

LIGANTES DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A FERROVIA DO FUTURO

Teresa Carvalho¹; Vicente Pérez Mena²; María González González³; María del Mar Colás Victoria⁴; Fernando Moreno Navarro⁵; M^a del Carmen Rubio Gámez⁶; Miguel del Sol Sánchez⁷; Esther Tomás Fortún⁸

¹CepSA, Portugal, Av. Columbano Bordalo Pinheiro n^o 108 - 3^o, 1070-067 Lisboa, Portugal, teresa.carvalho@cepsa.com <http://www.cepsa.pt>

²CepSA, Espanha; Ctra. de Daganzo km 5.5, 28806 Alcalá de Henares, Madrid, Espanha
vicente.perez@cepsa.com <http://www.cepsa.com>

³CepSA, Espanha; Ctra. de Daganzo km 5.5, 28806 Alcalá de Henares, Madrid, Espanha
maria.gonzalezg@cepsa.com <http://www.cepsa.com>

⁴CepSA, Espanha; Ctra. de Daganzo km 5.5, 28806 Alcalá de Henares, Madrid, Espanha
marimar.colas@cepsa.com <http://www.cepsa.com>

⁵Universidade de Granada, Av. Severo Ochoa s/n, 18071 Granada, Espanha
fmoreno@ugr.es <http://www.ugr.es>

⁶Universidade de Granada, Av. Severo Ochoa s/n, 18071 Granada, Espanha
mcrubio@ugr.es, <http://www.ugr.es>

⁷Universidade de Granada, Av. Severo Ochoa s/n, 18071 Granada, Espanha
msol@ugr.es <http://www.ugr.es>

⁸Ciesm-Intevia, C. San Severo, 20, 28042 Madrid, Espanha
esther.tomas@ciesm-intevia.es <http://www.ciesm-intevia.com>

Sumário

Este artigo tem como objetivo apresentar os resultados de um projeto de investigação designado por HP-RAIL. O mesmo foi realizado através da colaboração entre a CEPESA, CIESM-Intevia e a Universidade de Granada e o seu enfoque residiu no desenvolvimento de ligantes e misturas betuminosas de elevado desempenho para aplicação no sub-balastro da ferrovia. A validação destes materiais foi efetuada através de ensaios de laboratório inovadores, e especialmente desenvolvidos para o efeito, tendo sido comprovado que estes materiais garantem uma melhoria efetiva, em termos de resistência e durabilidade, quando comparados com os materiais utilizados tradicionalmente no sub-balastro da ferrovia. Os resultados demonstraram que estes ligantes, de elevado desempenho, conduzem não apenas a uma maior vida útil do sub-balastro como também apresentam um comportamento melhorado aquando submetidos às solicitações de carga.

Palavras-chave: camadas betuminosas; betume de elevado desempenho; desempenho estrutural; ensaios laboratoriais inovadores; resistência à fadiga.

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário desempenha um importante papel na mobilidade sustentável, onde a velocidade e a capacidade de carga são fundamentais na atração dos passageiros para este modo de transporte. No entanto, estes fatores podem conduzir a um aumento das cargas dinâmicas que, em conjunto com o aumento dos requisitos de segurança e conforto, obrigam a infraestruturas mais resistentes, que consigam suportar as solicitações da carga em causa e resistam à degradação acelerada provocada pelas mesmas. Neste sentido, a inclusão de misturas

betuminosas é concebida para responder à necessidade de aumento da capacidade de carga e aos requisitos geométricos (Teixeira et al., 2009; Rose et al., 2011). Em particular, a utilização de misturas betuminosas no sub-balastro permitirá aumentar a resistência da subestrutura, reduzir os assentamentos e a tensão na fundação e diminuir a permeabilidade (Sol-Sánchez et al., 2016; Yu et al., 2019). Adicionalmente, existem outras vantagens técnicas, tal como a redução das acelerações de pico na camada de balastro (Asphalt Institute, 1998; Fang et al., 2011; Khairallah et al., 2019).

A utilização de materiais tecnicamente mais evoluídos, como sejam betumes modificados com polímeros, pode afigurar-se interessante, uma vez que estes ligantes apresentam um potencial de melhoria a nível do desempenho mecânico e durabilidade da camada de sub-balastro em mistura betuminosa (Asgharzadeh et al., 2018). Similarmente, a utilização de misturas betuminosas de alto módulo (MBAM) pode constituir-se como uma solução efetiva em resposta à necessidade de aumento da capacidade de carga da subestrutura, ao mesmo tempo que conduz a uma melhoria do seu comportamento mecânico (Yu et al., 2019), aliás como já demonstrado no setor rodoviário. No entanto, os elevados custos económicos e ambientais associados a estas soluções betuminosas exigem a comprovação dos seus benefícios em diversas condições, de modo a justificarem a sua aplicação generalizada, nomeadamente no caso das MBAM, cuja maior rigidez pode ser considerada como um ponto negativo associado à fissuração em determinadas circunstâncias (Yu et al., 2020).

