

# LIGANTE ALTAMENTE MODIFICADO ESPECÍFICO PARA INSTALAÇÕES PORTUÁRIAS

Vicente Pérez Mena<sup>1</sup>, María González González<sup>1</sup>, Antonio García Siller<sup>1</sup> e Teresa Carvalho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEPSA Comercial Petróleo, Departamento Técnico de Asfaltos, Ctra. de Daganzo km 5.5, 28806 Alcalá de Henares, Madrid, España,

<sup>2</sup>Cepsa Portuguesa, Departamento Técnico Asfaltos, Avenida Columbano Bordalo Pinheiro 108 – 3º, 1070-067 Lisboa, Portugal

email: [teresa.carvalho@cepsa.com](mailto:teresa.carvalho@cepsa.com); <http://www.cepsa.pt>

---

## Sumário

**As autoridades portuárias enfrentam, atualmente, dois desafios importantes: i) reduzir os tempos dos trabalhos de reparação dos pavimentos, para minimizar os custos associados à paragem de atividades portuárias durante as operações de reabilitação; ii) flexibilizar a utilização das superfícies pavimentadas ao longo do tempo. Neste contexto, torna-se necessário desenvolver soluções económicas com um comportamento ótimo e que, para além de tudo, permitam a reciclagem. É por isso que as misturas betuminosas apresentam um grande potencial. Neste trabalho, apresentamos um betume altamente modificado, formulado especificamente para satisfazer os requisitos das instalações portuárias.**

---

**Palavras-chave:** betume modificado, portos, polímero, MSCRT.

## 1 INTRODUÇÃO

O importante crescimento no intercâmbio de mercadorias, a nível global, tem levado as autoridades portuárias a apostar na modernização das suas instalações e impulsionar o crescimento de terminais de contentores como estratégia de captação de tráfego. Atualmente, as autoridades portuárias enfrentam dois desafios associados às alterações nas estratégias de exploração das instalações portuárias: minimizar os tempos requeridos para as operações de manutenção/reabilitação e melhorar a flexibilidade das instalações para que as superfícies pavimentadas possam ser destinadas a distintas utilizações ao longo da sua vida útil.

Por outro lado, os pavimentos portuários devem ser capazes de suportar de forma adequada os esforços a que se veem submetidos durante a atividade diária, proporcionando uma superfície segura, cómoda, duradoura e económica. No caso concreto dos terminais para contentores, a função principal das superfícies pavimentadas é receber as cargas, tanto estáticas como dinâmicas e reparti-las sobre a superfície homogeneamente. Estas superfícies são constituídas por camadas relativamente horizontais de distintos materiais devidamente espalhados e compactados [1].

Tradicionalmente, o betão fabricado com fibras metálicas tem sido amplamente utilizado neste tipo de instalações. Trata-se de um material que apresenta uma elevada resistência a cargas estáticas como as originadas pelo armazenamento de contentores em várias alturas, assim como aos esforços tangenciais gerados pela circulação e manobras da maquinaria pesada de manipulação de cargas. No entanto, apresenta uma série de inconvenientes:

- Necessidade de cura durante pelo menos 28 dias, paralisando os trabalhos portuários e incrementando os custos de produção.
- Falha por fissuração ante assentamentos diferenciais produzidos nas camadas subjacentes ao pavimento (muito comuns neste tipo de infraestruturas, uma vez que ao estarem cimentados sobre terrenos “ganhos” ao mar, chegam a sofrer grandes assentamentos).
- Menor versatilidade ante a diversificação dos terminais e da logística associada.

