

IAG132-03-2013
RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS COM
AGREGADO SIDERÚRGICO INERTE PARA A CONSTRUÇÃO
RESISTENCIA A LA FATIGA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS CON
ADICIÓN DE ACERO INERTE PARA LA CONSTRUCCIÓN

José Neves
Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, Portugal
jose.manuel.neves@ist.utl.pt

João Crucho
Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, Portugal
crucho@gmail.com

Luís Picado-Santos
Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, Portugal
luispicadosantos@ist.utl.pt

Fernando Martinho
Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, Portugal
fernando.martinho@ist.utl.pt

Resumen

La necesidad de construir en un contexto de mayor sostenibilidad ambiental y económica ha conducido en los años más recientes a la utilización cada vez mayor de materiales no tradicionales. Las mezclas bituminosas son un ejemplo de ello, concretamente a través de la incorporación en su composición de residuos de diferentes procedencias, como es el caso del Agregado Siderúrgico Inerte para la Construcción (ASIC) que constituye un residuo industrial. Entre otros aspectos igualmente importantes, la aplicación de estos nuevos materiales pasa por la evaluación experimental de su grado de eficiencia, como es el caso de la fatiga. En este artículo se presenta un estudio de laboratorio realizado con el objetivo de evaluar la resistencia a la fatiga de la mezcla bituminosa AC20 base 35/50 con incorporación de ASIC. Se estudiaron dos procesos de fabricación: una mezcla bituminosa en caliente, con incorporación de un 20 % de ASIC; una mezcla bituminosa templada con adición de Sasobit, con incorporación de un 30 % de ASIC. Con el fin de establecer un análisis comparativo del grado de eficiencia de las mezclas bituminosas, se estudió también una mezcla bituminosa idéntica sin incorporación de ASIC. La resistencia a la fatiga fue evaluada conforme a la norma europea EN 12697-24 a través de ensayos de flexión en cuatro puntos. Genéricamente, los ensayos fueron llevados a una extensión constante a la temperatura de 20 °C y a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz. El artículo describe los resultados de los ensayos que permitieron concluir que las mezclas

bituminosas estudiadas con ASIC tuvieron un comportamiento adecuado a la fatiga. Se considera que las leyes de fatiga obtenidas evidenciaron una resistencia aceptable y adecuada para todo tipo de mezcla bituminosa en estudio, confirmándose desde este punto de vista la viabilidad de la incorporación del ASIC.

Resumo

A necessidade de construir num contexto de maior sustentabilidade ambiental e económica tem conduzido nos anos mais recentes a uma maior utilização de materiais não tradicionais. As misturas betuminosas são disso um exemplo, nomeadamente através da incorporação na sua composição de resíduos de diversas proveniências, como é o caso do Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) que constitui um resíduo industrial. Entre outros aspetos igualmente importantes, a aplicação destes novos materiais passa pela avaliação experimental do seu desempenho, como é o caso da fadiga. Neste artigo é apresentado um estudo laboratorial realizado com o objetivo de avaliar a resistência à fadiga da mistura betuminosa AC20 base 35/50 com incorporação de ASIC. Foram estudados dois processos de fabrico: uma mistura betuminosa a quente, com incorporação de 20% de ASIC; uma mistura betuminosa temperada com adição de Sasobit, com incorporação de 30% de ASIC. De forma a estabelecer uma análise comparativa do desempenho das misturas betuminosas, foi estudada também uma mistura betuminosa idêntica sem incorporação de ASIC. A resistência à fadiga foi avaliada segundo a norma europeia EN 12697-24 através de ensaios de flexão em quatro pontos. Genericamente, os ensaios foram conduzidos a extensão constante à temperatura de 20°C e a uma frequência de aplicação de carga de 10Hz. O artigo descreve os resultados dos ensaios que permitiram concluir que as misturas betuminosas estudadas com ASIC tiveram um comportamento adequado à fadiga. Considera-se que as leis de fadiga obtidas evidenciaram uma resistência aceitável e adequada para o tipo de mistura betuminosa em estudo, confirmando-se deste ponto de vista a viabilidade do ASIC.

