

Hugo M.R.D. Silva  
Rui E.L. Sousa  
Joel R.M. Oliveira  
Universidade do Minho  
Guimarães, Portugal  
hugo@civil.uminho.pt  
rui.l.sousa@gmail.com  
joliveira@civil.uminho.pt

## Resumo

A indústria da pavimentação contribui de forma significativa para a emissão de gases causadores do efeito estufa e do desequilíbrio da atmosfera terrestre. Recentemente têm-se desenvolvido um conjunto de novas tecnologias para reduzir a temperatura de produção e aplicação das misturas em obra, que ainda são mais relevantes para as misturas de alto módulo (MBAM) que são produzidas a temperaturas mais elevadas. Este estudo tem por objectivo avaliar se é possível reduzir a temperatura de fabrico e compactação das MBAM sem comprometer o seu desempenho mecânico. Para tal, produziu-se uma mistura convencional AC 20 base 10/20 (MBAM) que se comparou com uma mistura equivalente modificada com parafinas AC 20 base 35/50+Sasobit<sup>®</sup> (MBAM) produzida a menores temperaturas. Este aditivo aumenta a viscosidade do betume nas temperaturas de serviço e reduz a mesma durante o fabrico (favorecendo o envolvimento dos agregados a menores temperaturas). Neste trabalho procedeu-se à formulação das misturas MBAM, à caracterização dos ligantes, à selecção da temperatura de produção da MBAM modificada e à comparação entre o desempenho das MBAM modificada e convencional, realizando ensaios de sensibilidade à água, módulo de rigidez, fadiga e deformação permanente. Foi possível concluir que a MBAM modificada tem uma sensibilidade à água e uma resistência à fadiga e à deformação permanente equivalente à MBAM convencional. Apenas se verificou uma ligeira quebra (12%) no valor do módulo de rigidez da MBAM modificada, para uma elevada redução da temperatura de fabrico e compactação (35°C), o que permite diminuir bastante os custos energéticos, ambientais e com o betume.

## INTRODUÇÃO

A Sociedade actual pretende evitar a degradação do meio ambiente ao mesmo tempo que desenvolve tecnologias e projectos que garantem a sua evolução de uma forma sustentável. A indústria da pavimentação é um dos sectores que contribui claramente para a emissão de gases com efeito de estufa (GEE), sobretudo devido à produção de misturas betuminosas a elevadas temperaturas. Como tal, este sector tem vindo a desenvolver, no fabrico das suas misturas, um conjunto de novas tecnologias para redução da temperatura de produção e aplicação em obra.

Este estudo tem por objectivo verificar até que ponto é possível reduzir a temperatura de mistura e compactação de uma mistura betuminosa de alto módulo (MBAM) de modo a obter características físicas e mecânicas idênticas às de uma MBAM convencional. Para este efeito será feita uma comparação entre o desempenho de MBAM convencional e modificada (produzida a menores temperaturas devido à adição de parafinas), adicionando diferentes quantidades de aditivo para avaliar sua influência nas propriedades do ligante e da MBAM.

Inicialmente procedeu-se à formulação das misturas MBAM e à caracterização dos ligantes (penetração, anel e bola e viscosidade), aplicando diferentes percentagens (2 a 6%) de parafinas (Sasobit®) no betume 35/50 para obter propriedades semelhantes ao betume 10/20. Em seguida confirmou-se a temperatura de produção da MBAM modificada através da análise da composição e de resultados de resistência à tracção indirecta. Finalmente, comparou-se o desempenho das MBAM modificada e convencional, realizando ensaios de sensibilidade à água, módulo de rigidez, fadiga e deformação permanente.

## **MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO MÓDULO E MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS PRODUZIDAS A MENORES TEMPERATURAS**

Reduzir os impactos ambientais causados pelas actividades industriais é uma condição básica para a indústria se adaptar às novas condições de desenvolvimento sustentável. De acordo com Capitão (1996), as misturas de alto módulo (MBAM) podem ser utilizadas com vantagens técnicas e económicas relativamente às soluções correntes com betumes mais moles. No entanto, as emissões resultantes da produção destas misturas são inevitavelmente superiores devido à necessidade de aquecer os materiais a temperaturas mais elevadas que as usadas correntemente (Capitão, 1996), assim como devido ao maior tempo de destilação necessário para produzir betumes mais duros para estas misturas.