Estas desvantagens que apresentam os pavimentos de betão conduziram a que as autoridades portuárias e empresas de logística marítima dirigissem a sua atenção para explorar a possibilidade de utilização de outros materiais para a construção/reabilitação dos seus pavimentos. Neste sentido, a utilização de misturas betuminosas (amplamente utilizadas noutros tipos de pavimentos como nos das estradas) começa a colocar-se como uma alternativa competitiva ao betão, devido às seguintes vantagens:

- Ao serem pavimentos flexíveis têm uma melhor resposta ante assentamentos diferenciais das camadas subjacentes e como tal uma menor fissuração.
- As operações de manutenção e reforço de pavimentos betuminosos requerem muito menos tempo de execução (inferior a 24 horas) graças à sua facilidade de colocação em obra, o que se repercute numa diminuição importante dos custos gerados pelas paragens de produção.
- Maior versatilidade dos pavimentos betuminosos face a alterações operacionais nas instalações portuárias e adaptação a variações de cargas diferentes às previstas em projeto.

Nos últimos anos, começou-se a substituir o pavimento de betão por pavimentos asfálticos executados com misturas betuminosas formuladas especificamente para resistir às solicitações e a esforços transmitidos pelos veículos, maquinaria e equipamentos de trabalho próprios do tráfego de contentores em diferentes portos europeus (Holanda, Alemanha, França, Espanha) [2,3]. Neste sentido, a formulação dos materiais betuminosos utilizados deve ter em conta que os requisitos técnicos dos pavimentos portuários são diferentes dos tradicionais de pavimentos de estradas estabelecidos nas especificações técnicas tradicionais. Assim, na definição das especificações para as misturas betuminosas tradicionais não se considerou que o efeito das temperaturas elevadas é maior a baixas velocidades de tráfego e a cargas elevadas, pelo que a utilização de betumes duros para aumentar a rigidez dos pavimentos pode ter uma repercussão negativa na resistência à fadiga, o que pode ser contraproducente em relação aos tráfegos portuários.

Para formular com sucesso novos materiais betuminosos, que para além de resistirem às tensões transmitidas pelos veículos de elevada carga circulando a baixas velocidades, sejam capazes também de resistir às fortes pressões de contacto (tanto de impacto dinâmico como de punção estático), elevadas tensões de corte devido à torção brusca da maquinaria pesada, o ataque de substâncias agressivas muito presentes nas zonas de estacionamento dos portos (como os combustíveis ou os lubrificantes), e as fissuras que possam aparecer por assentamentos diferenciais nas caixas de suporte sobre as quais se cimenta o pavimento, propõe-se um ligante de elevado desempenho, com um comportamento elástico adequado.

## **2 REQUISITOS DO BETUME PARA INSTALAÇÕES PORTUÁRIAS**

A maior parte dos ligantes betuminosos atuais foram desenvolvidos sob critérios de formulação com base nas exigências relacionadas com os pavimentos de estradas. Assim, não existem materiais que tenham sido especialmente desenvolvidos para suportar as solicitações requeridas pelos pavimentos portuários. Neste sentido, a minimização do impacto causado pelas tarefas de reabilitação e manutenção destas infraestruturas, assume uma grande importância no desenvolvimento de materiais especialmente adaptados a elas.

Tendo em conta os requisitos técnicos dos pavimentos portuários, foi definido um conjunto de especificações para o ligante que considera os seguintes parâmetros como críticos:

- Penetração máxima de 25 dmm a 25 °C, segundo a EN 1426.
- Temperatura de amolecimento maior ou igual a 90 °C. Este valor garante uma rigidez adequada.
- Recuperação elástica pelo ensaio MSCRT (Multiple Stress Creep and Recovery Test) realizado a 3,2 kPa e 65 °C maior ou igual a 55% e com valores de conformidade de fluência não recuperável (Jnr) de acordo com os requeridos para betumes modificados na curva de resposta elástica mostrada na norma AASHTO TP-70. Desta forma assegura-se que o ligante tem um comportamento elástico adequado que permita suportar cargas pontuais elevadas.

