

DEFORMABILIDADE, COMPORTAMENTO À FADIGA E RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO MÓDULO PARA CAMADAS DE BASE

SILVINO DIAS CAPITÃO

PROFESSOR ADJUNTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA

LUÍS PICADO-SANTOS

PROFESSOR AUXILIAR COM AGREGAÇÃO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

JORGE PAIS

PROFESSOR AUXILIAR

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DO MINHO

RESUMO

As misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade (MBAM) para camadas de base de pavimentos têm sido utilizadas com sucesso, particularmente em França, ao longo de quase duas décadas. No entanto, a experiência da utilização de tais materiais em Portugal é reduzida. Por isso, estudaram-se MBAM produzidas com betume duro, e com uma mistura de agregados graníticos com uma dimensão máxima de 25 mm.

O estudo que se apresenta permitiu avaliar o comportamento mecânico daquele tipo de materiais, para condições de ensaio capazes de representarem razoavelmente as condições climáticas portuguesas. Neste artigo analisam-se os resultados laboratoriais de caracterização mecânica a que se chegou, designadamente no que se refere a módulos de deformabilidade, ângulos de fase, comportamento à fadiga e resistência à deformação permanente.

Na formulação levada a cabo, adoptaram-se também procedimentos de ensaio que permitiram avaliar em laboratório o desempenho mecânico de provetes recolhidos em trechos experimentais. Além disso, a caracterização mecânica das composições estudadas incluiu provetes produzidos em laboratório, os quais reproduziram aproximadamente, em termos volumétricos, os espécimes recolhidos no pavimento.

São propostos indicadores de desempenho que podem servir de base ao desenvolvimento em Portugal de especificações técnicas e critérios de formulação baseados no desempenho mecânico para MBAM. Para as condições de ensaio adoptadas, foi possível propor algumas expressões de previsão das propriedades mecânicas avaliadas.

Neste artigo, para além da descrição e discussão dos resultados do estudo, pretende dar-se uma contribuição para o que deve constituir o estudo do comportamento mecânico de misturas de alto módulo para o seu emprego na construção de pavimentos rodoviários em Portugal.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte da investigação realizada em vários países, incluindo Portugal, tem-se centrado na tentativa de estudar materiais de pavimentação que permitam reduzir as patologias que ocorrem ao longo da vida dos pavimentos. De acordo com a experiência estrangeira, especialmente a Francesa [1], as Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade (MBAM) constituem um material capaz de contribuir para aquele objectivo. Tratam-se de materiais não tradicionais, cujas propriedades mecânicas dependem principalmente da utilização de betumes bastante mais duros que os tradicionais, em geral, do tipo 10/20.

Para o caso de misturas betuminosas não tradicionais, como são MBAM para camada de base, é necessário medir experimentalmente as suas propriedades mecânicas, uma vez que não se dispõe, em geral, de expressões de previsão do seu comportamento mecânico.

Neste artigo apresentam-se as características mecânicas de MBAM medidas em laboratório, designadamente as propriedades de deformabilidade, de resistência à fadiga e à deformação permanente. O extenso programa de ensaios laboratoriais efectuado permitiu também propor algumas recomendações no que diz respeito à formulação de MBAM e, além disso, possibilitou o desenvolvimento de algumas expressões de previsão das características mecânicas daquele tipo de misturas.

2. PARÂMETROS DO ESTUDO

Habitualmente, quando se avaliam características mecânicas de misturas betuminosas, estuda-se a influência dum conjunto de parâmetros relativos, quer à composição das misturas (Quadro 1), quer às condições de ensaio (Quadro 2).