Assim sendo, o desenvolvimento de novos materiais e a formulação de misturas betuminosas para aplicação no sub-balastro da ferrovia requerem uma análise cuidadosa e criteriosa relativa ao seu comportamento sob as diversas condições em serviço, uma vez que a durabilidade é um fator chave para o sub-balastro betuminoso, devido à complexidade que pressupõe a sua manutenção e reparação. Nesse sentido, são relevantes as variações na resistência do apoio dessa camada, que podem ser frequentes e significativas devido ao facto de as linhas férreas atravessarem diversas formações geológicas. Alguns parâmetros chave, como a capacidade de carga e a taxa de assentamento dos terrenos subjacentes, podem influenciar o desempenho mecânico e a durabilidade das misturas, exigindo, portanto, análise cuidada.

No entanto, a maioria dos ensaios de laboratório tem-se focado na avaliação das propriedades e na resposta mecânica do sub-balastro betuminoso como um material isolado (Sol-Sánchez et al., 2015), considerando de forma limitada as condições ou estado dos restantes componentes. Neste contexto, o presente artigo concentra-se em avaliar o desempenho mecânico e a durabilidade de três misturas betuminosas diferentes, sob várias condições de apoio, avaliando também a interação entre o sub-balastro betuminoso e o respetivo apoio. Para tal, foi utilizado um dispositivo laboratorial inovador de forma a reproduzir diferentes condições de resistência e de assentamento do apoio dos provetes de mistura betuminosa, submetidos a cargas de tráfego simuladas em laboratório.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

Neste trabalho avalia-se o desempenho de três misturas betuminosas com formulações idênticas, mas utilizando três tipos de betumes distintos. Todas as misturas correspondem a um betão betuminoso, denso e com um tamanho máximo de agregado de 22 mm.

As misturas foram fabricadas com 5,5% de betume, em relação ao peso total da mistura, mas utilizando, tal como referido, três ligantes diferentes: (i) um betume tradicional (designado neste artigo como B) que apresenta um valor de penetração a variar entre 50-70 dmm e uma temperatura de amolecimento entre 46-54 °C, de acordo com as normas EN 1426:2015 e EN 1427:2015 respetivamente; (ii) um betume modificado híbrido incorporando borracha e polímeros designado como MB1, apresentando uma penetração a variar entre 45-80 dmm e com uma temperatura de amolecimento com cerca de 65 °C; (iii) um terceiro betume designado MB2, que corresponde a um betume duro modificado com polímeros SBS e que apresenta um valor de penetração a variar entre 10-40 dmm e uma temperatura de amolecimento de cerca de 70 °C.

Estes ligantes foram selecionados de forma a testar: um que constitui a referência (B), e que é utilizado usualmente neste tipo de misturas para aplicação em sub-balastro (Teixeira et al., 2009; Rose et al., 2011); outro, designado por MB1, que permite avaliar o impacto da utilização de um betume modificado (com penetração semelhante ao betume de referência), constituindo uma alternativa aos ligantes tradicionais; e ainda um terceiro, MB2, utilizado para avaliar o efeito de um betume duro que permita obter um elevado módulo de rigidez na mistura e que seja

também um betume modificado com polímeros, uma vez que com este se consegue obter desempenhos mecânicos melhorados para este tipo de misturas (Akisetty et al., 2009; Sol-Sánchez et al., 2020). As características das misturas, consideradas apropriadas para sub-balastro, são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Principais propriedades físicas e mecânicas das misturas betuminosas com diversos betumes

Propriedades	Norma	Unidade	B	MB1	MB2
Bariedade aparente	EN 12697-6	Mg/m ³	2,40	2,41	2,38
Conteúdo de vazios	EN 12697-8	%	4,2	3,2	4,7
Resistência à tração indireta (seco)	EN 12697-23	kPa	2014,2	3200,9	3659,7
Relação de resistência à tração indireta	EN 12697-12	%	85,1	90,2	91,8
Módulo de rigidez a 20°C	EN 12697-26 (C)	MPa	6896,6	9699,3	14284,2

2.2 Plano de ensaios e respetivos métodos

Este plano de ensaios é focado na avaliação do desempenho mecânico e durabilidade dos três tipos de misturas sob diversas condições, simulando (através de um equipamento de laboratório inovador) diversos estados do apoio, com diferentes capacidades de carga e assentamentos.

Na Figura 1 é mostrado o aspeto visual do equipamento utilizado, composto por três pares de apoios sobre os quais o provete é fixado. Cada apoio consiste numa barra metálica colocada em cima de duas molas, podendo a distância entre os apoios extremos e o central ser modificada, permitindo assim reproduzir diferentes condições de resistência nos apoios, simulando vários níveis de resistência na plataforma da ferrovia.