Adicionalmente, incluiu-se nos critérios de formulação aspetos comuns aos betumes modificados com polímeros definidos na Norma EN 14023, como a coesão, estabilidade ao armazenamento e envelhecimento. Os valores definidos como especificação para o betume modificado para instalações portuárias é mostrado no Quadro 1.

Quadro 1. Especificações definidas para o ligante altamente modificado para instalações portuárias

Característica	Unidades	Norma ensaio	Mín	Máx	Valores reais
<b><i>Ligante original</i></b>					
Penetração (25°C; 100g; 5 s)	dmm	EN 1426	-	25	<b>22</b>
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	90	-	<b>93,4</b>
Coessão a 15°C	J cm <sup>-2</sup>	EN 13589	2	-	<b>5,4</b>
Recuperação elástica (25°C)	%	EN 13398	70	-	<b>80</b>
R <sub>3,2kPa</sub> (MSCRT a 65 °C)	%	EN 16659	55	-	<b>71,9</b>
J <sub>nr3,2kPa</sub> (MSCRT a 65 °C)	kPa <sup>-1</sup>	EN 16659		0,1	<b>0,05</b>
Estabilidade a armazenamento					
Varição na Temperatura de amolecimento	°C	EN 13399 EN 1426	-	5	<b>1,1</b>
Varição na penetração	dmm	EN 13399 EN 1427	-	9	<b>1</b>
<b><i>Ligante envelhecido (RTFOT)</i></b>					
Varição de massa	%	EN 12607-1	-	0,8	<b>0,25</b>
Penetração retida	%	EN 12607-1 EN 1426	60	-	<b>68</b>
Varição da temperatura de amolecimento	°C	EN 12607-1 EN 1427	-	+8 (-5 se diminui)	<b>3,9</b>

A principal particularidade do betume para portos é a temperatura de amolecimento, para o que se especifica um valor extraordinariamente elevado (> 90 °C) com a finalidade de garantir uma rigidez adequada. Por outro lado, também se exigem parâmetros de tipo reológico (R<sub>3,2kPa</sub> e J<sub>nr3,2kPa</sub>) que garantam uma elasticidade adequada do material. Na seguinte secção é analisado o comportamento reológico do ligante desenvolvido e é comparado com o de um betume modificado PMB 10/40-70 e com um betume convencional do tipo 15/25, que são as opções atuais mais adequadas para a aplicação considerada.

### 3 REOLOGIA DO BETUME PARA PORTOS

#### 3.1. DSR: Comportamento viscoelástico a temperaturas médias

A análise reológica com o DSR (Dynamic Shear Rheometer) permite caracterizar o comportamento dos ligantes betuminosos frente a um esforço de corte oscilatório. É baseado na aplicação de um esforço e medida a deformação gerada, a qual se expressa sob a forma de duas magnitudes principais:

- A resistência total do ligante à deformação expressa através do módulo complexo (G\*)
- O grau de contribuição a essa resistência das componentes elástica (deformação recuperável) e viscosa (deformação permanente) expressa através do ângulo de fase (δ).

Estes parâmetros estão relacionados com os modos de falha relevantes para os pavimentos betuminosos em instalações portuárias: a formação de rodeiras e fadiga [4,5].

Para uma resistência adequada a rodeiras, os ligantes devem apresentar uma elevada resistência total às deformações (um elevado G\*) e uma componente elástica elevada (valor de δ baixo) desde o momento da sua

aplicação. Por outro lado, a resistência à fadiga depende da capacidade de recuperação do material após a carga cíclica, pelo que um comportamento altamente elástico (valores baixos de  $\delta$ ) favorece a resistência ante este tipo de esforço. Em camadas finas, a fadiga é um fenómeno controlado por deformação e a resistência à fadiga vê-se favorecida por valores de  $G^*$  baixos. Valores baixos de  $G^*$  implicam um menor desenvolvimento de tensões ante a deformação induzida pela carga cíclica e por conseguinte uma recuperação mais fácil do estado tensional inicial.

