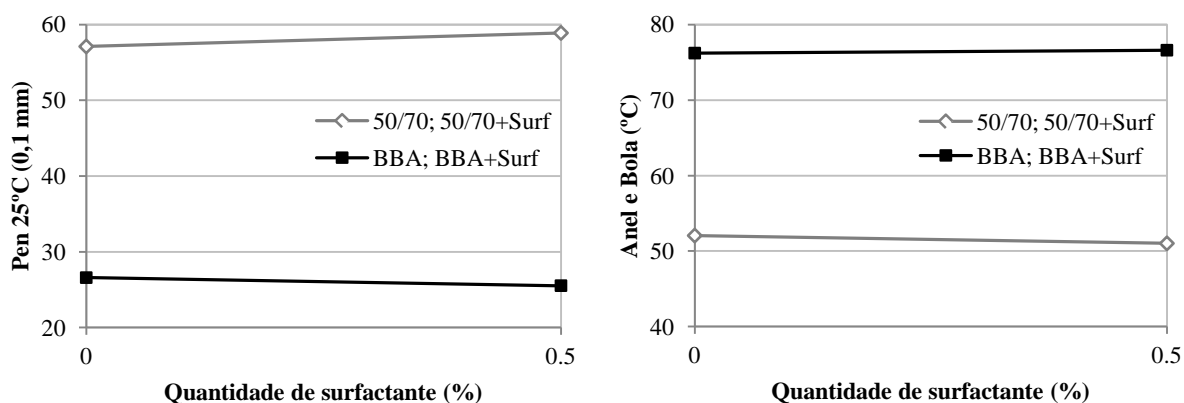


Figura 1 – Evolução da penetração a 25 °C (esquerda) e do ponto de amolecimento (direita) do betume base e do betume borracha em função da quantidade de surfactante adicionado

Relativamente ao ensaio de penetração, a análise dos resultados permite concluir que no betume base a adição do surfactante aumenta ligeiramente a penetração tornando-o mais mole. Consequentemente, o ponto de amolecimento do betume base é um pouco mais baixo após aditivção com o surfactante. No entanto, relativamente ao betume borracha, verificou-se uma ligeira diminuição da penetração após adição do surfactante. Este aditivo deve tornar o betume borracha mais rígido ao facilitar o processo de envolvimento do granulado de borracha pelo betume, melhorando a sua ligação. A confirmar este resultado também se verificou um aumento do ponto de amolecimento, e o betume borracha com aditivo recuperou 1,25% mais do que o BBA normal no ensaio de resiliência.

Uma vez que os betumes são produtos altamente viscosos à temperatura ambiente, é necessário garantir que estes estejam suficientemente fluídos a maiores temperaturas para serem facilmente trabalhados, o que pode ser avaliado através da viscosidade. O ensaio de viscosidade foi efetuado neste trabalho com recurso ao viscosímetro rotacional contínuo de *Brookfield* (EN 13202). Este equipamento mede a viscosidade através do torque necessário para fazer rodar um *Spindle* imerso numa amostra de betume a uma velocidade constante de 20 rpm. As amostras de betume foram progressivamente aquecidas de forma a medir a viscosidade a diferentes temperaturas, sendo que para o betume base (normal e aditivado) as temperaturas de ensaio variaram entre 90 e 160 °C. Devido à sua maior viscosidade, o betume borracha (normal e aditivado) foram ensaiados a temperaturas entre os 150 e 190 °C. De forma a estabilizar a viscosidade, o tempo de ensaio para cada temperatura (intervalos de 10 °C) foi de 20 minutos. Com os resultados obtidos é possível fazer um gráfico que relaciona o tempo, a temperatura e a viscosidade, de acordo com o procedimento apresentado por Silva *et al.* (2009), o qual permite relacionar a diminuição da viscosidade com o aumento de temperatura. Assim, determinou-se a evolução da viscosidade com a variação da temperatura para os quatro diferentes tipos de betume em estudo, que está representada na Figura 2.