As emissões de GEE podem variar significativamente dependendo do material seleccionado, equipamentos ou modos de produção das MBAM. A maior parte da energia é consumida no fabrico de materiais de construção e, conseqüentemente, a maior parte das emissões são produzidas nessa fase. Neste contexto, é legítimo o desenvolvimento emergente de misturas modificadas com aditivos redutores da temperatura de fabrico. Se for possível diminuir as temperaturas de produção das misturas, mantendo idênticas as suas características de comportamento, destacam-se grandes benefícios ambientais, em que as principais reduções são 30-40% de CO<sub>2</sub> e de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), 50% para os compostos orgânicos voláteis (COV), 10-30% para o monóxido de carbono (CO), 60-70% para os óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e 20-25% para as poeiras. A poupança na quantidade de combustível consumido no queimador (pode atingir 35%) é sem dúvida outro argumento de peso incontestável. Por outro lado, e no que diz respeito á colocação em obra deste tipo de misturas, é possível garantir uma trabalhabilidade adequada à sua aplicação e compactação a temperaturas inferiores às actualmente praticadas sem comprometer a densidade das diferentes camadas, o que trará benefícios aos trabalhadores, diminuindo a sua exposição directa a fumos e outras substâncias libertadas pelas misturas e que são prejudiciais à saúde (D'Angelo et al., 2008). Estas reduções podem atingir valores na ordem dos 30 a 50% relativamente às misturas betuminosas convencionais (Government Engineering, 2007).

São inúmeros os processos têm sido desenvolvidos com o objectivo de reduzir a temperatura de produção e de compactação de misturas betuminosas, aparentemente sem comprometer seu desempenho. No entanto, o uso de temperaturas inferiores pode influenciar a compactação das misturas (Hurley e Prowell, 2006). Para as misturas temperadas serem aceites no mercado é essencial que o desempenho destas seja comparável ao das misturas convencionais, e que os benefícios ambientais, conjuntamente com a redução do consumo de energia, possam superar os custos ligeiramente superiores das misturas modificadas. O mercado disponibiliza diversos tipos de aditivos, que adicionados ao ligante permitem a redução das temperaturas de fabrico e aplicação de misturas betuminosas. Alguns dos mais conhecidos são o Aspha-min Zeolite®, Cecabase®, Evotherm® e Sasobit®. O aditivo Sasobit®, que é uma mistura de hidrocarbonetos, produzida a partir da gaseificação do carvão utilizando a síntese Fischer-Tropsch (FT), foi o

seleccionado para o desenvolvimento deste estudo. O Sasobit<sup>®</sup> é uma cera que adicionada ao betume, permite a redução da sua viscosidade a temperaturas elevadas, permitindo desta forma a mistura deste com os agregados, a uma temperatura inferior à normalmente praticada.

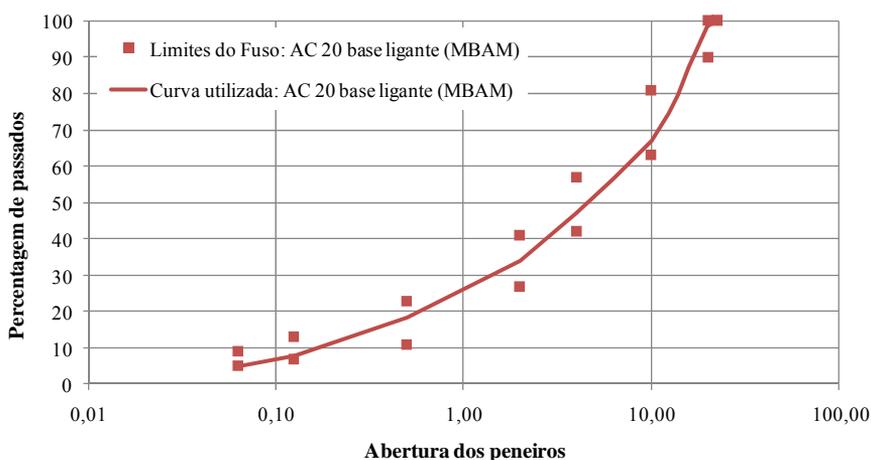
O Sasobit<sup>®</sup> é um aditivo químico que incorpora no betume um baixo ponto de fusão orgânica e que modifica a curva temperatura/viscosidade do aglutinante betuminoso (Button et al., 2007). Este aditivo funde a cerca de 100 °C, o que reduz significativamente a viscosidade do ligante. No entanto, o betume aumenta a resistência à deformação em toda a gama de temperaturas de funcionamento, mas sem afectar as propriedades da mistura que são determinadas pelas características betume base (Sasol, 2008). O Sasobit<sup>®</sup> é completamente solúvel no betume a 115 °C, e dá origem a misturas homogéneas. Isto permite que as temperaturas de produção e manuseamento da mistura betuminosa sejam reduzidas 10 a 30 °C. Hurley and Prowell (2005) demonstram as boas condições de compactibilidade de misturas com modificadas com Sasobit<sup>®</sup>, tanto no compactador giratório como no vibratório. As estatísticas indicam uma redução global no volume de vazios e uma melhoria da compactação da mistura. Os mesmos autores referem que a adição de Sasobit<sup>®</sup> não aumenta potencialmente a degradação das misturas betuminosas.