Na Figura 2 mostram-se as curvas isócronas à frequência de 1.59 Hz obtidas no ensaio de DSR realizado de acordo com a norma EN 14770 para o betume modificado para portos em estado original, depois de RTFOT (Rolling Thin Film Oven), representativo do estado do ligante após o processo de mistura e depois de PAV (Pressure Aging Vessel), representa o estado do ligante após 10-15 anos em serviço. O comportamento observado é o característico dos ligantes betuminosos modificados com polímeros: O módulo complexo apresenta valores elevados a temperaturas moderadas e diminui de forma contínua à medida que aumenta a temperatura. Este comportamento indica que o ligante a temperaturas moderadas é resistente à deformação e à medida que aumenta a temperatura vai perdendo o seu comportamento de sólido para se comportar de uma forma mais viscosa. As curvas obtidas para o ligante original e o envelhecido por RTFOT são muito semelhantes, indicando que o envelhecimento que o ligante sofre durante o processo de mistura é mínimo. Por outro lado, o envelhecimento a longo prazo (simulado através de envelhecimento combinado RTFOT+PAV) produz uma rigidização do material que se manifesta num aumento nos valores de  $G^*$ . No que se refere à elasticidade do ligante, observa-se o comportamento característico do  $\delta$  dos betumes modificados com polímeros: Uma região plana onde o comportamento dominante é o do polímero (que atua como um sólido elástico) e que se traduz numa melhor resistência à fadiga. O envelhecimento do ligante traduz-se num aumento do módulo e numa diminuição do ângulo de fase. Este comportamento reflete a menor capacidade de deformação plástica do material, associada à sua rigidização.

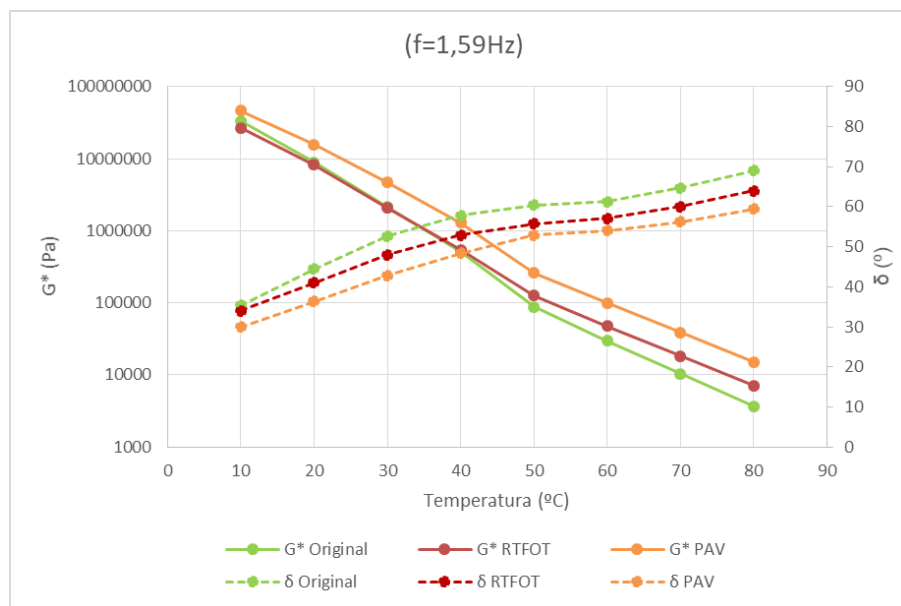


Figura 2. Curvas de DSR do betume para portos original, envelhecido por RTFOT e por RTFOT+PAV

O comportamento do ligante reflete as vantagens que aporta a incorporação de polímeros nos ligantes. O diagrama de Black (figura 3) representa as características viscoelásticas do material independentemente dos efeitos da temperatura e da frequência. Observa-se o comportamento sigmoidal característico dos betumes modificados, que se mantém inclusivamente no betume envelhecido através RTFOT e PAV.