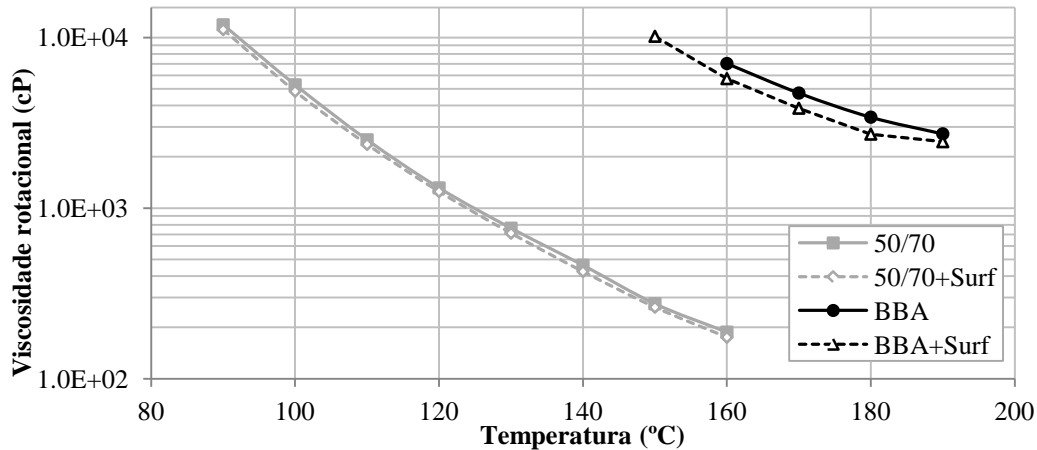


Figura 2 – Resultados obtidos no viscosímetro rotacional

Nos betumes base a variação da viscosidade foi pouco significativa, uma vez que a quantidade e o tipo de aditivo apenas conseguem diminuir ligeiramente a viscosidade, redução que era esperada após análise dos resultados de penetração e anel e bola. Contudo, nos betumes borracha a variação da viscosidade após adição do surfactante já foi notória, pois este facilita o envolvimento do granulado de borracha pelo betume. Além disso, é interessante notar que o surfactante tem efeitos contrários nas temperaturas de serviço (aumentando a rigidez do BBA) e nas temperaturas de produção e compactação (quando o betume borracha fica menos viscoso), o que é uma vantagem adicional de usar este aditivo em BBAs. Nos betumes borracha só foi possível começar a medir a viscosidade do BBA a partir dos 160 °C devido à elevada viscosidade do betume, o que obrigava à aplicação de um torque ao *spindle* demasiado elevado para o ensaio ser válido a temperaturas mais baixas. Devido à sua menor viscosidade, o betume BBA+Surf já pode ser ensaiado a partir dos 150 °C.

4. DESEMPENHO DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME BORRACHA PRODUZIDAS A DIFERENTES TEMPERATURAS (NORMAL E TEMPERADA)

4.1. Produção e características volumétricas das misturas betuminosas em estudo

Para estudar o efeito do surfactante nas misturas produziu-se uma mistura betuminosa rugosa com os betumes borracha estudados anteriormente (MBR-BBA). A Figura 3 apresenta o fuso granulométrico e a granulometria efetiva da mistura MBR-BBA usada no estudo.