## ESTUDO DA COMPOSIÇÃO E DAS CONDIÇÕES DE PRODUÇÃO

### Formulação das Misturas de Alto Módulo Convencional e Modificada

#### *Análise Granulométrica da Mistura Betuminosa de Alto Módulo*

Relativamente á formulação da mistura AC 0/20 Base Ligante (MBAM) procedeu-se inicialmente à análise granulométrica (norma NP EN 933-1) para as fracções de agregados utilizados: britas graníticas 14/20, 6/14, 4/10 e 4/6, pó granítico 0/4 e filer comercial calcário. Na Figura 1 apresenta-se a curva granulométrica obtida para as MBAM a usar no decorrer de todo o estudo, devidamente enquadrada no fuso indicado no anexo nacional da norma NP EN 13108-1 para a mistura em questão. A curva utilizada em ambas as misturas MBAM (convencional e modificada) foi igual para ser possível comparar o desempenho das mesmas.



**Figura 1: Curva granulométrica da MBAM em estudo enquadrada no respectivo fuso**

#### *Seleção da Quantidade de Aditivo através do Estudo das Propriedades Físicas dos Ligantes*

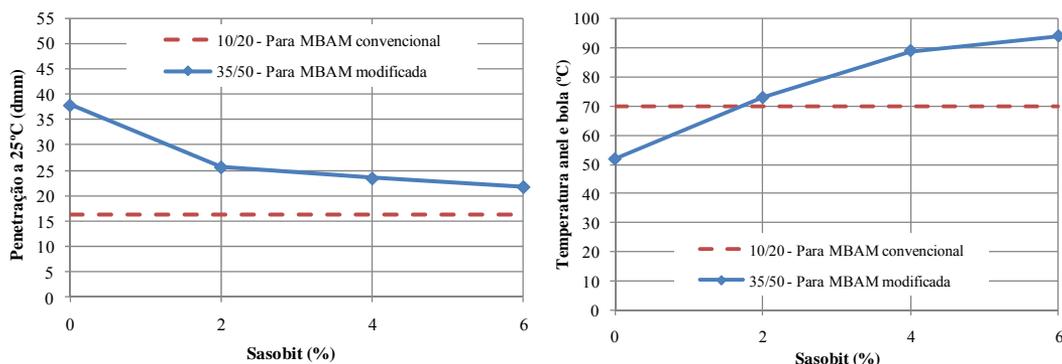
Com o objectivo de classificar os ligantes utilizados neste estudo e de seleccionar a quantidade óptima de parafinas a usar no ligante modificado, efectuaram-se ensaios de caracterização em conformidade com a norma EN 12591. Estes ensaios incluíram a avaliação da penetração a 25 °C (norma EN 1426) e do ponto de amolecimento ou temperatura anel e

bola (A&B) (norma EN 1427). Os resultados obtidos para os dois betumes base (10/20 e 35/50), assim como para o betume 35/50 aditivado com diferentes percentagens de parafinas (2, 4 e 6%) encontram-se resumidos na Tabela 1.

**Tabela 1: Penetração a 25°C e ponto de amolecimento dos ligantes em estudo**

Betume	Aditivo	Valor (%)	Pen (dmm)	$\Delta_{pen}$ (dmm)	$\Delta_{pen}$ (%)	A&B (°C)	$\Delta_{A\&B}$ (°C)	$\Delta_{A\&B}$ (%)
B10/20	-	0	16,4	0,0	0%	70,0	0,0	0%
B35/50	-	0	37,9	0,0	0%	52,0	0,0	0%
	Sasobit®	2	25,7	-11,5	-30%	73,0	21,0	40%
		4	23,5	-13,7	-36%	89,0	37,0	71%
		6	21,8	-15,4	-41%	94,0	42,0	81%

Os principais resultados (penetração e temperatura A&B) da Tabela 1 são apresentados graficamente na Figura 2, onde se pode observar a evolução da penetração a 25 °C e da temperatura A&B em função da quantidade de aditivo Sasobit® (0 a 6%) no ligante. No lado esquerdo da Figura 2 pode visualizar-se a evolução da penetração a 25 °C devido à adição de quantidades crescentes de Sasobit® ao betume 35/50. A zona sombreada representa o intervalo de penetrações que permite classificar um ligante como 10/20, segundo as exigências de conformidade actuais (aspecto fundamental para se produzir MBAM). Como se pode observar, quanto maior a percentagem de Sasobit® adicionada ao betume 35/50, mais próximo se fica de atingir o intervalo anteriormente referido. No entanto, não se atingiu esse intervalo, mesmo com a quantidade máxima de parafinas (6%) aplicada neste trabalho.