Quadro 1 – Variáveis de composição das misturas avaliadas no estudo

Variáveis	Casos Estudados
<ul style="list-style-type: none">• percentagem de betume na mistura	<ul style="list-style-type: none">• baixa: 4,8%• média: 5,3%• alta: 5,8%
<ul style="list-style-type: none">• quantidade de filer calcário na mistura	<ul style="list-style-type: none">• menor: 2%• maior: 5%
<ul style="list-style-type: none">• nível de compactação	<ul style="list-style-type: none">• N1: muito elevado• N2: elevado
<ul style="list-style-type: none">• tipo de compactação	<ul style="list-style-type: none">• obra• laboratório

As composições estudadas foram produzidas com um betume duro, de destilação directa, com uma penetração a 25°C, de 10/20 (0,1 mm) [2]. As diferenças entre as diversas

composições foram conseguidas através do controlo da percentagem de betume, relativamente ao peso total da mistura, uma vez que isso poderia constituir um bom indicador das variações de composição do mastique (betume mais filler).

Quadro 2 – Parâmetros de ensaio avaliados no estudo

Parâmetros	Casos Estudados
<i>Avaliação das características de deformabilidade (ensaio de flexão, com duas cargas e dois pontos de apoio):</i>	
• nível de extensão aplicado	• 60×10^{-6} ; 120×10^{-6} ; 300×10^{-6}
• temperatura	• 15; 25; 40; 45°C
• frequência (carga variando de forma sinusoidal no tempo)	• 0,1; 1; 5; 10 Hz
<i>Avaliação da resistência à fadiga (ensaio de flexão, com duas cargas e dois pontos de apoio):</i>	
• nível de extensão aplicado	• 250×10^{-6} ; 450×10^{-6} ; 650×10^{-6}
• temperatura	• 25°C
• frequência (carga variando de forma sinusoidal no tempo)	• 10 Hz
<i>Avaliação da resistência à deformação permanente (ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas):</i>	
• nível de tensão aplicado (impulsos de carga seguidos de repouso)	• 500 kPa
• temperatura	• 25; 35; 45°C
• diâmetro dos provetes cilíndricos	• 100; 150 mm

Neste estudo utilizou-se uma mistura de agregados graníticos britados, com 25 mm de dimensão máxima. No que respeita ao filler adicionado, foram adoptadas duas soluções distintas: nas misturas “A” utilizou-se 2% de filler calcário; nas misturas “B”, substitui-se 3% de material granítico da classe 0/6 por uma percentagem idêntica de filler calcário, perfazendo um total de 5% deste material. As curvas granulométricas das duas misturas de agregados resultaram praticamente iguais [2].

Das lajetas recolhidas nos vários trechos experimentais construídos, algumas foram serradas, de modo a obter vigas de forma prismática ($50 \times 8 \times 8 \text{ cm}^3$), para submeter a ensaios à flexão (2 cargas, dois pontos de apoio). Outras foram preparadas de modo a serem utilizadas em ensaios com simulador de tráfego ($30 \times 30 \times 5 \text{ cm}^3$). Extraíram-se também tarolos com 100 e 150 mm de diâmetro, e com uma altura da ordem de 11 cm. Os provetes cilíndricos foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas. Os espécimes foram agrupados em dois conjuntos, “Ai,j” e “Bk,j”, em função das composições das misturas utilizadas no seu fabrico. O índice “i”=1, 2, 3 representa a percentagem de betume (respectivamente, 4,8%, 5,3% e 5,8%). O índice “k”= 4, 5, 6 representa também as

percentagens de betume de 4,8%, 5,3% e 5,8%, respectivamente. Finalmente, o índice “j” traduz os níveis de compactação “N1” (j=1) e “N2” (j=2).

Produziram-se também misturas em laboratório, a partir de lajetas fabricadas com a mistura de agregados “A”, e adoptando percentagens de betume (“i”=1, 2, 3) semelhantes às utilizadas nos trechos experimentais. A compactação foi feita com um cilindro vibrador de dois rolos de pequenas dimensões. Os provetes cilíndricos produzidos em laboratório, com 150 mm de diâmetro e aproximadamente 11 cm de altura, formam moldados num molde metálico, e compactados por vibro-compressão [3].

No que se refere aos parâmetros de ensaio, foram adoptadas gamas de valores que cobrem os habitualmente considerados em projecto. Contudo, neste estudo pretendia-se uma caracterização mais ampla do comportamento, razão pela qual se adoptou uma gama de condições de ensaio mais alargada. Uma justificação mais desenvolvida das condições de ensaios utilizadas pode ser encontrada noutras publicações dos autores ([3], [4]).