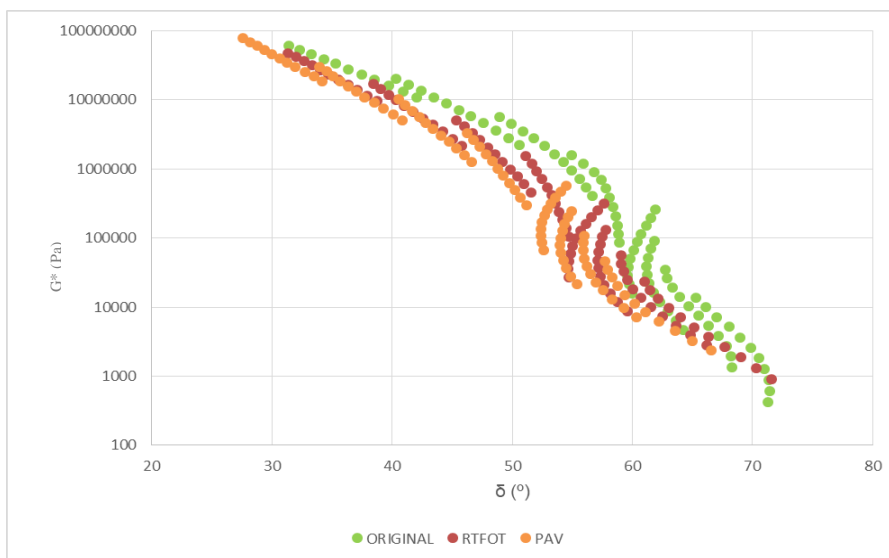


Figura 3. Diagrama de Black ligante original, envelhecido através de RTFOT e através de RTFOT+PAV

Na Figura 4 mostram-se as curvas de DSR de um ligante convencional duro (tipo 15/25), um PMB 10/40-70 e o betume altamente modificado desenvolvido especificamente para aplicações portuárias. No gráfico pode-se observar que os valores de módulo ( $G^*$ ) são muito semelhantes a baixas temperaturas para os três casos. A temperaturas acima dos 40 °C, o betume altamente modificado para portos apresenta valores de módulo próximos aos de um PMB 10/40-70 convencional e acima dos de um betume duro convencional. Destaca-se o facto da curva do ângulo de fase apresentar uma zona plana mais significativa no ligante para portos, indicativo de um alto grau de modificação, e de os valores de  $\delta$  serem menores a temperaturas elevadas, indicando uma maior contribuição da componente elástica. Os resultados obtidos por DSR indicam que o comportamento elástico do betume formulado supõe uma melhoria frente às opções atuais, ainda que a valoração do comportamento elástico se realize de uma forma mais adequada através do ensaio MSCR (Multiple Stress Creep Recovery).