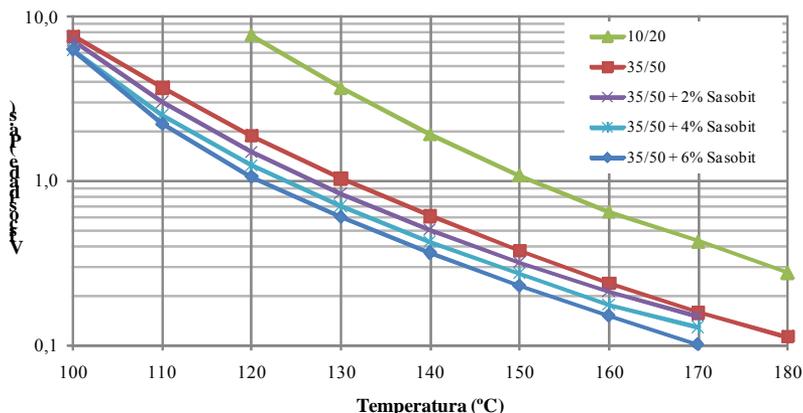


**Figura 2: Evolução da penetração e da temperatura de amolecimento dos ligantes com a quantidade de aditivo adicionado ao betume**

Em relação à temperatura de amolecimento do betume, a adição de Sasobit® exerce sobre este uma alteração significativa, e com apenas 2% de adição de parafinas ao betume 35/50 já é possível atingir o intervalo de temperaturas de amolecimento (63-76 °C) de um betume 10/20, de acordo com as exigências de conformidade actuais (zona a sombreado no lado direito).

Ao analisar os resultados anteriores verificou-se que seria necessário adicionar 8% de parafinas para atingir uma penetração inferior a 20 dmm, mas nessa situação o ponto de amolecimento do betume modificado seria muito superior ao especificado para um betume 10/20. Tendo em conta uma observação conjunta da penetração e do ponto de amolecimento, assim como a relação custo/benefício da solução final escolhida, optou-se por adoptar 6% como a percentagem “ideal” para o estudo em causa. Como consequência da solução escolhida, ao não conseguir atingir-se valores de penetração mais baixos também não se espera conseguir atingir o mesmo valor de módulo de rigidez da MBAM convencional com betume 10/20. No entanto, espera-se que a resistência à deformação permanente seja um pouco superior, o que permite obter uma solução final aceitável, não obstante o facto do custo final da mistura depender muito da quantidade de parafinas adicionadas.

Como complemento à análise anterior avaliou-se a viscosidade dos vários ligantes a altas temperaturas (100 a 180 °C), às quais as misturas são produzidas e aplicadas. A viscosidade dinâmica dos betumes foi obtida com um viscosímetro rotacional, de acordo com a metodologia apresentada por Silva et al. (2009) e com a norma EN 13302. A evolução teórica da viscosidade do ligante com a temperatura de ensaio é o resultado final dos testes realizados para confirmar a quantidade óptima de parafinas a adicionar para produzir a MBAM temperada. Este ensaio também avalia, para a mesma equi-viscosidade de produção, qual a redução de temperatura que é possível atingir com os betumes modificados em comparação com o betume 10/20. A Figura 3 apresenta a evolução da viscosidade dos betumes com a temperatura, entre 100 e 180 °C, antes e após modificação com parafinas.



**Figura 3: Evolução da viscosidade dinâmica dos betumes estudados com a temperatura**

A Figura 3 mostra que a adição de Sasobit<sup>®</sup> reduz a viscosidade dinâmica do betume nesta gama de temperaturas, que por sua vez reduz as temperaturas de produção e aplicação das MBAM. Ao analisar as temperaturas para a equi-viscosidade de 0,2 Pa.s (produção), foi possível concluir que a adição de 6% de Sasobit<sup>®</sup> ao betume 35/50 permite atingir uma redução máxima da temperatura de produção, de cerca de 35-40 °C em relação ao betume 10/20. Este resultado reforça a solução escolhida em relação à quantidade de parafinas usadas no estudo, e dá uma primeira indicação da temperatura de produção da MBAM modificada.

### Seleção do Teor em Betume para Produção das MBAM

Depois de seleccionada a curva granulométrica e as principais características dos ligantes convencional e modificado, foi necessário determinar o teor óptimo em betume. Para o estudo do teor óptimo utilizaram-se os procedimentos do anexo nacional da norma NP EN 13108-1. A compactação dos provetes foi feita através do método de impacto (EN 12697-30). Os cinco teores em betume escolhidos para o estudo foram 4,3%, 4,8%, 5,3%, 5,8% e 6,3%, dos quais, após o estudo de Marshall (Tabela 2), foi seleccionado o teor óptimo de 5,3%.