INTRODUÇÃO

As vantagens económicas e ambientais que a utilização de materiais reciclados tem na construção e conservação de infraestruturas de transporte, justifica cada vez mais o desenvolvimento de trabalhos de investigação com vista a garantir ao mesmo tempo que as vantagens técnicas da utilização desses materiais não usuais também está assegurada. Neste âmbito, insere-se a utilização de Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC), um subproduto industrial, na composição das misturas betuminosas. De facto, só através de estudos experimentais, em laboratório e em campo, será possível estabelecer especificações indispensáveis à formulação, construção e controlo de qualidade da aplicação destes novos materiais na construção de camadas em misturas betuminosas, entre outras aplicações em pavimentos.

No presente trabalho é abordada a incorporação de ASIC em misturas betuminosas. O ASIC utilizado foi já estudado anteriormente no âmbito da sua aplicação em camadas granulares não ligadas e em aterros (Gomes Correia et al., 2009). Relativamente a camadas ligadas, também já foram realizados estudos preliminares sobre a reutilização do ASIC, quer em misturas fabricadas a quente (Neves et al. 2011a e 2011b) quer em misturas betuminosas temperadas (Martinho et al., 2012). Estes estudos basearam-se em ensaios laboratoriais de caracterização geométrica, física e

mecânica do ASIC e do comportamento de misturas betuminosas com várias taxas de incorporação do ASIC avaliado em ensaios de compressão Marshall e de afinidade do ASIC ao betume. De um modo geral, estes estudos experimentais permitiram concluir que o ASIC apresenta propriedades favoráveis à sua utilização como agregado em misturas betuminosas e que a sua aplicação para esta finalidade merece ser aprofundada em estudos mais avançados através de ensaios de avaliação do desempenho do comportamento mecânico.

Este artigo tem como objetivo apresentar a influência do ASIC na resistência à fadiga de dois tipos de misturas betuminosas: mistura betuminosa fabricada a quente e mistura betuminosa temperada. A resistência à fadiga foi avaliada através do ensaio de flexão em quatro pontos segundo a norma EN 12697-24 (CEN, 2004a). Com este objetivo, foram ensaiadas misturas betuminosas com várias taxas de incorporação de ASIC e as conclusões do trabalho realizado basearam-se na comparação das leis de fadiga obtidas para as várias composições estudadas. Neste trabalho são também apresentados os valores do módulo de deformabilidade obtidos previamente em ensaios realizados segundo a norma EN 12697-26 (CEN, 2004b).

ESTUDO EXPERIMENTAL

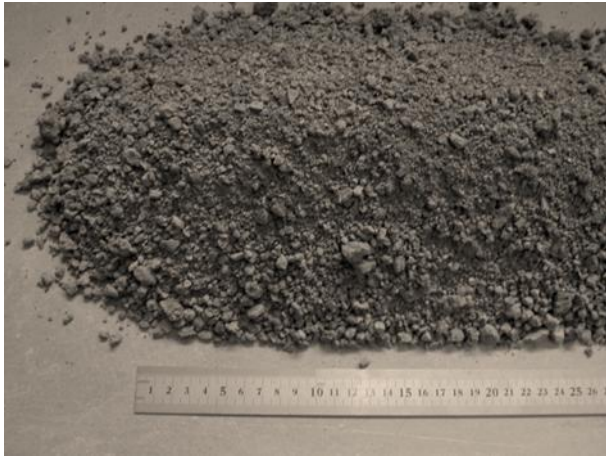
Materiais

O estudo da resistência à fadiga foi realizado nas seguintes misturas betuminosas:

- Mistura betuminosa a quente do tipo AC 20 base 35/50 (AC1), com incorporações de 0% (AC1_0), 20% (AC1_20) e 35% (AC1_35) de ASIC.
- Mistura betuminosa temperada do tipo AC 20 base 35/50 (AC2), com incorporações de 0% (AC2_0) e 30% (AC2_30) de ASIC.