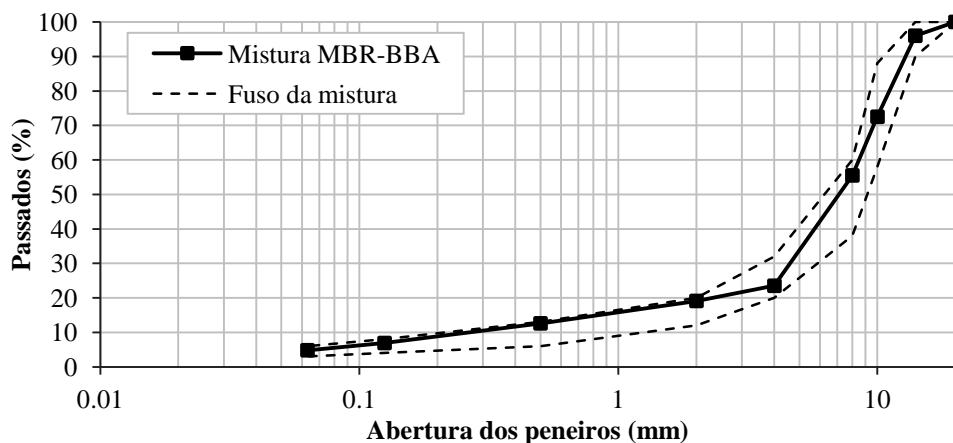


Figura 3 – Fuso granulométrico e granulometria utilizada para a mistura MBR-BBA

Para produção da mistura MBR-BBA convencional (MBR-BBA Conv) usaram-se as temperaturas usais tanto para os agregados como para o betume, sendo ambas iguais a 175 °C, o que originou uma temperatura final de mistura na ordem dos 160 °C e temperaturas de compactação na ordem dos 145 °C. Relativamente à mistura MBR-BBA na qual se adicionou 0,5% de surfactante ao betume (MBR-BBA + Surf), a temperatura do betume manteve-se igual a 175 °C (visto que o aditivo não influenciou suficientemente a sua viscosidade), mas o efeito facilitador que este aditivo tem no envolvimento dos agregados permitiu que os mesmos fossem aquecidos apenas a 145 °C. Esta redução de 30 °C no aquecimento dos agregados originou uma temperatura de mistura na ordem dos 135 °C e temperaturas de compactação na ordem dos 125 °C. Um aspeto positivo de se utilizarem temperaturas de aquecimento menores já é visível na fase de produção, porque o menor gradiente térmico com a atmosfera origina menos perdas de temperatura. De facto, comparando as misturas MBR-BBA com e sem aditivo, a diferença de 30 °C no aquecimento dos agregados reduziu-se a 25 °C no final da mistura e a 20 °C na fase de compactação. O tempo de mistura dos agregados com os betumes BBA foi de 2 minutos para não envelhecer demasiado os betumes.

Depois da mistura, e antes de se compactar provetes, retiraram-se amostras para a determinação da baridade máxima teórica (BMT) das misturas, de acordo com o procedimento A da norma EN 12697-5. Depois procedeu-se à compactação de lajes com um cilindro de rastos lisos, de onde foram cortadas vigas e carotes para ensaio. O cálculo da baridade aparente (BA) desses provetes foi realizado pelo procedimento A da norma EN 12697-6 (segundo a qual se deve pesar os provetes dentro e fora de água), para em seguida se poder calcular o seu volume de vazios. Por fim, sabendo a BA de cada provete e a BMT da respetiva mistura é possível determinar o volume de vazios (V_v), que tem de cumprir valores especificados. A Tabela 2 apresenta os resultados da BA, BMT e volume de vazios de vários provetes (carotes e vigas) usados nos vários ensaios de desempenho que se seguem.

Tabela 2 – Resumo das características volumétricas das misturas

Mistura	Tipo de provete	Baridade aparente – BA		Volume de vazios – V_v		BMT (g/cm ³)
		(g/cm ³)	Média (g/cm ³)	(%)	Média (%)	
MBR-BBA Conv	Vigas	2,281	2,277	3,76	3,92	2,370
	Carotes	2,273		4,09		
MBR-BBA + Surf	Vigas	2,280	2,275	3,39	3,60	2,360
	Carotes	2,270		3,81		

Verifica-se que o aditivo surfactante conseguiu ser muito eficaz na redução da temperatura de produção, pois permitiu reduzir o aquecimento dos agregados em 30 °C sem influenciar negativamente a trabalhabilidade e o grau de compactação obtido para as misturas com betume borracha MBR-BBA. De facto, ambas as misturas MBR-BBA com e sem aditivo apresentam valores idênticos de volume de vazios que estão dentro dos limites estipulados para misturas deste tipo (EP, 2009; LNEC, 2008), sendo que a mistura com aditivo até conseguiu atingir um menor volume de vazios apesar da sua menor temperatura de produção.

4.2. Estudo da compactabilidade das misturas betuminosas em estudo

Também se realizou um ensaio de compactabilidade (EN 12697-10) no compactador de Marshall para avaliar a evolução do volume de vazios durante a compactação. Para este ensaio adaptou-se um LVDT no compactador de Marshall de forma a medir a deformação causada por cada impacto. A Figura 4 apresenta graficamente a variação do volume de vazios em função do número de pancadas obtido para as duas misturas MBR-BBA em estudo.

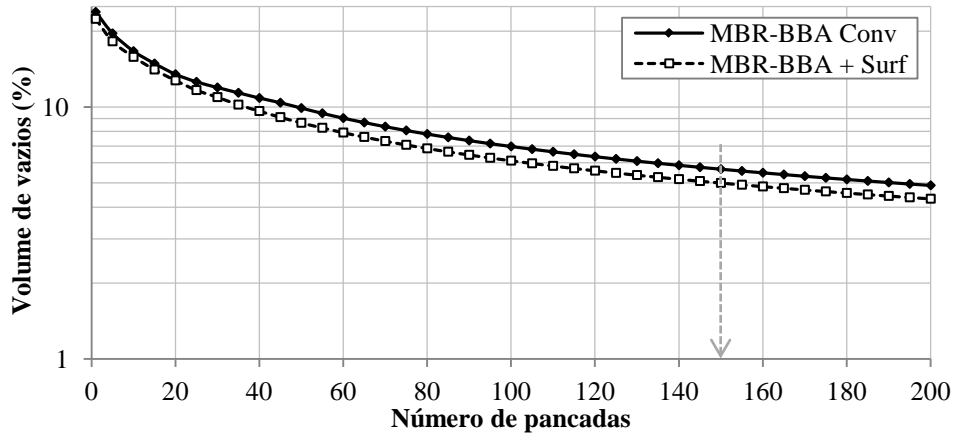


Figura 4 – Variação média do volume de vazios das misturas em estudo no ensaio de compactabilidade