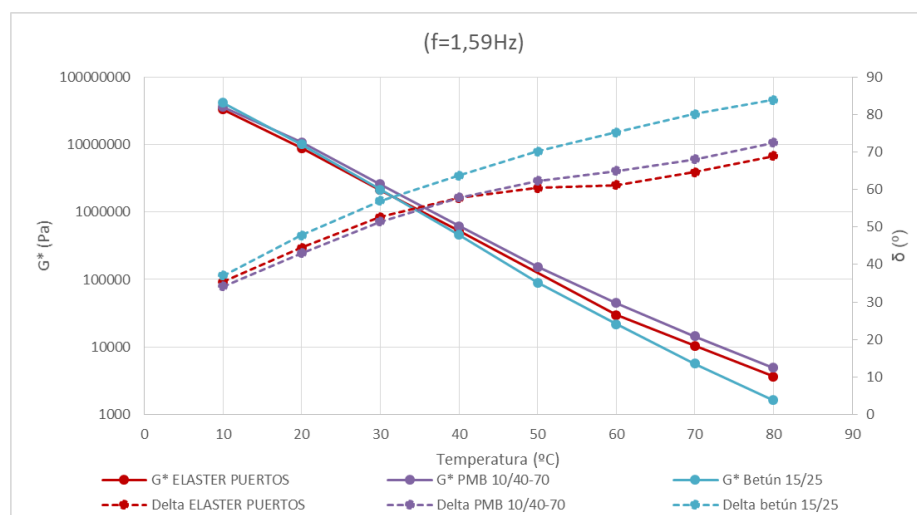


Figura 4: Curvas DSR comparativas do betume para portos, PMB 10/40-70 e betume convencional 15/25  
Ligantes originais (não envelhecidos)

### 3.2. MSCRT: Comportamento elástico a temperaturas elevadas

Devido aos esforços característicos do movimento dos contentores nas instalações portuárias, o ligante betuminoso selecionado para este tipo de pavimentos deve ter um comportamento elástico notável [6]. O MSCRT (Multiple Stress Creep Recovery Test) é um ensaio de fluência que proporciona informação sobre a resposta elástica do ligante. Este ensaio é descrito tanto na normativa americana (AASHTO T350) como na europeia (EN 16659) e consiste em submeter uma amostra de ligante a uma série de ciclos nos quais se alterna a aplicação de uma carga constante durante um determinado tempo, com períodos de relaxamento à carga zero durante os quais se produz a recuperação da parte elástica da deformação (Fig. 5).

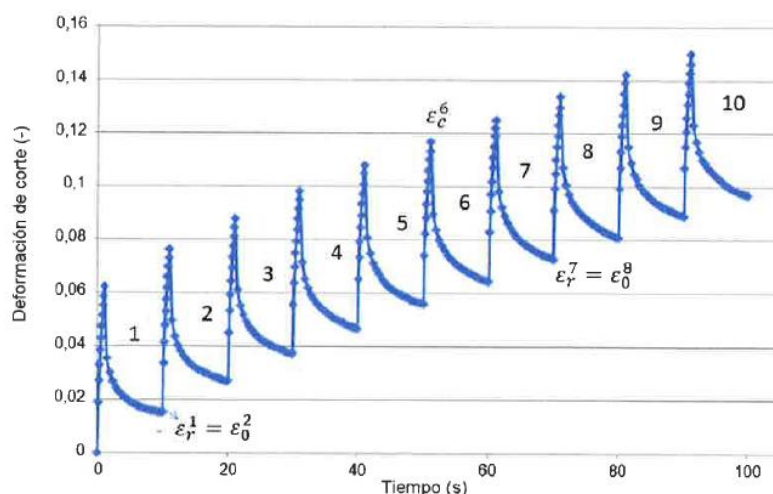


Figura 5. Curva tipo do ensaio de fluência-recuperação (MSCRT) após 10 ciclos

O ensaio consiste numa sequência de dois conjuntos de ciclos: um de acondicionamento a uma carga de 0,1 kPa e um segundo ciclo a 3,2 kPa para a medição. Os tempos de carga e relaxamento são os mesmos em ambos os passos (1 s carga, 9 s relaxamento). Os parâmetros que se determinam no ensaio de MSCR são:

- $J_{nr,3,2\text{ kPa}}$  : Conformidade de fluência não recuperável. É a relação entre a deformação residual após o ensaio e a tensão aplicada (neste caso 3,2kPa).
- $R_{3,2\text{ kPa}}$ : Percentagem de recuperação da deformação.

De acordo com a norma AASHTO T70 que descreve a avaliação do comportamento elástico de ligantes betuminosos através do ensaio MSCR, o ensaio deve ser realizado no ligante envelhecido através do RTFOT a uma temperatura representativa das condições máximas às que possa estar submetido o ligante em condições ambientais. Neste caso, a temperatura definida para o ensaio foi de 65 °C. Os valores obtidos são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Resultados do ensaio MSCR a 65 °C do betume altamente modificado para portos e de um PMB 10/40-70 convencional.