A Figura 1 mostra a fracção 0/16 de ASIC utilizada na composição das misturas betuminosas. O Quadro 1 apresenta as principais propriedades geométricas, físicas e mecânicas do ASIC (Neves et al. 2011a), onde se pode destacar os valores elevados das massas volúmicas e da absorção de água e os valores das propriedades geométricas e de resistência à fragmentação, que são adequados à utilização do ASIC como agregado na composição de misturas betuminosas.

Figura 1: Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC)



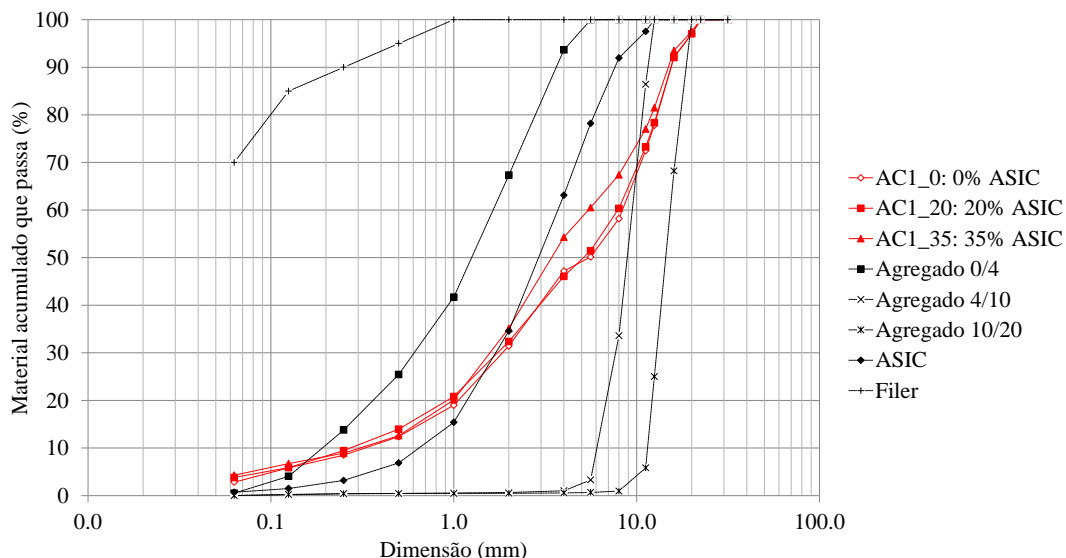
Quadro 1: Propriedades do ASIC

Propriedade	Unidade	Valor
Índice de forma (NP EN 933-4)	%	1
Índice de achatamento (NP EN 933-3)	%	2
Equivalente de areia (NP EN 933-8)	%	78
Azul de metileno (NP EN 933-9)	g/kg	0,2
Massa volúmica impermeável das partículas (NP EN 1097-6)	Mg/m ³	3,84
Massa volúmica das partículas secas (NP EN 1097-6)	Mg/m ³	3,63
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (NP EN 1097-6)	Mg/m ³	3,69
Absorção de água (NP EN 1097-6)	%	1,7
Resistência à fragmentação Los Angeles (NP EN 1097-2)	---	25

Relativamente às propriedades químicas e de expansibilidade do ASIC, que constituem das principais preocupações associadas a este tipo de aplicações, elas dependem fortemente da tecnologia utilizada no fabrico do aço. Embora o ferro e os óxidos de cálcio, magnésio e alumínio sejam os constituintes maioritários, outros estudos têm confirmado que o ASIC utilizado no presente trabalho pode ser considerado como um material inerte (Gomes Correia et al. 2009).

Todas as misturas betuminosas estudadas são constituídas por fracções 0/4, 4/10, 10/20 de agregado calcário. Para além das curvas granulométricas destas fracções de agregado, a Figura 2 mostra também a curva granulométrica da fracção de ASIC utilizada nas misturas betuminosas estudadas (0/16), bem como do filer comercial. Todas estes agregados foram combinados de forma a que a curva granulométrica da mistura resultante se inserisse no fuso granulométrico adotado para este tipo de mistura betuminosa, de acordo com as especificações técnicas portuguesas aplicáveis. O Quadro 2 apresenta a composição das várias fracções adotadas para todas as misturas betuminosas estudadas. A Figura 2 representa as curvas granulométricas finais das misturas de agregados para o caso da mistura do tipo AC1: AC1_0, AC1_20 e AC1_35.