**Tabela 2: Resumo dos resultados Marshall obtidos para as diferentes percentagens de betume**

Percentagem de betume	Volume de Vazios (%)	Estabilidade de Marshall (KN)	Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )
4,3	5,34	25,23	2378,54
4,8	3,35	24,50	2398,94
5,3	2,96	24,61	2403,47
5,8	0,98	24,13	2418,78
6,3	0,56	22,30	2427,54

A escolha deste teor deve corresponder à média dos valores das percentagens de betume que conduzem ao valor máximo da baridade aparente da mistura betuminosa compactada (EN 12697-6), ao valor médio dos limites da percentagem de vazios (EN 12697-8) impostos no anexo Nacional da NP EN 13108-1 (2% a 6% para esta mistura), e ao valor máximo da estabilidade Marshall (EN 12697-34). No entanto esta escolha também foi influenciada pelo anexo Nacional da NP EN 13108-1, que refere que a percentagem de betume mínima recomendada é de 5,2%, apesar do recente caderno de encargos (Estradas de Portugal, 2009) indicar um valor mínimo de 4,0% para a mesma percentagem.

## Seleção das Temperaturas de Produção

Após terem sido feitos todos os ensaios necessários para tomar a decisão sobre qual a percentagem de Sasobit<sup>®</sup> mais adequada a utilizar, procedeu-se ao estudo da temperatura de fabrico e aplicação da mistura modificada com base na norma EN 12697-10. Na Tabela 3 apresenta-se o resumo dos resultados da resistência à tracção e da porosidade de MBAM modificadas (35/50 + 6% Sasobit<sup>®</sup>) produzidas a diversas temperaturas de estudo, assim como da MBAM convencional (10/20) como termo de comparação.

**Tabela 3: Resumo dos resultados obtidos para as diferentes percentagens de betume**

Betume	Nº pancadas (EN 12697-30)	Temperatura	Volume de vazios (%)	Resistência à tracção (MPa)
10/20	75	175 °C	3,5%	3,558
35/50 + 6% Sasobit	75	160 °C	2,4%	2,905
	75	150 °C	2,2%	2,842
	75	140 °C	2,3%	2,999
	75	130 °C	3,0%	2,795

A resistência à tracção indirecta da MBAM modificada tem um decréscimo de 0,6 a 0,8 MPa em relação à convencional, o que se deve à menor dureza do ligante modificado a 15 °C. No que diz respeito à mistura modificada os valores da resistência à tracção e do volume de vazios mantêm-se muito semelhantes à medida que se reduz a temperatura fabrico. Assim, nas condições de produção de laboratório é possível reduzir a temperatura de fabrico da MBAM modificada até 130 °C sem alterar a composição das misturas e a sua resistência à fractura. No entanto, neste trabalho seleccionou-se a temperatura de fabrico de 140 °C por uma questão de segurança na extrapolação para condições de obra. Ou seja, as parafinas usadas têm uma temperatura de fusão de 100-110 °C, que poderia facilmente ser atingida em obra durante as fases de transporte e compactação da mistura se a MBAM fosse fabricada a 130 °C.

## COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DAS MISTURAS DE ALTO MÓDULO CONVENCIONAL E MODIFICADA COM PARAFINAS

### Análise Volumétrica

De acordo com o actual caderno de encargos a porosidade para a mistura AC 0/20 base ligante (MBAM) deve variar entre 2 e 6%. Nos provetes extraídos das lajes, o volume de vazios da MBAM convencional foi um pouco inferior ao especificado (1,7%), enquanto na MBAM modificada este valor se encontra dentro do intervalo especificado (2,3%). O facto do volume de vazios de uma das misturas ser inferior ao especificado poderia originar problemas de deformação permanente, mas por outro lado vem provar que é possível compactar as misturas MBAM modificadas a baixas temperaturas (cerca de 130 °C) sem problemas em relação ao volume de vazios. Além disso, convém frisar que todas as misturas estudadas neste trabalho foram produzidas e compactadas em laboratório, sendo que a extrapolação para a

aplicação em obra costuma originar um aumento no volume de vazios de cerca de 1%, o que se deve a condicionantes dos procedimentos e equipamentos utilizados em obra.