Adicionalmente, o apoio central é controlado por um atuador elétrico que permite reproduzir diferentes taxas de assentamento através da ação do atuador que controla o deslocamento de forma a fazer variar a velocidade de assentamento, e que depende do nível de carga recebido (de acordo com a tensão transmitida pelo provete). Além disso, o equipamento inclui dois LVDT fixados na parte inferior deste, para controlar as deformações elásticas e plásticas devidas às cargas de tráfego aplicadas sobre os provetes de ensaio.

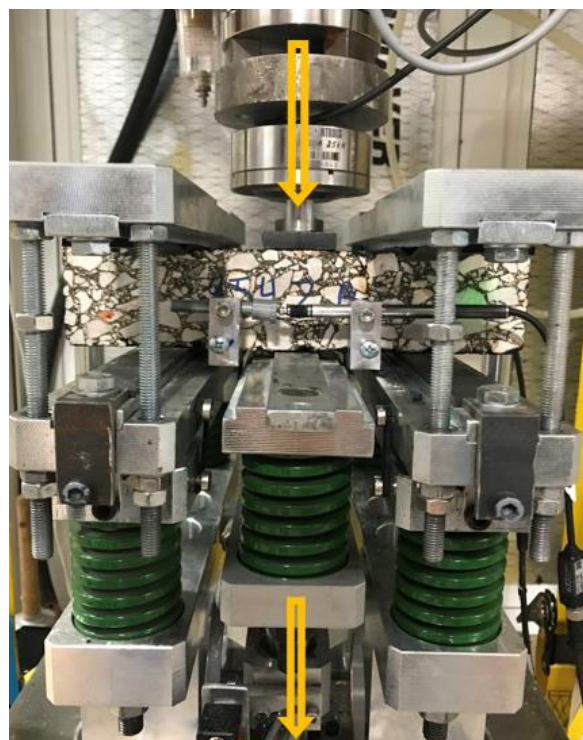


Figura 1. Aspeto visual do equipamento de laboratório utilizado nos ensaios

Neste estudo foram simuladas três condições nos apoios, permitindo reproduzir no apoio central uma deflexão vertical de 0,25 mm (D1), 0,5 mm (D2) e 1,25 mm (D3), sob uma carga dinâmica com amplitude de 1,5 kN. Este nível de carga foi aplicado através de um segundo atuador vertical colocado no topo do equipamento de forma a simular as cargas do tráfego e reproduzir, na área central do provete (entre os apoios), uma tensão de cerca de 250 kPa. Este nível de tensão foi calculado considerando uma área com comprimento de cerca de 10 cm (obtido por 2,5 cm da largura do apoio central e duas metades da distância média entre apoios – 7,5 cm) e largura de 6 cm, considerando que os provetes (em mistura betuminosa) utilizados neste estudo tinham 25 cm de comprimento, 6 cm de largura e 6 cm de altura.

As três condições de deflexão vertical (D1, D2 e D3), simulando diferentes níveis de capacidade de carga do apoio da mistura betuminosa, foram consideradas adequadas, de acordo com medições de campo previamente efetuadas deste parâmetro, em secções compostas por camadas granulares e em mistura betuminosa (Tonkin and Taylor, 1998). O nível de tensão no provete (250 kPa) correspondeu ao expectável para a camada de sub-balastro de uma via-férrea, de acordo com experiências anteriores (Rose, 2011). A frequência de carga foi fixada em 5 Hz (de acordo com o expectável quando se considera a distância entre bogies e velocidade entre 200 a 300 km/h) (Fu et al., 2020), e o processo de fadiga foi conduzido até à rotura do provete, sendo esta detetada ao aumentar drasticamente os deslocamentos horizontais, medidos (pelos dois LVDT) na parte inferior provete.

Para reproduzir o assentamento diferencial da via, estão listados no Quadro 2 três leis de velocidade de assentamento vertical para o apoio central, dependendo do nível de tensão transmitida pelos provetes. Cada lei de assentamento foi associada a distinta condição de apoio.

De facto, o primeiro caso (L1, com a menor taxa de assentamento) correspondeu ao caso com uma deflexão vertical (D1) de 0,25 mm, o segundo (L2) foi utilizado em combinação com D2 (deflexão de 0,5 mm) e L3 (que apresenta o valor mais elevado de velocidade de deslocamento) corresponde ao caso com 1,25 mm (D3). Estas combinações visavam obter um apoio resistente (no caso de L1 e D1) reproduzindo uma plataforma de boa qualidade com elevada capacidade de carga e menor tendência a assentamentos que as demais (sendo a combinação L3-D3 a mais desfavorável).