Figura 2: Curvas granulométricas dos materiais da mistura betuminosa AC1



Quadro 2: Composição das misturas betuminosas

Mistura betuminosa		Agregados (%)					Betume (%)
Descrição	Designação	ASIC	0/4	4/10	10/20	Filer	
Mistura a quente (AC1)	AC1_0	0	45	22	30	3	4,7
	AC1_20	20	30	20	25	5	
	AC1_35	35	25	10	25	5	
Mistura temperada (AC2)	AC2_0	0	48	20	32	0	4,5
	AC2_30	30	35	0	30	5	

Em todas as misturas betuminosas foi utilizado um betume puro de classe 35/50. O Quadro 2 apresenta também as percentagens ótimas de betume consideradas em cada uma das misturas betuminosas, estabelecidas com base no método Marshall (Neves et al. 2011a, 2011b).

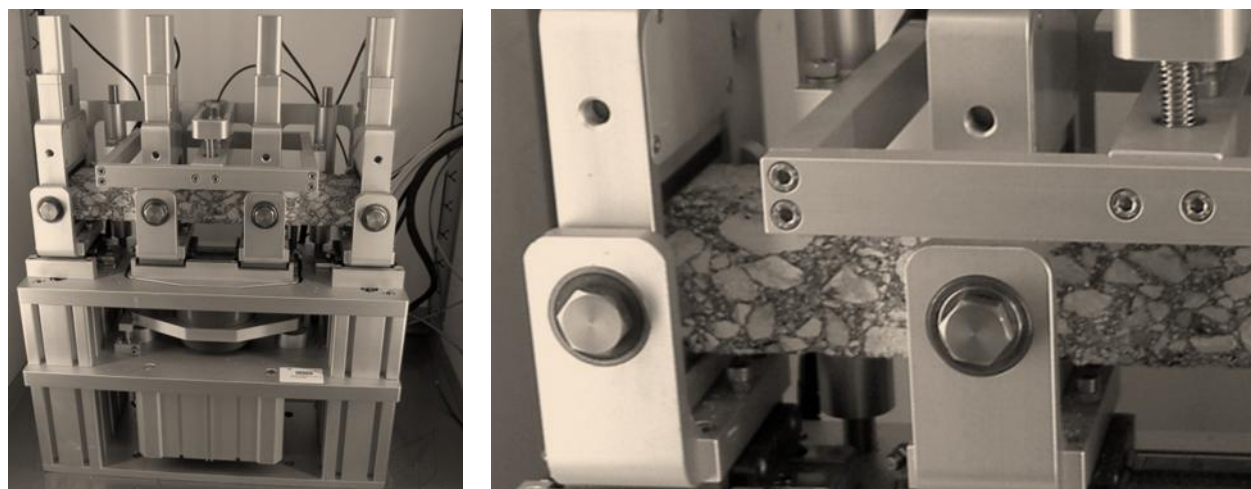
Na constituição das misturas betuminosas temperadas (AC2_0 e AC2_20) também foi utilizado 4% de aditivo orgânico Sasobit, responsável pela redução significativa da viscosidade do betume de base às temperaturas de fabrico e de compactação (Martinho et al. 2012).

Metodologia de ensaio

A norma EN 12697-24 (CEN, 2004a) relativa à determinação da resistência à fadiga de misturas betuminosas contempla diferentes procedimentos de ensaio. Em Portugal, o ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos é o procedimento mais comum para obter as leis de fadiga de misturas betuminosas. Estes foram, portanto, os ensaios realizados neste trabalho e que estão estabelecidos no Anexo D da norma EN 12697-24 (CEN, 2004a).

A Figura 3 mostra uma vista geral do equipamento utilizado nos ensaios (figura à esquerda) e também um detalhe da fixação do provete prismático no sistema de aplicação de carga (figura à direita).