A curva de compactação mostra que ambas as misturas têm uma evolução semelhante do volume de vazios ao longo do processo de compactação, sendo que o volume de vazios da mistura MBR-BBA aditivada foi sempre ligeiramente inferior ao da mistura sem surfactante, apesar da menor temperatura de compactação utilizada na primeira mistura. Verifica-se ainda que os valores do volume de vazios obtidos para ambas as misturas ao fim de 150 pancadas (5,0% e 5,7%, respetivamente para as misturas com e sem surfactante) cumprem os limites estipulados (3,5 a 6,5%) para aplicação desta mistura MBR-BBA (LNEC, 2008; EP, 2009).

Tendo em conta todos os resultados obtidos pode concluir-se que o aditivo surfactante pode ser utilizado com sucesso como tecnologia temperada para este tipo de misturas com borracha (MBR-BBA), pois não tem uma influência significativa (e até melhora) as características volumétricas destas misturas a temperaturas de compactação muito inferiores. Falta apenas confirmar se o desempenho das misturas também não fica comprometido.

4.3. Módulo de rigidez das misturas betuminosas em estudo

O módulo de rigidez das misturas estudadas foi obtido num ensaio de flexão em quatro pontos, com uma configuração de carga repetitiva e sinusoidal, em quatro provetes com $5,1 \times 6,3 \times 38,0 \text{ cm}^3$, tal como indicado na norma EN 12697-26. No ensaio foi utilizada uma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e um varrimento de frequências entre 0,1 e 10 Hz. O módulo de rigidez e o respetivo ângulo de fase das misturas MBR-BBA com e sem aditivo (Figura 5), para as várias frequências de ensaio, resultam da média de quatro ensaios.

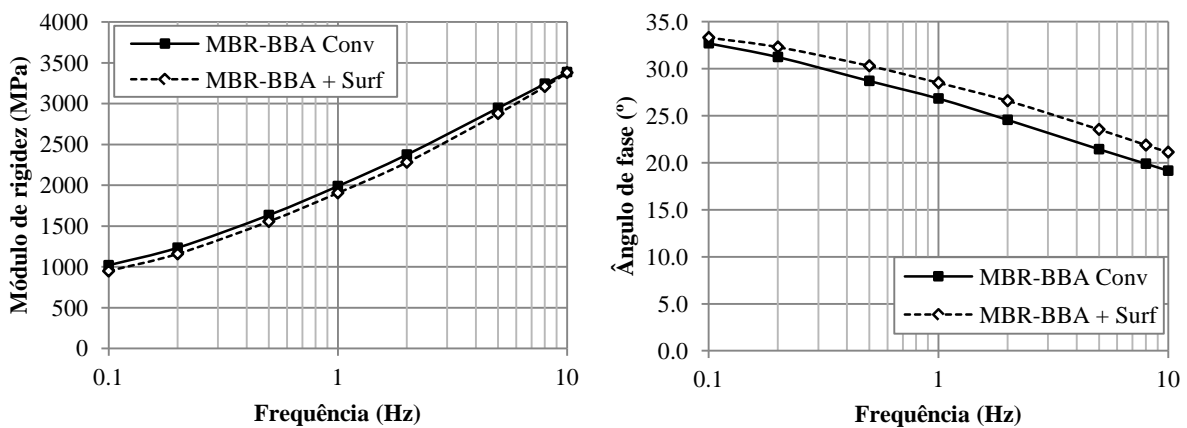


Figura 5 – Variação do módulo de rigidez e do ângulo de fase das misturas betuminosas em função da frequência de aplicação de carga

A evolução do módulo de rigidez com a frequência é muito semelhante em ambas as misturas, sendo que para a frequência de controlo de 10 Hz (LNEC, 2008) os valores do módulo são quase iguais e ambos cumprem os valores especificados (3385 e 3378 MPa, respetivamente para as misturas MBR-BBA convencional e aditivada). Assim, pode concluir-se que o aditivo surfactante praticamente não influencia o módulo de rigidez das misturas MBR-BBA, embora tenha tendência para reduzir ligeiramente esse valor.