Quadro 2. Leis de deslocamento vertical no apoio central para simular estados de assentamento do solo, dependendo do nível de tensão transmitido pelo provete

Nível máximo de tensão (kPa)	Velocidade de assentamento (mm/ciclo)		
	L1	L2	L3
25	4,0E-06	7,0E-06	3,5E-05
50	1,0E-05	2,0E-05	1,0E-04
75	1,6E-05	5,0E-05	1,8E-04
100	2,2E-05	8,0E-05	2,5E-04
125	2,8E-05	1,1E-04	3,3E-04
150	3,4E-05	1,4E-04	4,0E-04
175	4,0E-05	1,7E-04	4,8E-04
200	4,6E-05	2,0E-04	5,5E-04

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os valores médios de tensão transmitida por cada tipo de mistura (com os diferentes ligantes) ao apoio central, quando este é submetido à tensão de 250 kPa, dependendo de cada condição do apoio. Os resultados demonstram a importância da capacidade de carga das misturas betuminosas, permitindo reduções consideráveis na tensão transmitida à base quando utilizando materiais mais rígidos. Isto pode conduzir a uma maior durabilidade da subestrutura, sendo esta acentuada quando se utiliza o MB2, devido ao incremento da rigidez associado à combinação de polímeros e betume duro, resultando em misturas betuminosas com módulos mais elevados (Quadro 1).

Os resultados também demonstram a relevância da capacidade de carga dos apoios, uma vez que foram registadas diferenças consideráveis na dissipação de tensões para as diferentes condições de ensaio, sendo que para todas elas são apresentados valores de tensão menores quando se utilizaram os ligantes modificados (MB1 e MB2).

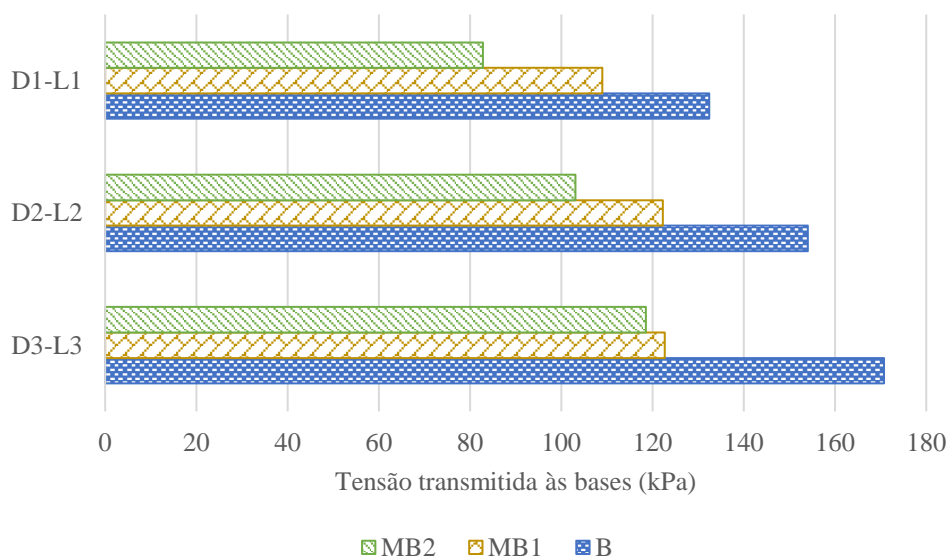


Figura 2. Valores médios de tensão transmitida por cada mistura betuminosa sob diversas condições do apoio

O aumento na capacidade de carga associado à maior rigidez do material é também visível na Figura 3, que representa os valores médios da deflexão horizontal na parte inferior do provete durante os primeiros 1000 ciclos de carga do ensaio de fadiga. Os resultados comprovam a importância da capacidade de carga da base para o sub-balastro betuminoso devido ao aumento das deflexões horizontais ao utilizar solos mais moles sob o sub-balastro, onde as propriedades da camada betuminosa mostraram ter um papel fundamental.

De facto, para essas condições do apoio (D3-L3 reproduzindo um solo mole), o betume modificado mostrou ter mais benefícios, pelo facto de reduzir a deflexão do material (devido a uma capacidade de carga maior) em comparação com um betume tradicional. Por isso, estes ligantes não aumentam apenas a resistência da subestrutura, eles reduzem também a suscetibilidade à qualidade da base (resistência). Este facto foi mais notório no caso em que se utilizou um betume modificado duro, permitindo um importante aumento na resistência da subestrutura da via e, por conseguinte, de acordo com estudos anteriores (Sol-Sánchez et al., 2016), a redução da necessidade de manutenção associada ao assentamento.