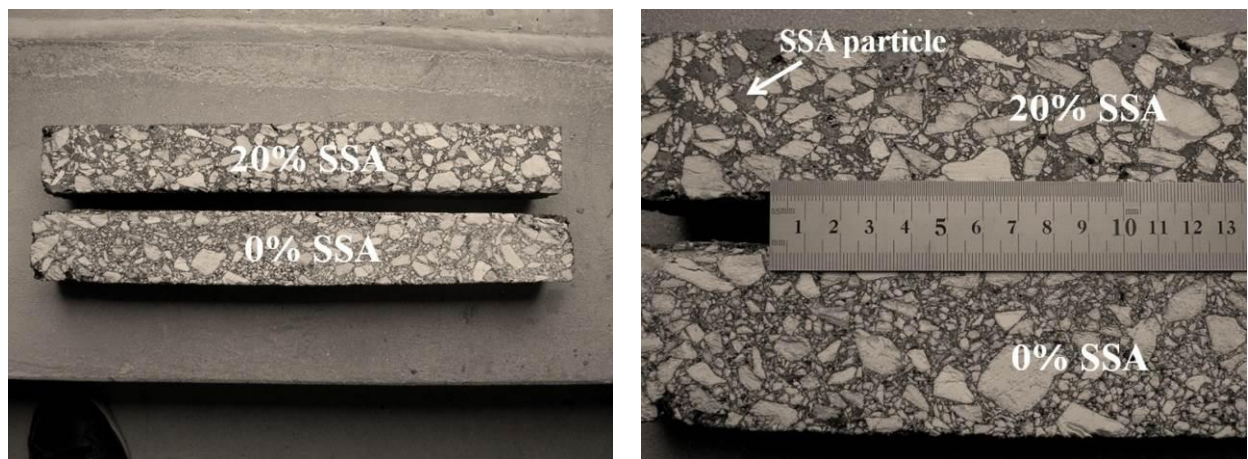
Figura 3: Equipamento do ensaio de fadiga



Os provetes prismáticos necessários aos ensaios foram obtidos por corte de lajes compactadas em laboratório. A Figura 4 mostra dois provetes prismáticos da mistura AC1, onde está assinalada uma partícula de ASIC que se observa no interior da mistura.

Foram realizados previamente ensaios de determinação do módulo de deformabilidade, com base na norma EN 12697-26 (CEN, 2004b), com aplicação de extensão de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$, com forma sinusoidal e frequências nominais de 1, 3, 5, 10, 20 e 30 Hz. Para cada frequência, procedeu-se sempre a 100 repetições. No que diz respeito aos ensaios de fadiga, estes foram realizados para três níveis de extensão controlada: 150, 250 e 400 $\mu\text{m}/\text{m}$. Estas extensões foram aplicadas com sinal de onda sinusoidal caracterizado pelo valor da amplitude de deformação e pela frequência que foi de 10 Hz. O critério de paragem do ensaio baseou-se no valor do módulo de deformabilidade e foi de 50% do seu valor no início do ensaio. Todos os ensaios foram conduzidos à temperatura controlada de 20°C (Freire et al. 2006).

Figura 4: Provetes prismáticos



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em síntese, os resultados em análise dizem respeito aos módulos de deformabilidade e às leis de fadiga obtidos nos ensaios realizados com todas as misturas betuminosas. A análise dos resultados baseou-se na comparação do comportamento evidenciado pelas misturas betuminosas com ASIC (AC1_20, AC1_35 e AC2_30) em relação às misturas betuminosas de referência, ou seja, sem ASIC: AC1_0 e AC2_0.

O Quadro 3 apresenta os resultados dos ensaios de determinação do módulo de deformabilidade (valores médios para todos os provetes), para frequências de 1, 3, 5, 10, 20 e 30 Hz. No caso de 1 Hz, os valores indicados correspondem à primeira frequência aplicada, uma vez que a norma recomenda que os ensaios sejam realizados para frequências crescentes mas que, no final, se repita o ensaio para 1 Hz. Em geral, observa-se que foi na mistura betuminosa temperada que a presença de ASIC teve maior influência no comportamento, na medida em que a mistura AC2_30 apresentou valores do módulo de deformabilidade menores para todas as frequências.