Relativamente ao ângulo de fase das misturas, valores próximos de 90° correspondem a um comportamento mais viscoso, e valores próximos de 0° a um comportamento mais elástico. Assim, a mistura MBR-BBA convencional apresenta um comportamento mais elástico do que a mistura MBR-BBA aditivada, apesar de esta diferença também ser pouco significativa, o que pode originar um ligeiro aumento da energia dissipada em cada ciclo de carga quando se está a utilizar a mistura aditivada no pavimento.

4.4. Resistência à fadiga das misturas betuminosas em estudo

A resistência à fadiga das misturas betuminosas foi determinada em ensaios de flexão em 4 pontos, com carregamento sinusoidal repetido, sobre provetes com a dimensão de 5,1×6,3×38,0 cm³ realizados a 20 °C, de acordo com a norma EN 12697-24, a uma frequência de aplicação de cargas de 10 Hz, e em controlo de extensão. O critério de rotura por fadiga corresponde à tradicional redução do módulo de rigidez para 50% do seu valor inicial, obtendo-se assim o número de ciclos que origina a rotura por fadiga para o nível de extensão desse ensaio. As leis de fadiga das duas misturas MBR-BBA em estudo, obtidas por ajuste potencial aos resultados das várias vigas ensaiadas, estão representadas na Figura 6.

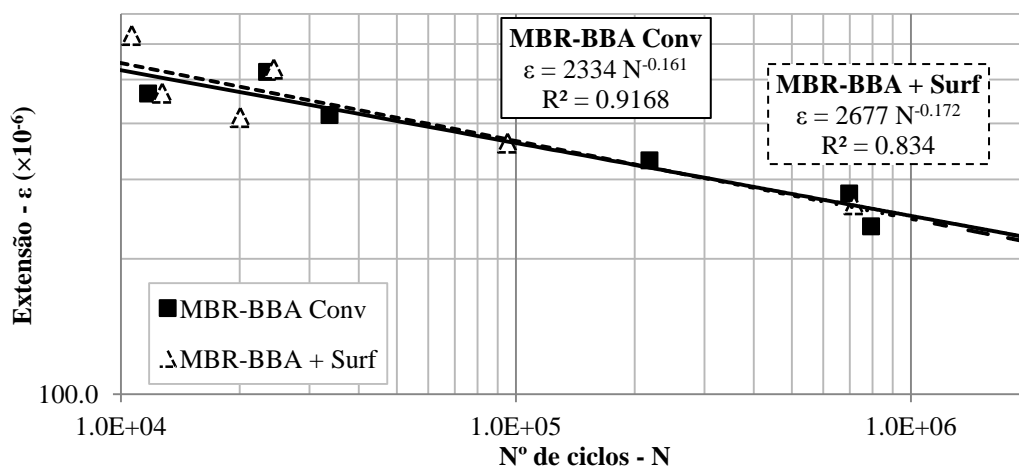


Figura 6 – Resultados do ensaio de fadiga e correspondentes leis de fadiga das misturas estudadas

Com base nas leis de fadiga apresentadas é possível determinar um conjunto de parâmetros (Tabela 3) utilizados em algumas especificações (LNEC, 2008) para avaliar a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa. Em especial, as variáveis N_{100} (resistência à fadiga para a extensão de 100E-6) e ϵ_6 (extensão para uma resistência à fadiga de 1 milhão de ciclos) são parâmetros que permitem conhecer o desempenho à fadiga das misturas estudadas.

Tabela 3 – Coeficientes das leis de fadiga e respetivos parâmetros de avaliação do desempenho à fadiga das misturas betuminosas em estudo

Mistura	a	b	R ²	N ₁₀₀	ε ₆
BMR-BBA Conv	3E+19	-5,661	0,92	1,24E+08	253,5
BMR-BBA + Surf	2E+17	-4,822	0,83	5,45E+07	250,1

Ao analisar os resultados verifica-se que ambas as misturas têm um comportamento à fadiga muito semelhantes, com leis de fadiga que praticamente se sobrepõem e com valores de ϵ_6 muito semelhantes, o que demonstra que a utilização do surfactante como tecnologia temperada praticamente não afetou a resistência à fadiga da mistura com betume borracha. Além disso verifica-se que os valores de ϵ_6 e b cumprem os valores especificados para misturas MBR-BBA (LNEC, 2008). Ao fazer uma análise mais pormenorizada aos resultados, verifica-se que a resistência à fadiga da mistura MBR-BBA convencional é ligeiramente superior à da mistura aditivada para as extensões mais baixas que geralmente ocorrem nos pavimentos, originando assim valores superiores para os parâmetros ϵ_6 e N_{100} . No entanto, para níveis de extensão mais elevados, que podem ser aceitáveis em estradas de baixo volume de tráfego, a mistura MBR-BBA aditivada teve um melhor desempenho à fadiga.