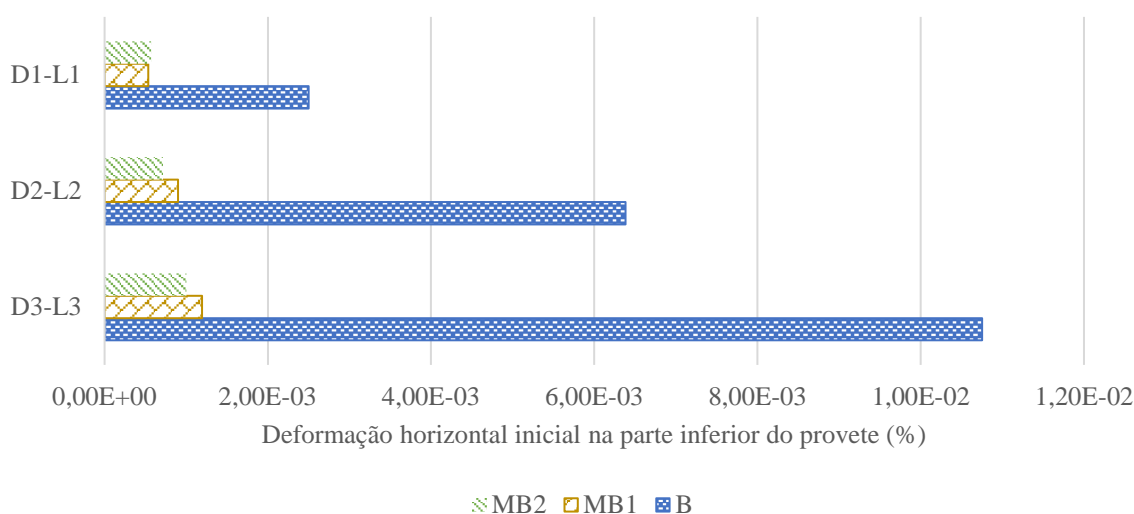


Figura 3. Valores médios da deflexão horizontal inicial para cada mistura, dependendo do apoio

Além do mais, tendo em conta os resultados da Figura 4 (exibindo os valores médios do número total de ciclos até à rotura dos materiais, dependendo da condição de ensaio), confirma-se que a condição do apoio desempenha um papel importante no comportamento do sub-balastro betuminoso, demonstrando que, independentemente do tipo de mistura, a utilização de uma boa plataforma pode aumentar exponencialmente a durabilidade do sub-balastro betuminoso (até 68 vezes, de acordo com este ensaio).

Os resultados indicam também que misturas com maior capacidade de carga apresentam maior durabilidade. Não obstante, e em contraste com resultados anteriores, materiais mais rígidos (como misturas betuminosas utilizando betumes modificados) apresentam melhores resultados quando aplicados sobre plataformas de boa qualidade. Neste caso, a resistência à fadiga é aumentada até 10 e 25 vezes em relação à referência, utilizando um betume tradicional (para MB1 e MB2, respetivamente), enquanto que o referido aumento foi mais limitado em condições desfavoráveis (D3-L3), onde os aumentos foram de cerca de 3 e 6 vezes.

Este facto, em conjunto com os resultados da Figura 3, podem indicar que as propriedades das misturas betuminosas são muito relevantes na capacidade de carga da via quando se utiliza subestruturas moles (quanto maior for a rigidez do material, maior será o aumento da resistência da via) mas limitando os benefícios associados à durabilidade quando se combina solos moles com velocidades de assentamento maiores (o que é expectável que aconteça neste tipo de subestruturas). No entanto, ao utilizar materiais mais rígidos sobre apoios resistentes, os benefícios dos ligantes modificados com polímeros destacam-se, uma vez que a melhoria na capacidade de carga se mantém (embora reduzindo o nível de aumento), ao mesmo tempo em que se obtém um aumento maior na durabilidade do material. Isso pode estar relacionado com a menor velocidade de assentamento esperada neste tipo

de base, acentuada com níveis de tensão menores transmitidos pelas misturas mais rígidas (levando a uma menor taxa de assentamento relativamente ao que acontece quando se utiliza um betume tradicional).

Portanto, os resultados denotam a relevância de considerar as propriedades mecânicas do apoio para as camadas betuminosas, a fim de comprovar os benefícios do uso de materiais inovadores, uma vez que o seu desempenho e durabilidade variam consideravelmente em função de parâmetros-chave como sejam a capacidade de carga da base e a taxa de assentamento. Assim, os seus benefícios no aumento da vida e resistência do material dependem das condições do solo.