Característica	Unidades	Betume Portos	PMB 10/40-70	Valores AASHTO T70
$J_{nr,3,2\text{ kPa}}$	$\text{kPa}^{-1}$	<b>0,05</b>	0,08	< 0,1
$R_{3,2\text{ kPa}}$	%	<b>71,9</b>	55,8	> 55

O valor de  $J_{nr,3,2\text{ kPa}}$  obtido a 65 °C para o ligante desenvolvido para aplicações portuárias foi de 0,05  $\text{kPa}^{-1}$ . Este valor tão baixo indica que a deformação residual após o ensaio cíclico é pequena, pelo que é espectável um bom comportamento elástico do material. De acordo com a AASHTO T70 [7], para valores de  $J_{nr,3,2\text{ kPa}} < 0,10\text{ kPa}^{-1}$ , a

percentagem de recuperação mínima admissível é 55%. O valor obtido para o ligante desenvolvido é de 71,9 %, indicando que a resposta elástica é muito boa.

A modo de comparação, os valores obtidos no mesmo ensaio para um betume do tipo PMB 10/40-70 a 65 °C são  $J_{nr3,2 \text{ kPa}} = 0,08 \text{ kPa}^{-1}$  y  $R_{3,2 \text{ kPa}} = 55,8 \%$ . A percentagem de recuperação encontra-se muito próxima do limite inferior estabelecido pela AASHTO T70, pelo que as propriedades elásticas do betume desenvolvido especificamente para portos são notavelmente superiores às dos betumes modificados utilizado até agora.

#### 4 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um betume altamente modificado formulado especificamente para satisfazer os requisitos das instalações portuárias, cujas características essenciais são: penetração  $\leq 25 \text{ dmm}$  a 25 °C, temperatura de amolecimento  $\geq 90 \text{ °C}$  e comportamento elástico relevante no ensaio MSCRT. Adicionalmente, este betume cumpre com os requisitos de estabilidade, envelhecimento, etc. dos betumes modificados com polímeros para pavimentação, definidos na norma EN 14023.

O comportamento reológico do betume reflete o elevado grau de modificação e os resultados do ensaio MSCR ( $J_{nr3,2 \text{ kPa}} = 0,05 \text{ kPa}^{-1}$  e  $R_{3,2 \text{ kPa}} = 71,9\%$ ) indicam que o comportamento elástico é superior ao dos betumes utilizados atualmente para este tipo de aplicações.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do Projeto SEAPORT financiado pelo Ministerio de Economía y Competitividad do Governo de Espanha.

#### 6 REFERÊNCIAS

1. A. Vaitkus, J. Grazulyte, R. Kleiziene, Influence of static and impact load on pavement performance, *The 9th International Conference Environmental Engineering*, Article number: enviro.2014.173 May 2014.
2. J. Schrader, A de Bondt, Innovative design and construction of the Euromax Container Terminal Rotterdam, *Bearing capacity of roads, railways and airfields: proceedings of the ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields: Trondheim*, vol 1-2, 2013pp. 369-382, Norway 25-27 June 2013.
3. P. Brunn, , Port structures, wharves, quays, terminals, and mooring devices, *Journal of coastal research*, 46 pp. 139-158, 2005
4. Performance properties for bituminous binders. Eurobitume workshop 99. Luxemburgo, 1999.
5. T.W. Kennedy, Testing and specifying Superpave binders, *Technical workshop on new specifications for bituminous products*, Barcelona 1995
6. F.Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, A. Jimenez del Barco, M.C. Rubio-Gámez, Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures, *International Journal of Pavement Engineering*, 18(1) 73-82, 2017
7. Norma AASHTO T70, Standard Practice for Evaluating the Elastic Behavior of Asphalt Binders Using the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, American Association of state Highway and Transportation Officials,