4.5. Resistência à deformação permanente das misturas betuminosas em estudo

A resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas foi determinada em ensaios de pista conduzidos a 50 °C e à frequência de 26,5 ciclos de carga por minuto, com um carregamento de 700 N sobre lajetas com a dimensão de 30×30×4 cm³. Ao longo do ensaio mede-se com um *LVDT* a deformação permanente sofrida pela mistura na zona de passagem da roda, a cada 25 ciclos de carga, até aos 10000 ciclos de carga (EN 12697-22). Na Figura 7 representa-se a média do desenvolvimento da rodeira registado em dois provetes, para cada mistura em estudo, em função do número de aplicações de carga.

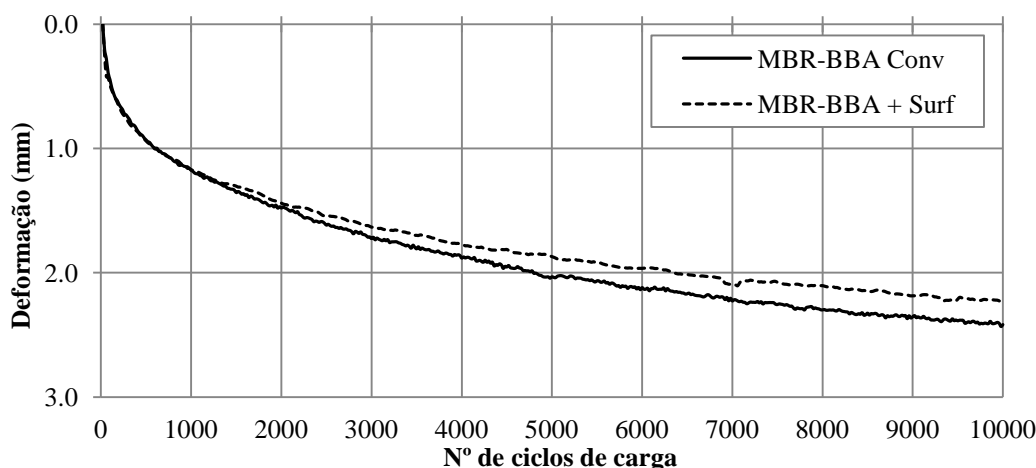


Figura 7 – Evolução da deformação permanente das misturas em função do número de ciclos

Mais uma vez, verifica-se que a resistência de ambas as misturas às deformações permanentes são idênticas, uma vez que a deformação permanente no final do ensaio (normalmente avaliada através do parâmetro PRD_{AIR}) e a evolução da deformação com o aumento do número de ciclos de aplicação da carga (normalmente avaliada através do parâmetro WTS_{AIR}) são muito semelhantes entre as misturas MBR-BBA com e sem aditivo. O parâmetro PRD_{AIR} tem valores de 6,0 e 5,6% respetivamente para a mistura MBR-BBA convencional e com aditivo, sendo esses valores 0,077 e 0,071 mm por cada 1000 ciclos de carga para o parâmetro WTS_{AIR} das mesmas misturas.

Ao avaliar-se mais em pormenor os resultados de deformação permanente, verifica-se que a mistura MBR-BBA aditivada tem uma resistência à deformação que é ligeiramente superior à da mistura convencional. Isso pode dever-se ao menor volume de vazios da mistura aditivada (que reduz a pós-compactação) ou à maior temperatura anel e bola do betume utilizado nessa mistura. Assim, pode concluir-se que o aditivo surfactante não diminui a resistência das misturas com betume borracha MBR-BBA às deformações permanentes.

4.6. Sensibilidade à água das misturas betuminosas em estudo

Outra propriedade relacionada com o desempenho das misturas betuminosas é a sua sensibilidade à água, que é um factor importante na durabilidade dos pavimentos flexíveis, em especial quando se estuda misturas para camadas de desgaste. De facto, a acção da água sobre as misturas betuminosas normalmente está associada a dois mecanismos de degradação: em primeiro lugar a perda de adesividade entre o betume e o agregado; e em segundo lugar a perda de coesão e de resistência do betume (Batista *et al.*, 2008).