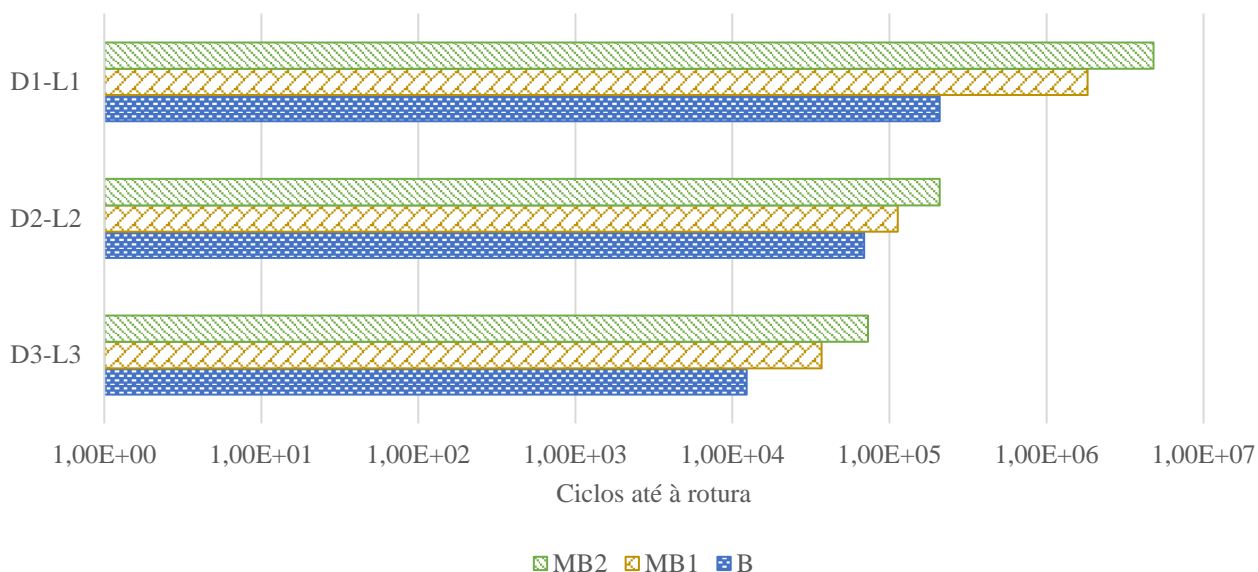


Figura 4. Número de ciclos até à rotura do provete sob carga de tráfego simulada em diferentes condições do apoio

Por outro lado, para analisar a capacidade de deformação dos materiais antes da rotura, a Figura 5 apresenta os valores médios da deformação horizontal na parte inferior dos provetes. Os resultados indicam que este parâmetro é um fator chave no desempenho e durabilidade dos materiais betuminosos, pois permite avaliar a capacidade de adaptação de cada mistura à deformação da subestrutura sem rotura (o que poderia levar à aceleração da degradação da estrutura).

Os resultados mostram que os ligantes modificados conduzem a um aumento considerável na deformação final da mistura antes da rotura, nas condições mais favoráveis (D1-L1), o que pode estar associado ao uso de ligantes modificados com polímeros aliado a uma taxa de assentamento menor, obtida ao usar esses materiais mais rígidos (reduzindo o nível de tensão transmitido aos apoios). Além disso, verificou-se que essas misturas apresentam valores de deformação comparáveis aos das misturas utilizando betume tradicional, quando aplicadas sobre apoios moles, onde poderia ser esperado o colapso prematuro dos materiais mais rígidos. Assim sendo, os resultados podem indicar que a utilização de polímeros para modificar o betume permite aumentar não só a rigidez do material, mas também a capacidade de este se deformar antes da rotura.

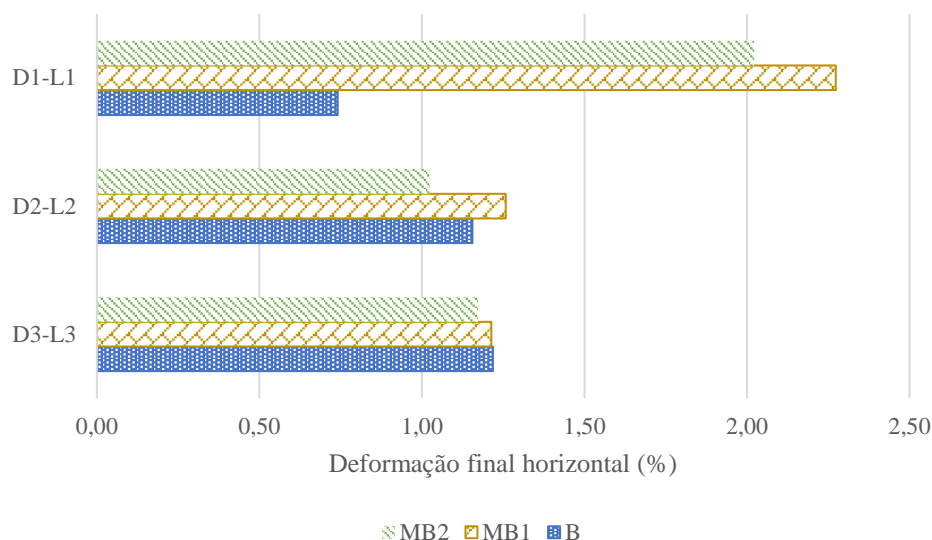


Figura 5. Valores médios da deformação horizontal final na parte inferior do provete após o ensaio sob diferentes condições