Quadro 3: Módulos de deformabilidade (20°C)

Frequência (Hz)	Módulo de deformabilidade (MPa)				
	Mistura a quente (AC1)			Mistura temperada (AC2)	
	AC1_0	AC1_20	AC1_35	AC2_0	AC2_30
1	4272	4037	3776	2567	1863
3	5506	5712	5306	3703	2764
5	6149	6629	5977	4355	3308
10	7247	7891	7028	5273	4011
20	8335	9321	8272	6291	4804
30	8890	10191	8891	6971	5460

A resistência à fadiga das misturas betuminosas estudadas foi representada como é corrente por curvas de fadiga que estabelecem as relações entre as extensões aplicadas e o número de ciclos de carga aplicados até se atingir o critério de rotura estabelecido. A Figura 5 e a Figura 6 representam as curvas de fadiga para as misturas betuminosas a quente e temperada, respetivamente, obtidas por regressão linear dos resultados obtidos. A observação relativa dessas curvas permite concluir no geral que: para a mistura betuminosa a quente (AC1), a presença de ASIC melhorou sempre a resistência à fadiga; na mistura betuminosa temperada (AC2), a presença de ASIC não influenciou a resistência à fadiga, embora só tenha sido estudada uma taxa de incorporação (20%).

A equação que traduz as curvas de fadiga representadas nas figuras – leis de fadiga – é do tipo da equação (1) na qual: ε é a extensão; N é o número de ciclos; a e b são parâmetros constantes.

$$\varepsilon = a N^b \quad (1)$$

Figura 5: Curvas de fadiga para as misturas betuminosas a quente (20°C)

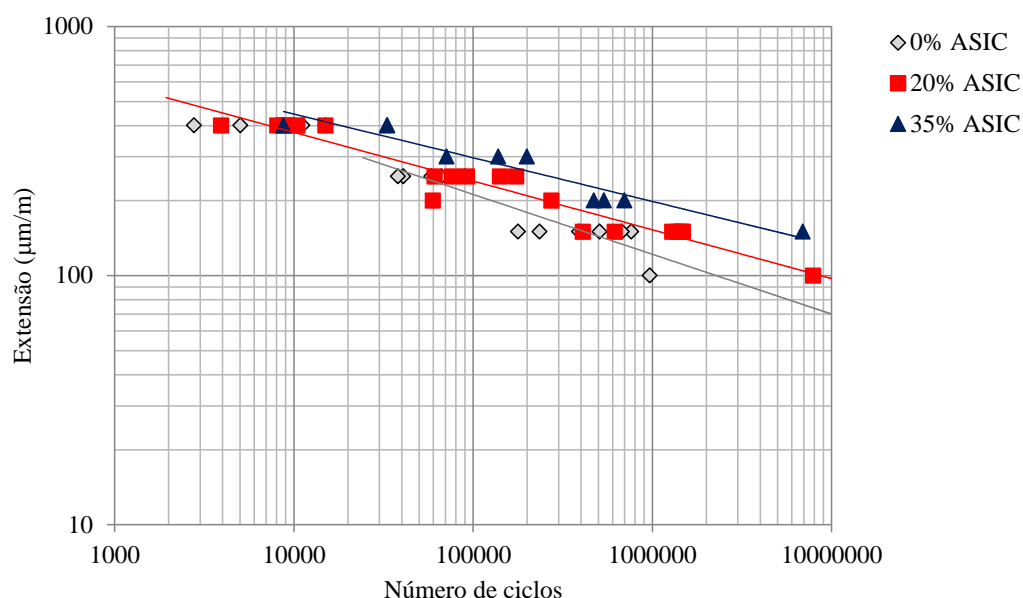
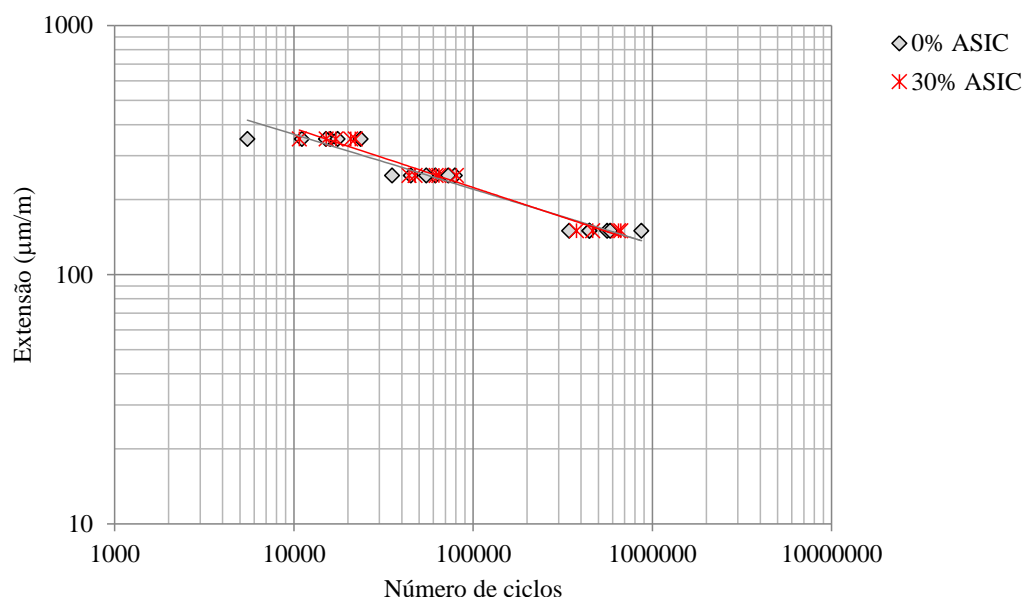