A avaliação da sensibilidade à água foi efectuada através da comparação entre os valores médios das resistências à tração indireta, a 25 °C, de dois grupos de provetes cilíndricos, de acordo com a norma EN 12697-12. O primeiro grupo (não condicionado) é apenas colocado ao ar à temperatura de ensaio de 25 °C, enquanto o segundo grupo (condicionado) é previamente mantido em água durante 30 minutos, com vácuo a uma pressão de 6,7 kPa de forma a garantir que os poros são totalmente preenchidos pela água, seguidamente é acondicionado em banho-maria à temperatura de 40 °C durante 68 a 72 horas, e finalmente é colocado à temperatura de ensaio (25 °C) o tempo necessário para garantir uma temperatura dos provetes uniforme. Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água às misturas em estudo

Mistura	Condicionamento dos provetes	Volume de vazios (%)	Baridade média (g/cm ³)	Resistência à tração média – ITS (kPa)	Resistência conservada – ITSr (%)
MBR-BBA Conv	Não condicionados: Apenas ar a 25 °C	3,8	2,31	1200	89,5
	Condicionados: Vácuo e imersão em água a 40 °C		2,30	1080	
MBR-BBA + Surf	Não condicionados: Apenas ar a 25 °C	3,3	2,28	1210	93,38
	Condicionados: Vácuo e imersão em água a 40 °C		2,28	1150	

A mistura MBR-BBA com aditivo apresentou um valor de resistência conservada ITSr ligeiramente superior ao da mistura convencional, o que significa que a mistura de betume borracha com surfactante é um pouco mais resistente à ação prejudicial da água. A principal justificação para este resultado é a menor porosidade média da mistura aditivada, que assim fica mais protegida da ação da água. Os valores de resistência à tração de ambas as misturas também são muito semelhantes, o que confirma o reduzido efeito que o aditivo surfactante tem no desempenho das misturas MBR-BBA, apesar das misturas serem produzidas a temperaturas muito menores. Por último, verifica-se que os valores de ITSr obtidos para ambas as misturas são muito superiores ao limite especificado (LNEC, 2008). Desta forma, a conclusão final é de que a resistência à água de uma mistura com betume borracha MBR-BBA não é prejudicada pela utilização de surfactantes nem pela respetiva redução da temperatura de produção das misturas que utilizam esses aditivos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se a possibilidade de utilizar um aditivo surfactante (*Cecabase[®] RT*) na produção a menores temperaturas de misturas com betume borracha, do tipo MBR-BBA. Inicialmente avaliou-se a influência que este aditivo pode ter nas propriedades do betume borracha. Em seguida produziram-se misturas betuminosas com

betume borracha MBR-BBA convencionais e aditivadas, sendo que nas misturas com surfactante se reduziu a temperatura de aquecimento dos agregados em 30 °C. Em seguida avaliou-se as propriedades volumétricas e a compactabilidade de ambas as misturas, e finalmente comparou-se o desempenho de ambas as misturas. Com base nesta metodologia de trabalho e nos resultados obtidos nos diferentes ensaios foi possível concluir:

- A incorporação de 0,5% de aditivo surfactante praticamente não alterou as propriedades do betume borracha, embora tenha diminuído ligeiramente a sua penetração e aumentado um pouco a temperatura anel e bola e a resiliência;
- Foi possível reduzir em 30 °C o aquecimento dos agregados da mistura MBR-BBA aditivada sem comprometer a compactação da mistura, obtendo-se até volumes de vazios mais reduzidos do que na mistura sem aditivo;
- A perda de temperatura após produção foi mais reduzida na mistura aditivada pelo menor gradiente térmico com o ambiente, o que é benéfico para a compactação;
- As pequenas diferenças observadas entre as misturas MBR-BBA convencional e aditivada demonstraram uma ligeira tendência para que a utilização do aditivo surfactante diminua a rigidez, aumente o ângulo de fase, reduza a vida à fadiga, aumente a resistência à deformação permanente e diminua a sensibilidade à água;
- Em resumo, o desempenho das misturas com betume borracha MBR-BBA convencional e aditivada foram praticamente iguais nos vários ensaios realizados, o que valida a possibilidade de utilizar o aditivo surfactante para reduzir bastante a temperatura de produção das misturas com betume borracha. Contudo, estes resultados laboratoriais devem ser validados em trechos experimentais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional de Competitividade (COMPETE) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do projeto PLASTIROADS (PTDC/ECM/119179/2010 ou FCOMP-01-0124-FEDER-020335), sendo ainda suportado pela CEPISA (betume), grupo Arkema (surfactante), Recipneu (borracha granulada), e pedreira Bezerras (agregados).