Este facto pode ser confirmado na Figura 6, onde estão representados os valores médios de ductilidade do material, calculados como o produto da deformação horizontal acumulada pela carga total aplicada através da multiplicação do número total de ciclos e o nível de carga de cada ciclo. Os resultados demonstram que as condições do apoio têm importância relevante no tipo de rotura do material, obtendo-se uma rotura mais dúctil quando se utilizam apoios resistentes. Esse facto foi acentuado quando se utilizou um betume modificado, onde a incorporação de polímeros conduziu a um material mais dúctil, permitindo maior durabilidade das misturas, principalmente quando aplicadas sobre uma base de boa qualidade.

Por conseguinte, os resultados denotam a importância de avaliar o desempenho das misturas em diversas condições de serviço esperadas para um sub-balastro betuminoso, permitindo entender os benefícios potenciais da utilização de materiais e ligantes inovadores e identificar a aplicação ideal dos mesmos.

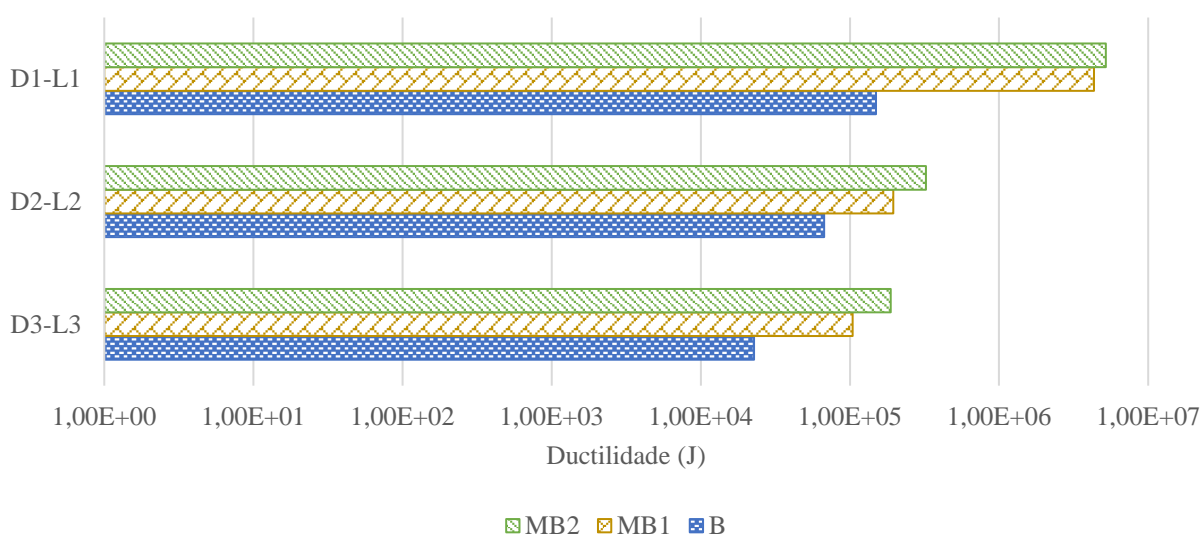


Figura 6. Resultados da ductilidade do material dependendo do tipo de betume e condições de ensaio

4 CONCLUSÕES

Este trabalho tem como foco avaliar o desempenho de uma mistura betuminosa fabricada com três betumes diferentes, desenvolvidos para aplicação em vias ferroviárias, testados através de um equipamento laboratorial inovador, capaz de reproduzir diversas condições de resistência e assentamento do apoio para os provetes de mistura betuminosa. Isso permitiu reproduzir o esperado para as camadas de base em vias ferroviárias, avaliando a influência do tipo de ligante sob diversas condições de ensaio. Dos resultados, podem tirar-se as seguintes conclusões:

- A utilização de ligantes de elevado desempenho permitiu reduzir as tensões transmitidas à base, o que poderia permitir uma maior durabilidade da subestrutura. Este facto foi acentuado no caso da utilização de um betume duro modificado com polímeros.
- O betume modificado apresentou um benefício maior para reduzir a deflexão do material em solos moles. Isso significa que esses ligantes avançados podem, não apenas, aumentar a resistência da subestrutura, mas também reduzir a sua suscetibilidade à qualidade da base (resistência).
- As misturas utilizando o betume de elevado desempenho apresentaram maior durabilidade do material, aumentando a sua resistência à fadiga, em cerca de 10 e 25 vezes relativamente ao sub-balastro betuminoso utilizando um betume tradicional (para MB1 e MB2, respetivamente) quando aplicado em bases de boa qualidade, enquanto que aumentos desta ordem de grandeza foram mais limitados em condições desfavoráveis.
- Esta melhoria significativa na utilização de um ligante modificado em apoios rígidos pode estar associada à menor velocidade de assentamento esperada neste tipo de bases, acentuada pelos menores níveis de tensão transmitidos pelas misturas mais rígidas (levando a uma menor taxa de assentamento do que as apresentadas quando se utiliza um betume tradicional).
- Os ligantes modificados levaram a um aumento considerável na deformação final da mistura antes da rotura, proporcionando assim um comportamento mais dúctil, principalmente quando estas misturas são aplicadas sobre uma base de boa qualidade.
- Conclui-se também que o betume de elevado desempenho permitiu, não só, aumentar a rigidez do material, mas também a durabilidade da mistura e a capacidade de esta se deformar antes da rotura, devido a um comportamento mais dúctil.

5 AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi realizado no âmbito do projeto HP-RAIL (Tecnologias inteligentes e materiais de elevado desempenho para a próxima geração ferroviária, RTC-2017-6510-4), financiado pelo Ministério da Ciência, Inovação e Universidade de Espanha e o Ministério da Economia e Competitividade de Espanha.

6 REFERÊNCIAS

- Akisetty, CK., Lee, SJ., Amirkhanian, SN., 2009. *High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives*. Constr Build Mater 23:565-573
- Asgharzadeh, S., Sadeghi, J., Peivast, P., Pedram, M., 2018. *Fatigue properties of crumb rubber asphalt mixtures used in railways*. Constr Build Mater 184:248-257
- Asphalt Institute, 1998. *HMA Trackbeds–Hot Mix Asphalt for Quality Railroad and Transit Trackbeds*, Informational Series 137, 10 p.
- Fang M., Rose J.G., West R.C., Qiu, Y., 2011. *Comparative analysis on dynamic behavior of two HMA railway substructures*. J Transp Res Board; 19(1):26–34; doi: 10.3969/j.issn.2095-087X.2011.01.005.
- Fu, Q., Chen, X., Cai, D., Lou, L., 2020 *Mechanical Characteristics and Failure Mode of Asphalt Concrete for Ballastless Track Substructure Based on In Situ Tests*. Appl. Sci 10:3457
- Khairallah ,D., Blanc, J., Couttineau, L., Hornych, P., et al., 2019. *Monitoring of railway structures of the high speed line BPL with bituminous and granular sublayers*. Constr Build Mater 211:337-348.
- Rose, J., 2011. *Design, Evaluation, and Performance of Asphalt Trackbeds – U.S. Experience*, International Seminar on Optimization of Railway Design using Bituminous Sub-Ballast. BITU-RAIL. Lisboa, Portugal
- Rose, J.G., Teixeira, P.F., Veit P., 2011. *International Design Practices, Applications, and Performances of Asphalt /Bituminous Railway Trackbeds*. GEORAIL, Paris, France.

- Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Hidalgo, M.E.; Pérez, V.; Rubio-Gámez M.C., 2020. *Laboratory study on asphalt mixtures for application in port pavements*. Construction and Building Materials, 235, 117513
- Sol-Sánchez M., Pirozzolo L., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M.C., 2016. *A study into the mechanical performance of different configurations for the railway track section: A laboratory approach*. Engineering Structures, Volume 119, 15 July 2016, pp. 13-23
- Sol-Sánchez M., Pirozzolo L., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M.C., 2015. *Advanced characterisation of bituminous sub-ballast for its application in railway tracks: The influence of temperature*. Construction and Building Materials, 101, pp. 338–346.
- Teixeira P.F., Ferreira P.A., López Pita A., Casas C., Bachiller A., 2009. *The use of bituminous sub-ballast on future high-speed lines in Spain: Structural design and economical impact*. IJR International Journal of Railway, 2, 1-7.
- Tonkin & Taylor Ltd. 1998. *Pavement deflection measurement and interpretation for the design and rehabilitation treatments*. Transfund New Zealand Research Report No. 117. 70pp.
- UNE-EN 12697-12, 2009. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 12697-23, 2018. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 12697-26, Annex C, 2009. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 12697-6, 2012. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 12697-8, 2003. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 1426, 2015. *Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 1427, 2015. *Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method*. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Yu, Z., Connolly, DP., Woodwar, PK., Laghrouche, O., 2019. *Settlement behaviour of hybrid asphalt-ballast railway tracks*. Constr Build Mater 208:808-817
- Yu, C., Wang, H., Xu, S., You, Z., 2020. *High modulus asphalt concrete: a state-of-the-art review*. Construction and Building Materials, 237, 117653.