## Estudo da Sensibilidade à Água

De uma forma geral, a avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas é realizada com recurso a ensaios de resistência mecânica realizados sobre dois grupos de provetes de misturas betuminosas com características idênticas, que são previamente acondicionados em condições distintas, sendo um dos grupos acondicionado em condições mais severas, do ponto de vista da acção da água e vácuo. O quociente entre a resistência média dos provetes desse grupo e a resistência média dos provetes acondicionados em condições menos severas fornece um valor de “desempenho conservado”, que é utilizado como indicador da sensibilidade à água. O método de ensaio utilizado foi executado segundo a norma EN 12697-12, e os resultados obtidos para as MBAM convencional e modificada são apresentados na Tabela 4.

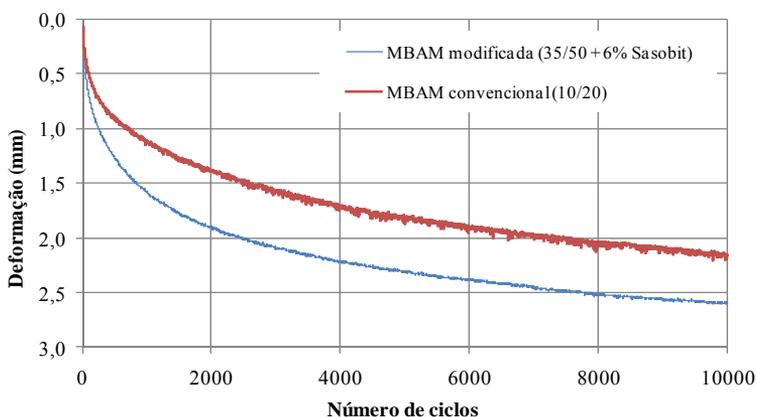
**Tabela 4: Sensibilidade à água das MBAM convencional e modificada com parafinas**

Mistura	MBAM convencional (10/20)	MBAM modificada (35/50 + Sasobit®)
ITSR (%) – EN 12697-12	86%	92%

A MBAM modificada apresenta um comportamento ligeiramente melhor em relação à sensibilidade à água do que a MBAM convencional. Contudo, as diferenças são muito pouco acentuadas, pelo que se pode afirmar que a sensibilidade à água de ambas as misturas é muito idêntica. Estes valores são bastante elevados, o que demonstra que nenhuma das misturas vai ter problemas de sensibilidade à água. Ao mesmo tempo, demonstra-se que a utilização de parafinas não prejudica a ligação agregado-ligante da mistura modificada.

## Resistência à Deformação Permanente

Os resultados dos ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente ainda não permitem estimar com relativa segurança o comportamento que se pode esperar que venha a ocorrer no pavimento. Porém, a análise dos resultados destes ensaios permite hierarquizar as misturas ensaiadas e aferir se são cumpridos os limites impostos aos parâmetros indicadores do seu comportamento à deformação permanente. Neste estudo realizaram-se ensaios de pista em laboratório em escala reduzida, de acordo com a norma EN 12607-22, a uma temperatura de 50 °C de acordo com as indicações de Freire et al. (2002), de forma a comparar o comportamento das misturas MBAM convencional e modificada (Figura 4).

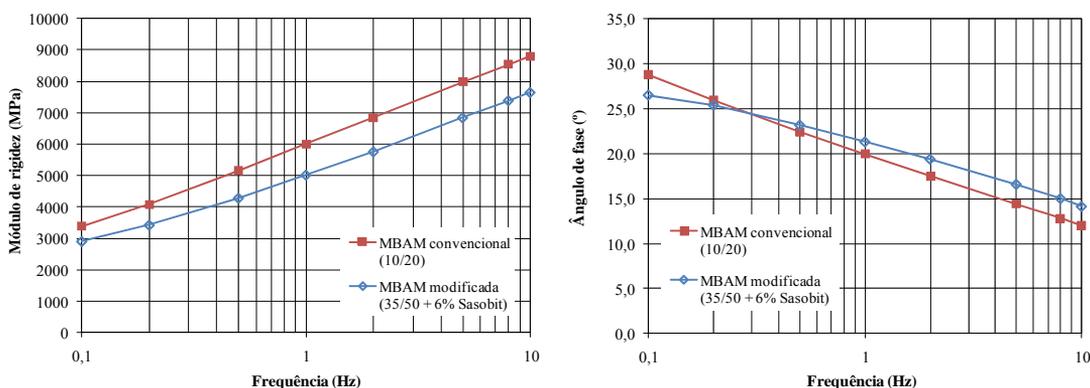


**Figura 4: Evolução da deformação permanente das MBAM convencional e modificada com parafinas no ensaio de pista**

A mistura MBAM modificada deformou-se um pouco mais do que a mistura convencional, apesar da taxa de deformação de ambas as misturas após os primeiros 2000 ciclos ser muito semelhante. Também se verificou que a deformação sofrida por ambas as misturas foi bastante reduzida, tal como se esperava para este tipo de misturas. O valor do  $WTS_{AIR}$  da MBAM modificada com parafinas ( $0,059 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$ ) é inferior ao da MBAM convencional 10/20 ( $0,072 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$ ), apesar da profundidade máxima de rodeira ( $PRD_{AIR}$ ) da mistura modificada (2,60 mm) ser superior ao da mistura convencional (2,16 mm). Ao analisar em conjunto estes resultados foi possível concluir que o desempenho das duas misturas neste ensaio é muito semelhante, apesar da deformação inicial na mistura modificada ser ligeiramente superior devido à pós-compactação desta mistura.