REFERÊNCIAS

Akisetty, C.K., Lee, S-J., Amirkhanian, S.N. (2009). “High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives”. *Construction and Building Materials* 23(1), pp 565-573.

Anderson, R.M., Baumgardner, G., May, R., Reinke, G. (2008). *Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies*. Interim Report, NCHRP, TRB, Asphalt Institute.

Batista, F.A., Antunes, M.L., Fonseca, P. (2008). “Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha”. *V Congresso Rodoviário Português “Estradas 2008”*, CRP, Estoril.

CECA (2008). *Cecabase RT: Change everything... Warm Mix Asphalt – Without making any changes: Cecabase RT®’s magical touch*. Ceca, Arkema Group. <<http://www.cecachemicals.com/export/sites/ceca/.content/medias/downloads/news/en/bitum-en-additives/ceca-warm-asphalt-mix-brochure-definitive.pdf>> (acedido em 29 maio 2014).

D’Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B.

(2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. FHWA, US DoT, AASHTO, NCHRP, Report no. FHWA-PL-08-007, Alexandria, EUA.

EP (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra: 14.03 – Pavimentação – Características dos Materiais*. Estradas de Portugal SA, Almada.

Fontes, L. (2009). *Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

LNEC (2008). *Documento de aplicação 15: MBR-BMB[®] – Misturas betuminosas para pavimentos rodoviários e aeroportuários*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Abreu, L.P.F., Gonzalez-Leon, J.A. (2012). “The role of a surfactant based additive on the production of recycled Warm Mix Asphalts – Less is more”. *Construction and Building Materials* 35, pp. 693-700.

Peralta, J., Silva, H.M.R.D., Hilliou, L., Machado, A.V., Pais, J.C., Williams, R.C. (2012). “Mutual changes in bitumen and rubber related to the production of asphalt rubber binders”. *Construction and Building Materials* 36, pp. 557-565.

Peralta, J., Silva, H.M.R.D., Machado, A.V., Pais, J.C., Pereira, P., Sousa, J.B. (2010). “Changes in rubber due to its interaction with bitumen when producing asphalt rubber”, *Road Materials and Pavement Design* 11 (4), pp. 1009-1031.

Peralta, J., Hilliou, L., Silva, H.M.R.D., Machado, A.V., Williams, R.C. (2014). “Rheological changes in the bitumen caused by heating and interaction with rubber during asphalt–rubber production”. *Rheologica Acta* 53 (2), pp. 143-157.

Pestana, C.C., Pereira, P.A., Pais, J.C., Pereira, P.A.A., (2006). “Reabilitação de Pavimentos Utilizando Misturas Betuminosas com Betumes Modificados”. *Revista de Engenharia Civil / Civil Engineering* 26. Universidade do Minho, pp 17-28.

RECIPAV (2007). *A Utilização com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal*. RECIPAV Engenharia e Pavimentos, Lda., Cartaxo <[http://www.recipav.pt/imagens/utilizacao_bmb_portugal%201999_2007\(com_fotos\).pdf](http://www.recipav.pt/imagens/utilizacao_bmb_portugal%201999_2007(com_fotos).pdf)> (acedido em 29 maio 2014).

Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L., Moreno, F. (2012). “Warm mix asphalt: an overview”. *Journal of Cleaner Production* 24, pp. 76-84

Sacramento County (1999). *Report on the status of rubberized asphalt traffic noise reduction in Sacramento County*. Dep. Environmental Review and Assessment, Sacramento. <http://www.rubberpavements.org/Library_Information/4_6_Sac_County_Noise_Study.pdf> (acedido em 29 maio 2014).

Santagata, F.A., Antunes, I., Canestrari, F., Santagata, E. (2008). “Asphalt Rubber: Primeiros resultados em Itália”. *V Congresso Rodoviário Português “Estradas 2008”*, CRP, Estoril.

Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Ferreira, C.I.G., Peralta, E.J. (2009). “Evaluation of the Rheological Behaviour of Warm Mix Asphalt (WMA) Modified Binders”. *7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials (ATCBM09)*. Rodes, Grécia.

Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Ferreira, C.I.G., Pereira, P.A.A. (2010a). “Assessment of the Performance of Warm Mix Asphalts in Road Pavements”. *International Journal of Pavement Research and Technology* 3 (3), pp. 119-127.

Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Peralta, J., Zoorob, E.S. (2010b). “Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents”. *Construction and Building Materials* 24 (9), pp. 1621-1631.

Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S.N., Putman, B.J. (2012). “Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures”. *Construction and Building Materials* 31, pp. 265-272