O estudo das características de deformabilidade e do comportamento à fadiga consistiu em submeter os provetes prismáticos a ensaios de flexão (2 cargas, 2 pontos de apoio), em condições de deslocamento controlado. Em termos de carregamento, adoptaram-se ondas de carga variando de forma sinusoidal no tempo, para as frequências e extensões indicadas no Quadro 2.

A avaliação da resistência à deformação permanente consistiu particularmente na realização de ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas, utilizando impulsos de carga com 0,2 s, separados por períodos de repouso de 0,8 s. Estes ensaios foram conduzidos em condições de controlo de carga, correspondendo a um valor máximo de tensão aplicada de 500 kPa. Realizaram-se também alguns ensaios com simulador de tráfego, utilizando o equipamento utilizado em Espanha [5]. Neste caso a pressão de contacto adoptada foi de 900 kPa e a temperatura de ensaio foi de 60°C.

3. CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE

3.1. Resumo dos resultados

A Figura 1, na qual se representam graficamente resultados obtidos sobre provetes recolhidos nos trechos experimentais “Ai,j”, ilustra bem a tendência geral dos valores do módulo de deformabilidade e do o ângulo de fase obtidos.

De uma maneira geral, o módulo de deformabilidade da MBAM diminui com o aumento da percentagem de betume, e aumenta com a frequência de ensaio (frequências mais elevadas

correspondem a tempos de carga mais curtos). Verifica-se a tendência contrária para o ângulo de fase.

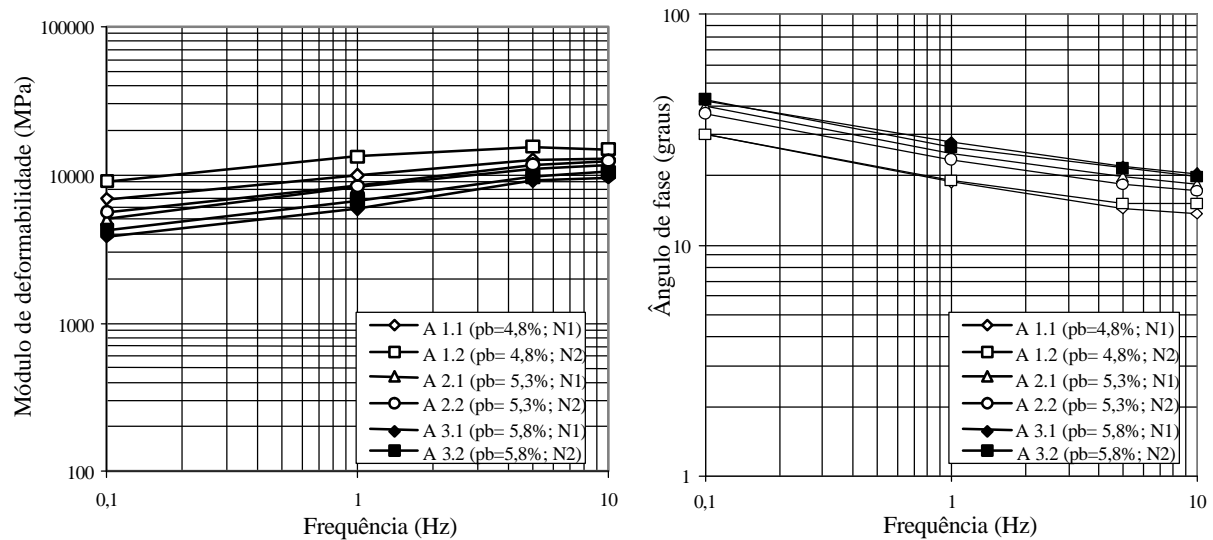


Figura 1 - Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas $A_{i,j}$, medidos para um nível de extensão de 120 microns, à temperatura de 25°C

Além disso, apesar da porosidade das misturas estudadas ser relativamente baixa, variando entre cerca de 1,3 a 4%, verifica-se que a relação módulo de deformabilidade-porosidade é estatisticamente significativa [4]. Para a gama de porosidades avaliada, o módulo de deformabilidade diminui com o aumento da porosidade. No que se refere ao VMA (vazios na mistura de agregados: soma da percentagem volumétrica de betume com a porosidade), observa-se que o módulo de deformabilidade também diminui quando aquela grandeza aumenta.

Tal como se referiu a propósito do efeito da frequência, e como seria de esperar, as demais condições de ensaio influenciam também de forma visível os resultados (Figura 2).

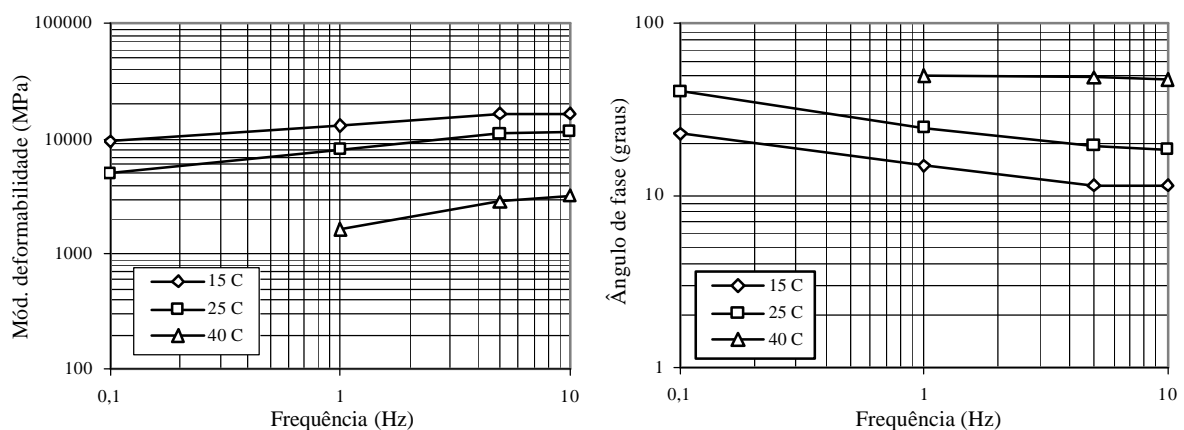


Figura 2 –Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura A 2.1, medidos para um nível de extensão de 120 microns

Quando a temperatura aumenta os valores do módulo de deformabilidade diminuem. No que respeita à evolução dos valores do ângulo de fase a tendência é a contrária. Verificou-se ainda que o nível de extensão adoptado nos ensaios também tem uma influência assinalável [4]. O módulo de deformabilidade é geralmente mais baixo quando o nível de extensão é mais elevado. Verifica-se de novo que a evolução do ângulo de fase com o nível de extensão tende a ser a oposta, embora o efeito seja menos visível.

3.2. Previsão do módulo de deformabilidade de MBAM

As condições de solicitação adoptadas em laboratório permitiram obter, para as composições testadas, valores do módulo de deformabilidade das misturas variando desde cerca de 600 até 20000 MPa, para um número de observações da ordem de 400. Com os resultados obtidos, efectuaram-se diversas simulações incluindo variáveis relativas à composição das misturas e às condições de ensaio. Do conjunto das simulações efectuadas, optou-se por apresentar apenas o modelo mais geral, de modo a poder traduzir uma gama tão extensa quanto possível de situações [6]. Assim, o modelo estatístico proposto para prever o módulo de deformabilidade de MBAM, E_{mist} (MPa), com base nos resultados experimentais determinados, traduz-se pela seguinte expressão ($R^2=0,886$):

$$E_{mist} = 30231 - 2151,1 \times tc - 331,9 \times Temp - 853,5 \times V_b - 16,94 \times Ext + 6,33 \times S_b \quad (1)$$

onde tc (s) é o tempo de carregamento, $Temp$ ($^{\circ}C$) é a temperatura da mistura betuminosa, V_b (%) é a percentagem volumétrica de betume, Ext ($\mu m/m$) é a máxima extensão de tracção a que é submetido o material e S_b (MPa) é a rigidez do betume.

Aplicando o modelo proposto para prever o módulo de deformabilidade de uma MBAM, admitindo uma gama de temperaturas no pavimento entre 20 e 35 $^{\circ}C$ (valores típicos de projecto em Portugal Continental) e uma composição típica para a MBAM, obtêm-se, para uma velocidade de circulação de 50 km/h, módulos entre cerca de 13000 e 7000 MPa.

Note-se que, para temperaturas até 30 $^{\circ}C$, o modelo de previsão da Shell [7] conduz geralmente a valores superiores aos obtidos pela expressão (1) proposta para MBAM. No entanto, para temperaturas acima daquele valor, o modelo da Shell pode levar a valores

inferiores aos obtidos por (1). Além disso, para os níveis de extensão mais elevados (200 e 250 microns), os quais são mais correntes quando um pavimento atinge temperaturas elevadas, o modelo da Shell fornece ainda estimativas do módulo de maior valor que o modelo proposto [6].

4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FADIGA

4.1. Resumo dos resultados

A avaliação clássica da resistência à fadiga numa mistura betuminosa é feita considerando que a ruína do provete ocorre no momento em que o seu módulo de deformabilidade (E_{mist}) se reduz numa certa percentagem do seu valor inicial (em geral 50%). Após a realização de vários ensaios preliminares, nos quais se avaliou a perda de resistência que conduzia a um fendilhamento visível do material, tomou-se, como convenção, o valor de 70% do módulo inicial para condição de paragem dos ensaios de fadiga, uma vez que o material exibia ainda uma elevada capacidade resistente para uma redução de 50% do módulo.

A análise dos resultados permitiu determinar, por regressão, as expressões da forma $\epsilon_t = a N^{-b}$ (ϵ_t : extensão de tracção; N: número de repetições de carga), cujas constantes a e b são função da composição das misturas estudadas (Quadro 4).

Quadro 3 – Comportamento à fadiga de Ai,j, Lab.Ai e Bk,j (25°C; 10 Hz)

Composição	A1.1	A1.2	A2.1	A2.2	A3.1	A3.2
Valor de a	4466,6	4881,2	4871,1	5635,4	4898,1	4618,8
Valor de b	-0,2229	-0,2263	-0,2216	-0,2389	-0,2157	-0,2201
R²	0,969	0,957	0,954	0,990	0,922	0,982
e₆ (microns)	205,4	214,2	228,0	207,7	248,8	220,8
Composição	Lab.A1		Lab.A2		Lab.A3	
Valor de a	7273,7		5067,5		4374,4	
Valor de b	-0,2581		-0,2224		-0,1956	
R²	0,931		0,904		0,947	
e₆ (microns)	205,7		234,6		293,3	
Composição	B4.1	B4.2	B5.1	B5.2	B6.1	B6.2
Valor de a	3133,7	4691,5	4270,3	4198,3	5677,1	3754,3
Valor de b	-0,186	-0,216	-0,214	-0,215	-0,230	-0,194
R²	0,936	0,967	0,938	0,936	0,967	0,981
e₆ (microns)	239,9	236,3	221,7	216,5	235,4	258,1

Dentre as composições estudadas, as que incorporam maior percentagem de betume tendem a apresentar maior resistência à fadiga. No entanto, para os provetes recolhidos nos trechos experimentais, por se terem construído pares de sub-trechos com misturas idênticas mas compactados com diferentes energias, verifica-se que, em geral, as composições sujeitas a um

maior nível de compactação são mais resistentes à fadiga que as compactadas com menor energia. Isto deve-se, essencialmente, ao facto de haver, de uma maneira geral, uma redução da porosidade das misturas quando o nível de compactação aumenta.

Comparando as leis de fadiga obtidas para os provetes produzidos em laboratório (lab.Ai) e para os extraídos do pavimento (Ai.j), verifica-se que as resistências à fadiga não diferem muito, exceptuando os casos das composições mais ricas em betume, lab.A3 e A3.j. De facto, para algumas condições de compactação utilizadas no campo, as leis de fadiga obtidas sobre provetes de laboratório parecem reproduzir bem o comportamento observado sobre amostras recolhidas no campo. Parece, assim, ser de aceitar a realização de estudos de caracterização da resistência à fadiga de MBAM com base em provetes produzidos em laboratório, pelo processo utilizado neste estudo, não sendo absolutamente decisiva a realização de trechos experimentais no âmbito da formulação.

4.2. Previsão da resistência à fadiga de MBAM

Com os resultados obtidos, efectuaram-se diversas simulações incluindo variáveis relativas à composição das misturas e às condições de ensaio. Do conjunto das simulações efectuadas, seleccionou-se a expressão (2), por ser a que conduziu ao valor mais elevado do coeficiente de determinação ($R^2=0,916$).

$$\log N = 140,859 \times 10^{-3} \times \text{Ext}^{-378,656 \times 10^{-3}} \times V_b^{230,151 \times 10^{-3}} \quad (2)$$

onde N é o número de admissível de carregamentos até à ruína (70% de redução do módulo), Ext (m/m) é a extensão de tracção máxima induzida no provete em cada ciclo de carga e V_b é a percentagem volumétrica de betume. As relações $\epsilon_t - N$ determinadas para as diferentes composições (Quadro 3), embora sendo menos gerais na sua aplicação que a expressão (2), dão indicações mais realistas que aquela na previsão da resistência à fadiga, para níveis de extensão inferiores ao intervalo de validade (250 a 650 microns) daquela lei.

5. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

5.1. Resumo dos resultados

A partir das curvas tempo-deformação permanente obtidas nos ensaios de compressão uniaxial, foram determinados vários parâmetros, os quais permitiram classificar as composições estudadas relativamente à sua susceptibilidade para sofrerem deformações permanentes [4]. Dentre os indicadores adoptados seleccionaram-se a velocidade de deformação na região linear das curvas acima referidas (V_{def}), e a extensão axial permanente ao fim de 3600 ciclos (ϵ_p). No Quadro 4 resumem-se os valores daqueles indicadores obtidos para provetes recolhidos nos trechos experimentais.

Os indicadores de resistência adotados (V_{def} e ϵ_p) aumentam quando a percentagem de betume aumenta, o que configura uma pior resistência à deformação permanente para as misturas mais ricas em betume. Como seria de esperar, observa-se também uma redução da resistência à deformação permanente com o aumento da temperatura de ensaio.

Quadro 4 – Parâmetros de resistência à deformação permanente de Ai,j e Lab.Ai obtidos sobre provetes com 150 mm de diâmetro

Temperatura (°C)	A1.1	Lab.A1	A1.2	A2.1	Lab.A2	A2.2	A3.1	Lab.A3	A3.2
	Velocidade de deformação x10 ⁶ (mm/ciclo)								
25	52,9	23,9	74,1	118	29,2	144	234	34,7	142
35	79,5	33,9	95,5	203	130	201	311	62,6	301
45	171	323	144	334	764	303	505	735	378
Temperatura (°C)	Extensão axial permanente (%)								
	25	0,3	0,455	0,5	0,8	0,4	1,0	1,6	0,6
35	1,2	0,588	1,6	3,3	0,8	2,5	3,8	0,9	3,5
45	2,3	1,62	2,6	4,2	4,89	3,6	6,1	3,86	5,4

Há que assinalar a maior susceptibilidade à deformação permanente dos provetes produzidos em laboratório (Lab.Ai), para valores elevados da temperatura (45°C), os quais representam as condições mais propícias ao desenvolvimento de deformações irreversíveis nas camadas betuminosas. No entanto, para o conjunto de resultados obtidos, as diferenças observadas entre os resultados observados para os provetes de laboratório e para os recolhidos nos trechos experimentais não são estatisticamente significativas.

5.2. Indicadores de resistência à deformação permanente

Uma apreciação complementar dos resultados permitiu relacionar alguns parâmetros determinados nos ensaios de compressão uniaxial com outros alcançados em ensaios com simulador de tráfego (passagem cíclica de uma roda sobre uma lajeta), os quais foram efectuados durante os estudos de formulação [2]. Foi possível apurar que os valores da velocidade de deformação na fase linear à temperatura de 45°C, $V_{def-T45}$, encontrados para o primeiro tipo de ensaios (provetes com 100 e 150 mm de diâmetro) têm uma boa correlação ($R^2=0,82$) com os valores de $V_{def-105/120}$ (velocidade de deformação da lajeta) a que se chegou nos ensaios com simulador de tráfego, a 60°C [4]. Foi ainda possível relacionar $V_{def-105/120}$ com a extensão axial permanente (ϵ_p-T45), obtidos, respectivamente, a partir dos ensaios com simulador de tráfego e de compressão uniaxial ($R^2=0,84$).

Adoptando os critérios adoptados em Espanha para o ensaio com simulador de tráfego [5], uma composição só é aceite se o valor médio do parâmetro $V_{def-105/120}$ não ultrapassar 15×10^{-3} mm/min. Assim, através das correlações referidas, foi possível concluir que, à temperatura de 45°C e nas demais condições de ensaio seguidas, as MBAM que apresentam valores de V_{def} e ϵ_p-T45 superiores a $402 \cdot 10^{-6}$ mm/ciclo e 4,78 %, respectivamente, resistirão previsivelmente mal à deformação permanente.

6. CONCLUSÕES

As composições das MBAM estudadas e os parâmetros de ensaio adoptados foram seleccionados de modo a cobrirem grande parte das condições práticas de utilização em Portugal. Estabeleceram-se valores de referência para o módulo de deformabilidade de MBAM, os quais podem ter uma utilização útil ao nível do projecto e de estudos de formulação. Além disso, foi proposto um modelo de previsão do módulo de deformabilidade com base em parâmetros de composição das MBAM e nas condições de solicitação.

Verificou-se que é possível avaliar a resistência à fadiga de MBAM em laboratório sem que seja necessário construir trechos experimentais, designadamente para efeitos de formulação. As composições que incorporam maior percentagem de betume tendem a apresentar maior resistência à fadiga. Os resultados mostraram que o nível de compactação tem uma influência importante na vida à fadiga observada. O parâmetro ϵ_6 é adequado para hierarquizar as misturas em termos de resistência à fadiga, no âmbito de estudos de formulação.

Os provetes cilíndricos, tal como foram produzidos em laboratório, parecem não ser adequados para efeitos de formulação de MBAM. Noutro sentido, os valores admissíveis das variáveis $V_{def-T45}$ e ϵ_p-T45 a que se chegou, podem ser tomados como indicativos da uma adequada resistência à deformação permanente a exigir a composições de MBAM, em ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas. Porém, a investigação deve prosseguir neste aspecto particular, de modo a avaliar o desempenho de MBAM em serviço.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Corté, J.-F. - “Development and uses of hard grade asphalt and of high modulus asphalt mixes in France”. Session on perpetual pavements. Transportation Research Board. Washington, 2001.
- [2] - Capitão, S., Picado-Santos, L., Quaresma, L. - “Formulação de mistura betuminosa de alto módulo para um pavimento fortemente solicitado”. 1º Congresso Rodoviário Português: Estrada 2000, Vol. II, Lisboa, 2000, pp. 593-604.

- [3] - Capitão S., Picado-Santos L., Pais J. - “Design and evaluation of the bearing capacity of high modulus asphalt concrete by means of a performance-based approach”. Proceedings of the 3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Universidade do Minho. Ed. Pereira, P. e Branco, F., Guimarães, 2003, pp. 485-493.
- [4] – Capitão, S., - “Caracterização mecânica de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade” Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 2003.
- [5] - Especificação Espanhola NLT-173/84. - “Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio”. Madrid, 1984.
- [6] - Picado-Santos, L., Capitão, S., Pais J. - “Stiffness Modulus and Phase Angle Prediction Models for High Modulus Asphalt Concrete”. International Journal of Pavements. Waheed Uddin, University of Mississippi. Vol. 2, nº 3, pp. 37-49, 2003.
- [7] - Bonnaure, F., G. Gest, A. Gravois, and P. Ugé. “A new method for predicting the stiffness os asphalt paving mixtures”. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. Volume 46, 1977, pp 64-104.