## Módulo de Rigidez

As misturas betuminosas utilizadas nos pavimentos rodoviários têm comportamento mecânico do tipo visco-elástico. Na prática do dimensionamento, este comportamento é definido pelo módulo de rigidez e pelo coeficiente de poisson, que caracterizam o comportamento elástico linear, e que são bastante dependentes da temperatura e da frequência de aplicação das cargas. A norma EN 12697-26 normaliza os procedimentos para caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios com carregamentos repetidos à flexão, tracção indirecta ou tracção directa uniaxial (Neves e Correia, 2006). O método de ensaio utilizado neste trabalho foi o de flexão em 4 pontos sobre provetes prismáticos com carregamento sinusoidal (Anexo B). Na Figura 5 apresentam-se os valores do módulo de rigidez e ângulo de fase obtidos de acordo com essa norma, utilizando o procedimento de “varrimento de frequências” (0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 8 e 10 Hz) a 20°C para as duas misturas MBAM estudadas.



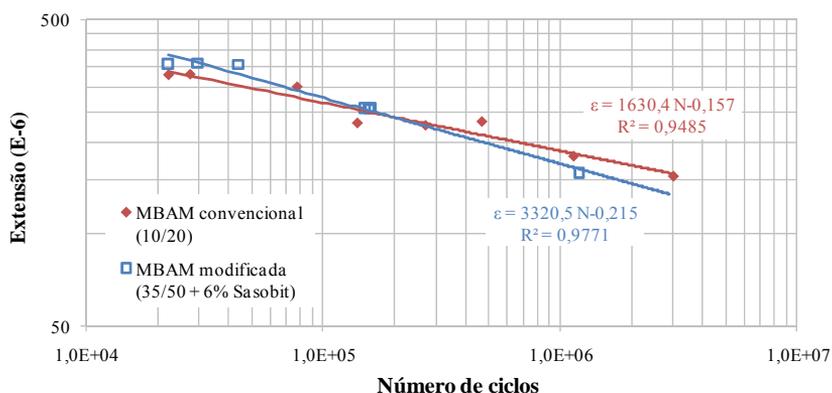
**Figura 5: Módulo de rigidez e ângulo de fase das MBAM convencional e modificada com parafinas a diferentes frequências**

O módulo da MBAM convencional a 8 Hz é 9000 MPa e o da MBAM modificada é 7900 MPa. Assim, pode referir-se que ambas as misturas têm módulos elevados, mas que ficam aquém do esperado para uma MBAM. As principais justificações para este facto relacionam-se com o valor de penetração de ambos os ligantes (próximo de 20 dmm) e com o teor em betume relativamente elevado (5,3%) utilizado nas misturas MBAM. A redução de 1100 MPa (12%) no módulo da MABM modificada em relação à convencional resulta, em especial, do valor de penetração do ligante modificado ser um pouco superior a 20 dmm. Não se considera que a redução do módulo da MBAM modificada seja significativa, principalmente quando esta mistura apresenta vantagens ambientais e energéticas elevadas em comparação com a MBAM convencional. Em relação ao valor um pouco reduzido de ambas as misturas MBAM, poderá verificar-se posteriormente que este é compensado por um melhor desempenho em relação à resistência à fadiga, devido ao elevado teor em betume.

Ao reduzir a frequência, o valor dos módulos das MBAM convencional e modificada aproximam-se. A redução da frequência produz na mistura um efeito idêntico ao aumento da temperatura, pelo que a MBAM modificada com Sasobit® tem um desempenho equivalente à convencional em condições de tráfego mais exigentes (tráfego lento e temperaturas elevadas). Os resultados do ângulo de fase confirmam que a MBAM modificada tem um comportamento mais elástico a frequências reduzidas, sendo por isso menos sensível à variação de temperatura e frequência, o que resulta da elevada rigidez das parafinas a menos de 100 °C.

## Resistência ao Fendilhamento por Fadiga

O método de ensaio utilizado para a determinação da resistência à fadiga foi o de flexão em 4 pontos sobre provetes prismáticos com carregamento sinusoidal, a uma frequência de 10 Hz e à temperatura de 20 °C (EN 12697-24). A norma especifica que os ensaios devem ser realizados em extensão controlada, com três níveis de extensão seleccionados para realizar o ensaio. Na Figura 6 apresentam-se os resultados de resistência à fadiga obtidos para as duas misturas MBAM estudadas, incluindo as leis de fadiga que correspondem ao melhor ajuste potencial ( $\epsilon = a N^b$ ) aos resultados pontuais obtidos em cada ensaio.



**Figura 6: Resistência à fadiga das MBAM convencional e modificada com parafinas**

Ambas as misturas têm uma vida à fadiga muito semelhante, o que se justifica pelo facto da mistura modificada utilizar um betume base (35/50) mais flexível, mas ao mesmo tempo incorporar parafinas que lhe reduzem essa flexibilidade, resultando desta forma um betume com um desempenho equivalente ao 10/20. Ao analisar a resistência à fadiga em função da extensão aplicada, verifica-se que a MBAM modificada tem melhor desempenho para extensões elevadas (superiores a 250E-6), enquanto a mistura convencional tem melhor desempenho para menores extensões (tipicamente observadas nos pavimentos em serviço). No entanto, convém referir que ambas as misturas têm uma resistência à fadiga elevada para misturas de alto módulo (classificações  $\epsilon_{6-160}$  e  $\epsilon_{6-190}$  para 1 milhão de ciclos de vida à fadiga).

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta as possíveis vantagens do uso de parafinas na redução da temperatura de produção e aplicação de MBAMs, e verifica se estas não comprometem o desempenho estrutural. Os resultados obtidos até a presente data permitem tirar as seguintes conclusões:

- Numa análise conjunta da penetração, anel e bola e viscosidade do ligante modificado com Sasobit®, verifica-se que a temperatura de amolecimento do ligante modificado é superior à do ligante 10/20, apesar de a sua penetração ser mais elevada (o que originou uma ligeira redução do módulo de rigidez da MBAM modificada);

- A quantidade óptima de Sasobit<sup>®</sup> a adicionar ao ligante 35/50 para produção da MBAM modificada foi 6%, o que permitiu uma redução da temperatura de equi-viscosidade ideal de produção para este ligante da ordem dos 35-40 °C em comparação com o betume 10/20;
- A mistura MBAM modificada (6% de parafina) não apresenta problemas de compactação (características volumétricas), mesmo a temperaturas 45 °C inferior à MBAM convencional, embora se tenha optado por reduzir apenas 35 °C pelas condições de obra;
- A MBAM modificada tem uma sensibilidade à água e uma resistência à fadiga e à deformação permanente equivalente à MBAM convencional;
- Apenas se verificou uma ligeira quebra (12%) no valor do módulo de rigidez da MBAM modificada, para uma elevada redução da temperatura de fabrico e compactação (35 °C), o que permite diminuir bastante os custos energéticos, ambientais e com o betume, pelo que a solução apresentada demonstra grandes potencialidades de aplicação prática.

## REFERÊNCIAS

- Button, J.W., Estakhri, C., Wimsatt, A. (2007). A Synthesis of Warm-Mix Asphalt. Texas Transportation Institute and Federal Highway Administration. Report 0-5597-1. Texas.
- Capitão, S.D. (1996). Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade. Contribuição para a caracterização do seu comportamento. Tese de Mestrado, FCT da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B. (2008). Warm-Mix Asphalt: European Practice. FHWA, U.S. Department of Transportation, AASHTO, NCHRP, Report no. FHWA-PL-08-007. Alexandria.
- Estradas de Portugal (2009). Caderno de Encargos Tipo Obra. Pavimentação. Características dos Materiais.
- Freire, A.C., Antunes, M.L. e Picado-Santos, L. (2002). Deformação Permanente de Misturas Betuminosas em Camadas de Desgaste – Sua Caracterização Laboratorial. 2.º Congresso Rodoviário Português. CRP. Lisboa.
- Government Engineering (2008). Warm Mix Asphalt Technologies and Research.
- Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2005). Evaluation of Sasobit<sup>®</sup> for use in Warm Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology, Auburn Univ., NCAT Report 05-06. Auburn.
- Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2006). Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, p. 41-90.
- Neves, J.M.C., Correia, A.G.C. (2006). Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaios de Tracção Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos. Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães.
- NP EN 13108-1 (2008). Misturas Betuminosas. Especificações dos Materiais. Parte 1: Betão Betuminoso. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- Sasol (2009). Sasobit Technology. Sasol Wax. <<http://www.sasolwax.com/Europe.html>> (Acedido em 13-03-2009).
- 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. Proceedings of the 7th International RILEM Symposium ATCBM09, Rhodes, Greece.