Figura 6: Curvas de fadiga para as misturas betuminosas temperadas (20°C)



No Quadro 4 são apresentados os parâmetros a e b que caracterizam as leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas, bem como o coeficiente de correlação (R^2).

O Quadro 4 apresenta também os valores de extensão interpolados pelas leis de fadiga correspondentes a cem mil (ϵ_5), um milhão (ϵ_6) e dez milhões (ϵ_7) de aplicações de ciclos de carga. A observação destes valores permite confirmar a evolução da resistência à fadiga em função da taxa de incorporação de ASIC já concluída da observação das Figuras 5 e 6. Confirma-se que foi para a mistura betuminosa a quente (AC1) que estes valores (ϵ_5 , ϵ_6 e ϵ_7) foram sempre crescentes, ou seja, houve sempre um aumento da resistência à fadiga. O mesmo comportamento não foi evidenciado para a mistura betuminosa temperada (AC2). Com efeito, para a taxa de incorporação estudada (20 %), não se observou uma alteração da resistência à fadiga da mistura betuminosa.

Quadro 4: Características da resistência à fadiga (20°C)

Parâmetro	Mistura betuminosa				
	Mistura a quente (AC1)			Mistura temperada (AC2)	
	AC1_0	AC1_20	AC1_35	AC2_0	AC2_30
a	3364,5	2283,6	2241,7	2774,3	3442,5
b	-0,24	-0,20	-0,18	-0,22	-0,24
R^2	0,92	0,94	0,92	0,95	0,97
ϵ_5 (µm/m)	212	239	300	220	225
ϵ_6 (µm/m)	122	152	200	133	130
ϵ_7 (µm/m)	70	97	134	80	75

CONCLUSÕES

O estudo experimental apresentado neste trabalho diz respeito à avaliação da influência de ASIC na resistência à fadiga de dois tipos de misturas betuminosas AC 20 base 35/50: mistura betuminosa a quente (AC1) e mistura betuminosa temperada (AC2). Foram estudadas várias taxas de incorporação de ASIC (na fração 0/16): 0%, 20% e 35% para a mistura AC1 (AC1_0, AC1_20 e AC1_35, respectivamente); 0% e 20% para a mistura betuminosa AC2 (AC2_0 e AC2_20, respectivamente). A resistência à fadiga foi avaliada em ensaios de flexão em quatro pontos segundo o Anexo D da norma EN 12697-24 (CEN, 2004a). Previamente, foram ainda realizados ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade segundo a norma EN 12697-26 (CEN, 2004b). Todos os ensaios foram realizados à temperatura de 20°C.

Com base nos resultados dos ensaios realizados e comparando o comportamento evidenciado pelas misturas betuminosas com ASIC com as correspondentes misturas betuminosas de referência, as principais conclusões deste artigo são:

- Relativamente ao módulo de deformabilidade, constatou-se que o ASIC apenas influenciou a mistura betuminosa temperada pois observou-se uma ligeira diminuição dos valores do módulo de deformabilidade para todas as frequências estudadas. Para a frequência de 10 Hz, o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa com 20 % de ASIC diminuiu aproximadamente 24 %. No caso da mistura betuminosa a quente, a influência do ASIC não é tão evidente, pois observou-se alguma heterogeneidade de comportamento mesmo em função da frequência. Para a frequência de 10 Hz, o módulo de deformabilidade registou um aumento de 110 % para a mistura betuminosa com 20% de ASIC mas praticamente não variou para a mistura betuminosa com 35% de ASIC.
- Em relação à resistência à fadiga, a presença do ASIC influenciou de forma mais clara a mistura betuminosa a quente. Para as composições estudadas, o aumento da resistência à fadiga foi sempre observado com o aumento da taxa de incorporação de ASIC. Para a extensão de um milhão de ciclos (ϵ_6), foram observados incrementos de aproximadamente 125% e 164 % para 20 % e 35 % de taxa de incorporação de ASIC, respectivamente. No caso da mistura betuminosa temperada, o comportamento praticamente não foi alterado.

As conclusões apresentadas são gerais e baseiam-se num número restrito de ensaios realizados em apenas dois tipos de misturas betuminosas. No entanto, as tendências observadas são motivadores para se continuar este tipo de estudos num contexto mais alargado de composições de misturas betuminosas e de condições de ensaio.

Para além da resistência à fadiga, poderão ser contemplados outros ensaios de laboratório de avaliação do desempenho das misturas betuminosas, como é o caso da resistência à deformação permanente. Tendo em conta as propriedades químicas do ASIC, também se considera muito importante estudar o comportamento deste tipo de materiais durante o seu ciclo de vida onde o estudo do envelhecimento é importante. Num contexto ainda mais avançado, os estudos devem ser enquadrados em trechos experimentais. Uma melhor compreensão da influência do ASIC no ciclo de vida das misturas betuminosas será naturalmente conseguida quando envolver, também, o estudo dos materiais aplicados em camadas estruturais de pavimentos, em condições reais de tráfego, clima e de construção.

REFERÊNCIAS

- CEN (2004a). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2004b). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- Freire, A., Antunes, M. L., e Picado Santos, L. (2006). Characterization of bituminous mixtures for numerical modeling of permanent deformations. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, vol. 7, n.1, pp 87-102.
- Gomes Correia, A., Reis Ferreira, S. M., Roque, A. J. and Cavalheiro, A. (2009). Processed Portuguese steel slag — A new geomaterial. *Proceedings of the Eight International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields*, Illinois, USA.
- Martinho, F. C. G., Capitão, S. e Picado Santos, L. (2012). Sustainable pavements: warm asphalt mixtures made with recycled aggregates from different industrial by-products. *Proceedings of the Fourth European Pavement and Asset Management Conference*, Malmo, Sweden.
- Neves, J., Marques, P. e Antunes, A. (2011). Novos materiais no desenvolvimento e sustentabilidade da construção de pavimentos de infraestruturas de transporte. O caso da valorização de escórias de aciaria em misturas betuminosas. 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 3º Congresso de Engenharia de Moçambique, Maputo, Moçambique.
- Neves, J., Antunes, A. e Marques, P. (2012). Um estudo da incorporação em misturas betuminosas de agregado siderúrgico inerte para a construção. XVI CILA Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil.