

# DESENVOLVIMENTO DE ESPECIFICAÇÕES PARA MISTURAS BETUMINOSAS COM BORRACHA RECICLADA DE PNEUS, FABRICADAS POR VIA SEMI-HÚMIDA

Luís Quaresma<sup>1</sup>, Margarida Gonçalves<sup>2</sup>, Filipa Marques<sup>2</sup>, Eugénia Correia<sup>2</sup>, Anabela Martins<sup>2</sup>, Maria Conceição Machado<sup>2</sup>, Hélder Lourenço<sup>2</sup>, Carlos Sousa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Faculdade de Engenharia, Campo Grande, 376, 1749-024 Lisboa, Lisboa, Portugal

email: [p648@ulusofona.pt](mailto:p648@ulusofona.pt)      <https://www.ulusofona.pt/feg>

<sup>2</sup> Infraestruturas de Portugal S.A., Praça da Portagem, 2809-013 Almada, Portugal

---

## Sumário

*As tecnologias de utilização da borracha triturada de pneus reciclados como modificador do betume puro têm sido utilizadas com sucesso há pelo menos 50 anos, em geral com fabrico por via húmida. Novas tecnologias inovadoras foram desenvolvidas para a produção de misturas betuminosas, utilizando um novo material composto por borracha previamente reagida e ativada (RAR) que pode ser usada diretamente na unidade de fabrico da mistura sem necessidade de nenhum equipamento especial.*

*A Infraestruturas de Portugal desenvolveu especificações para utilização de RAR em misturas betuminosas, que foram aplicadas na conservação do pavimento da estrada nacional EN 10, perto de Setúbal.*

---

**Palavras-chave:** Borracha reagida e ativada; Especificações; Desempenho.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, a Infraestruturas de Portugal (IP) tem vindo a promover a utilização de betume modificado com borracha (BB) em misturas betuminosas, o que é contemplado no Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO). O BB é um betume fabricado com a incorporação de granulado de borracha, por via húmida, usando borracha reciclada de pneus usados. Esta utilização tem permitido uma melhoria significativa do comportamento estrutural e funcional das misturas betuminosas comparativamente ao que é obtido com betumes convencionais. Para além disto, apresenta inúmeros benefícios do ponto de vista ambiental que contribuem para o princípio da economia circular.

Contudo têm sido identificados alguns aspetos que limitam a utilização de BB em misturas betuminosas. Para atender a estas limitações, foi desenvolvida uma nova solução de ligantes betuminosos modificados com borracha reagida e ativada (RAR), que pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura betuminosa.

A RAR é composta por um betume convencional, por granulado fino de borracha e por um estabilizador de betume do tipo filler mineral ativo em percentagens devidamente otimizadas, sendo produzida através da mistura a quente dos seus constituintes durante um curto período de tempo e de uma posterior ativação através de um processo especialmente concebido para formar um granulado de borracha seco ativado.

Através de cooperação entre a Infraestruturas de Portugal (IP) e a Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologia (ULHT) foi estabelecido um projeto visando avaliar o desempenho dos materiais com RAR através da sua aplicação experimental em obra rodoviária, nunca testada na rede rodoviária nacional sob jurisdição da IP e estabelecer Clausulas Técnicas para a sua inclusão no Caderno de Encargos Tipo de Obra (CETO).

## 2 UTILIZAÇÃO DE GRANULADO DE BORRACHA POR VIA HÚMIDA

Desde que o pneu radial com utilização de aço e de telas se tornou comum na década de 1970, o processo de reciclagem tornou-se bastante complexo. A reciclagem em larga escala de resíduos de pneus, para obter produtos com aplicação em obras de engenharia civil ocorreu desde o final do século 20, sendo estimulada por um número cada vez maior de pneus usados e por um movimento de consciencialização ambiental mais forte.

Os pneus inteiros podem ser reutilizados em algumas aplicações, mas a maioria dos procedimentos de reciclagem recorre à fragmentação dos pneus usados porque a borracha obtida tem maior viabilidade de aplicação. A Norma NP EN 14243-1 [2020], para materiais produzidos através de um processo mecânico a partir de pneus em fim de vida, especifica as categorias com base nas dimensões dos materiais. Nos produtos corte, *shred* e *chip* os pneus são fragmentados, rasgados ou partidos em pedaços irregularmente formados. O granulado e o pó são obtidos por um processo de granulação.

O granulado de borracha apresenta diversas aplicações, sendo muito importante a modificação de betumes que são incorporados no fabrico de misturas betuminosas utilizadas na construção e na reparação de pavimentos de infraestruturas de transporte. A principal razão para a utilização de betume modificado com borracha em misturas betuminosas deve-se ao facto de este tipo de betume proporcionar uma melhoria significativa do comportamento estrutural e funcional das misturas betuminosas comparativamente ao que é obtido com betumes convencionais. Os betumes modificados com borracha podem ser formulados para serem aplicados em condições climáticas extremas.

Em resultado de investigação realizada em diversos países, muito especialmente nas décadas de 1980 e de 1990, foram desenvolvidas técnicas para a incorporação de granulado de borracha em misturas betuminosas, sendo a mais utilizada a técnica por via húmida. O fabrico pode ser realizado em obra, na central de fabrico de misturas betuminosas (*continuous blend* na terminologia em inglês), ou em refinaria (*terminal blend* na terminologia em inglês). O fabrico das misturas betuminosas recorre a uma mistura prévia do betume e da borracha, a altas temperaturas (160 a 210°C), durante um determinado período de tempo de digestão (45 a 60 minutos), sendo este produto adicionado ao agregado, como é indicado na Figura 1.



Figura 1– Sequência do processo por via húmida (adaptado de [1])

Os estudos realizados a partir do final da década de 1990 levaram à introdução no CETO de misturas betuminosas com betume modificado com borracha, utilizando a via húmida visando, sobretudo, proporcionar uma melhoria significativa do comportamento estrutural e funcional das misturas betuminosas comparativamente ao que é obtido com betumes convencionais, sendo especialmente relevantes a limitação da propagação de fendas e a redução da emissão de ruído.

Apesar das vantagens comprovadas das misturas betuminosas com betumes modificados com borracha, verificou-se uma estagnação na sua utilização, que poderá justificar-se pelas seguintes razões:

- i. O fabrico de BB através do processo de modificação por via húmida envolve a utilização de temperaturas muito elevadas (superiores a 190 °C) e de um tempo de reação com duração significativa (45 minutos até 1 hora);
- ii. O processo de modificação por via húmida obriga à instalação de uma unidade de fabrico do BB, pelo que apresenta maior complexidade do que o fabrico com betumes não modificados;
- iii. Após longos períodos de armazenamento existe a necessidade de reaquecer o BB;
- iv. Uma deficiente perceção da relação custo-desempenho, uma vez que o custo das misturas betuminosas com BB é superior ao das misturas betuminosas com betumes não modificados (superior em 20% a 100%).

Tendo em vista a vantagem comprovada dos betumes modificados com borracha, foi desenvolvida investigação para superar as principais desvantagens acima enumeradas.

### 3 BORRACHA REAGIDA E ATIVADA (RAR)

O granulado de borracha tem uma composição complexa, incluindo borracha natural e borracha sintética que interagem de forma diferente com o betume. Para melhorar a durabilidade e as propriedades mecânicas da borracha para fabrico de pneus, é geralmente realizada uma vulcanização, recorrendo geralmente à adição de enxofre, permitindo a formação de ligações químicas intermoleculares (ligações cruzadas) entre cadeias de polímeros individuais (Figura 2) para criar redes tridimensionais [2].

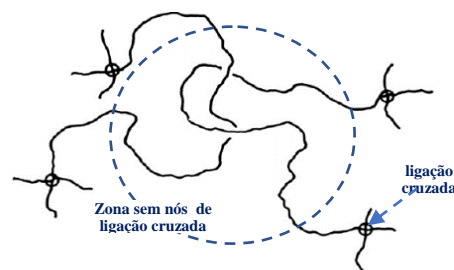


Figura 2 – Formação de rede permanente de ligações cruzadas (adaptado de [2])

Quando o granulado de borracha é misturado com betume a temperaturas elevadas durante um período de tempo significativo, produz-se um ligante modificado que tem propriedades significativamente diferentes do betume original. Esta modificação das propriedades resulta de alterações físicas e mecânicas durante o processo de interação betume-borracha. A borracha de pneus reagida e ativada (industrialmente conhecida como RAR) é composta, como indicado na Figura 4, por um betume puro, por granulado fino de borracha e por um estabilizador do tipo fíler mineral ativo (Activated Mineral Binder Stabilizer - AMBS) em percentagens devidamente otimizadas. A RAR é produzida através da mistura a quente dos seus constituintes durante um curto período de tempo, sendo posteriormente realizada a ativação através de um processo especialmente concebido para formar um granulado de borracha seco ativado. Uma composição típica de RAR corresponde a 62 a 65 % de borracha, 22 % de betume puro e 16 % de AMBS. Após a reação e arrefecimento dos componentes no misturador, é adicionado um suplemento de 10 % de AMBS no misturador para um envolvimento final de cada partícula de RAR, prevenindo fenómenos de coagulação.

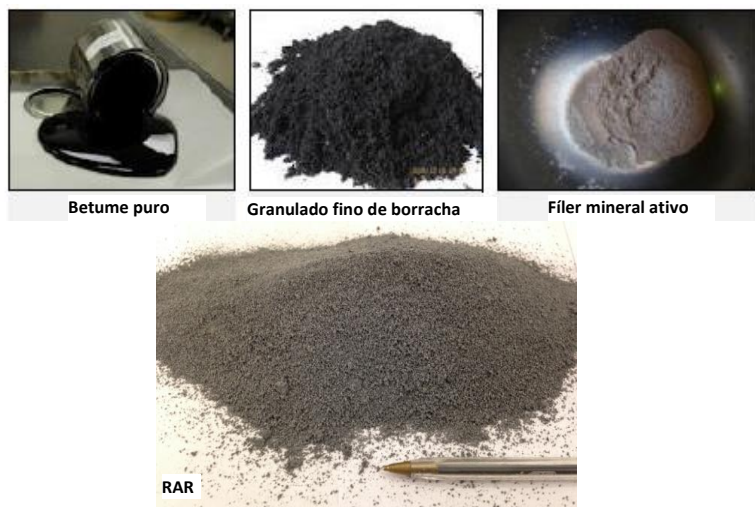


Figura 3 – Materiais constituintes da RAR

As partículas de borracha contêm uma grande quantidade de material inorgânico (fíler, materiais vulcanizados e vários aditivos) que apresentam uma superfície carregada electrostaticamente. O ativador das partículas de borracha, do tipo fíler mineral ativo (AMBS), de sílica, é composto por moléculas orgânicas cuja superfície é parcialmente carregada electrostaticamente contendo uma cadeia orgânica hidrofóbica. Quando as partículas ativadoras são adicionadas a um líquido como o betume, elas são atraídas, interligando-se com outras partículas de carga elétrica oposta [3].

De acordo com as Cláusulas Técnicas Especiais da Infraestruturas de Portugal [4], a borracha a utilizar no fabrico da RAR deve ser obtida a partir da reciclagem de borracha de pneus, 100% vulcanizada. Deve ainda ser respeitado o fuso granulométrico indicado no Quadro 1.

Quadro 1 – Fuso granulométrico da RAR

Dimensão nominal das aberturas dos peneiros (mm) <sup>(a)</sup>	Percentagem acumulada do material passado
2	100
1	95 - 100
0,5	40 - 90
0,25	10 - 50
0,063	0 - 15

(a) - Série de peneiros de abertura quadrada de acordo com NP EN 933-2

## 4 ESPECIFICAÇÕES DA INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL PARA MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE RAR

### 4.1 Âmbito

As Cláusulas Técnicas Especiais (CTE) desenvolvidas pela Infraestruturas de Portugal (IP) [4] visam a execução de camadas em mistura betuminosa a quente com adição de RAR incluindo as misturas indicadas no Quadro 2.

**Quadro 2 – Aplicabilidade das misturas betuminosas com adição de RAR**

Mistura betuminosa	Designação abreviada	Dimensão máxima do agregado (mm)	Camada	Espessura (m)
Macadame betuminoso com adição de RAR	MB 20 RAR	20	Ligação, Base	0,05 a 0,09
Mistura betuminosa SMA com adição de RAR	SMA 11 RAR	11	Desgaste	0,03 a 0,05
Mistura betuminosa SMA de grande descontinuidade com adição de RAR	SMA 14G RAR	14	Desgaste, Ligação	0,04 a 0,07
Mistura betuminosa SMA super descontinua com adição de RAR	SMA 10S RAR	10	Desgaste	0,025 a 0,05
	SMA 8S RAR	8	Desgaste	0,02 a 0,05

### 4.2 Características do ligante

Considera-se ligante a mistura de betume puro com RAR e designa-se percentagem de RAR o quociente, expresso em percentagem, entre o peso de RAR e o peso de ligante. Devem ser avaliadas as propriedades do ligante betuminoso utilizado na fórmula de trabalho de acordo com o indicado no Quadro 3, sendo avaliados em ensaios realizados de acordo com as referências normativas que são especificadas.

**Quadro 3 – Requisitos/propriedades para o ligante betuminoso**

Requisitos/ Propriedades		Referência normativa	Unidade	Valores nominais para percentagem de ligante:			
				18 a 22 %	25 a 30%	30 a 35%	38 a 42%
Consistência à temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25°C	NP EN 1426	0,1 mm	> 30	> 20	> 15	> 10
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	≥ 60	≥ 62	≥ 65	≥ 70
Durabilidade (Resistência ao envelhecimento – RTFOT a 163°C, NP EN 12607-1)	Penetração retida	NP EN 1426	%	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60
	Aumento da temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	Classe 2 ≤ 10	Classe 2 ≤ 10	Classe 2 ≤ 10	Classe 2 ≤ 10
	Redução da temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
	Variação de massa (valor absoluto)	NP EN 12607-1	%	Classe 4 ≤ 0,8	Classe 4 ≤ 0,8	Classe 4 ≤ 0,8	Classe 4 ≤ 0,8
Outros requisitos	Resiliência	ASTM D 5329	%	≥ 30	≥ 35	≥ 45	≥ 50
	Viscosidade dinâmica a 175°C após 5 min (VIS 5 min @ 175°C)	EN 13302	MPa.s	≥ 500	≥ 1300	≥ 3000	≥ 5000
	Viscosidade dinâmica a 175°C após 120 min	EN 13302	MPa.s	>VIS 5 min @ 175°C <1,5 x VIS 5 min @ 175°C			
	Ensaio de fluência e recuperação com múltiplos ciclos de tensão (MSCR)	EN 16659	%	≥ 35	≥ 70	≥ 70	≥ 80
	Média de recuperação a 3,2 kPa	EN ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235
	Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235

### 4.3 Características da mistura betuminosa

Os requisitos das misturas betuminosas do tipo SMA permitem a definição da composição, sendo para o efeito conduzidos estudos pelo método Marshall (EN 12697-30 e EN 12697-34) em associação com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho [4], tal como indicado no Quadro 4 onde são apresentados os requisitos para misturas SMA super-descontínuas.

**Quadro 4 – Requisitos/propriedades para misturas betuminosas SMA super-descontínuas**

Requisitos e propriedades		Ref. normativa	Condições específicas dos ensaios	Unidade	SMA 8S surf RAR	SMA 10S surf RAR
Características Marshall	Estabilidade, máx.	EN12697-34	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	kN	<i>S<sub>max</sub>15</i>	Valor a declarar
	Estabilidade, mín.			kN	<i>S<sub>min</sub>7,5</i>	<i>S<sub>min</sub>8</i>
	Deformação, máx.			mm	F5	F5
	Deformação, mín.			mm	F3	F3
	Quociente Marshall			kN/mm	Valor a declarar	Valor a declarar
Vazios na mistura de agregados (VMA), mín.		EN12697-8	EN 12697-8 - Calculada com base na baridade máxima teórica <sup>(a)</sup> - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade <sup>(b)</sup> determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	<i>VM<sub>Amin</sub>24</i>	<i>VM<sub>Amin</sub>25</i>
Porosidade, V <sub>m</sub>		EN12697-8	EN 12697-8 - Calculada com base na baridade máxima teórica <sup>(b)</sup> - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade <sup>(c)</sup> - determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	<i>V<sub>min</sub>1,5- V<sub>max</sub>3,5</i>	<i>V<sub>min</sub>3,0- V<sub>max</sub>5,5</i>
Percentagem de ligante betuminoso (betume+RAR)		-	-	%	<i>B<sub>min</sub>11,5</i>	<i>B<sub>min</sub>11,0</i>
Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios de compressão Marshall, mín.		MIL-STD-620A	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	%	90	90
Resistência à Deformação Permanente ("Wheel-tracking")	Taxa de deformação máxima, WTS <sub>AIR</sub>	EN12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, temperatura do ensaio a 60°C	mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga	0,08	0,06
	Profundidade de rodeira máxima, PRD <sub>AIR</sub>			%	Valor a declarar	
Percentagem de ligante por ignição		EN12697-39	Determinada para a percentagem ótima de ligante da mistura em estudo (opt) e para mais quatro percentagens de ligante: opt-1%; opt-0,5%; opt+0,5%; opt+1% <sup>(d)</sup>	%	Valor a declarar	
Resistência à fadiga (Número de ciclos, mín.)		EN12697-24	Ensaio com frequência de 10 Hz, temperatura de 20°C e extensão máxima de 500 x 10 <sup>-6</sup> ; o resultado é o valor médio de três provetes	ciclos de carga	1,5 x 10 <sup>6</sup>	1,2 x 10 <sup>6</sup>
Relação ponderal de RAR /ligante betuminoso		-	-	%	38 a 42	38 a 42
Sensibilidade à água, ITR, mín		EN12697-12	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 – 75 pancadas, temperatura do ensaio: 15°C	%	<i>ITSR<sub>90</sub></i>	<i>ITSR<sub>90</sub></i>
Escorrimento de betume, máx		EN 12697-18	Ensaio de Schellenberg em copo de vidro	%	0,3	0,3
<p>(a) - Calculada para a percentagem ótima de ligante da mistura em estudo.</p> <p>(b) - Para a moldagem dos provetes é utilizado o compactador de impacto com 75 pancadas, de acordo com a norma EN 12697-30.</p> <p>(c) - Este valor corresponde à percentagem mínima de betume a utilizar no trecho experimental que servirá para formular a mistura (ver item 15.03.2 do CETO na mistura correspondente).</p> <p>(d) - Para cada percentagem de ligante o valor declarado corresponde ao valor médio de no mínimo três ensaios.</p>						

No Caderno de Encargos são apresentadas as especificações e os critérios de aceitação para as unidades terminadas. Os requisitos relativos ao valor máximo da porosidade de tarolos individuais, no caso das misturas SMA super-descontínuas, é de 6,5 % para misturas do tipo SMA 10S e de 4,5 % para misturas do tipo SMA 8S.

Os valores mínimos de macrotextura superficial a obter em fase de obra são avaliados com o método volumétrico da mancha ou por medições em contínuo. Para camadas de desgaste com misturas SMA super-descontínuas são especificados valores mínimos de MTD de 1,0 mm para misturas do tipo SMA 10S e de 0,7

mm para misturas do tipo SMA 8S e o valor mínimo de MPD é 1,0 mm para misturas do tipo SMA 10S e de 0,63 mm para misturas do tipo SMA 8S.

Os requisitos relativos ao coeficiente de atrito em contínuo, com piso molhado, medido ao longo da rodeira externa de cada uma das vias construídas, sendo a medição efetuada a uma velocidade de 50 km/h recorrendo a equipamentos tipo SCRIM ou tipo GRIP TESTER que deverão ser munidos de sistema de rega automática, de forma a garantir uma película de água com 0,5 mm de espessura sobre a superfície ensaiada. Para as misturas SMA 10S e SMA 8S é especificado um valor mínimo de 0,50 nas medições com SCRIM e de um valor mínimo de 0,60 nas medições com GRIP TESTER.

#### **4.4 Métodos construtivos**

Para a validação de todo o processo produtivo deverá transpor-se a fórmula de estudo aprovada, para a central de fabrico, de modo a verificar a sua capacidade para produzir as misturas betuminosas, no âmbito dos pressupostos do Estudo de Formulação.

Após a validação da capacidade da central, na reprodução da fórmula de estudo, deverá realizar-se um “Trecho Experimental” para a avaliação da metodologia de aplicação e de controlo das misturas fabricadas. De acordo com as conclusões técnicas a retirar dos resultados dos ensaios de controlo de qualidade realizados, relativas à conformidade das misturas e das características de compacidade da camada experimental, fixa-se a fórmula de trabalho a utilizar durante todo o processo produtivo.

No fabrico da mistura betuminosa, deve existir um silo alimentador para a RAR. A RAR requer a colocação doseada e direta na unidade de mistura da central (misturador na central descontínua, tambor secador misturador em central contínua). A introdução da RAR na misturadora deve ocorrer após a introdução do agregado, incluindo fíler, sendo misturados durante um período não inferior a 8 segundos. A colocação do betume será posterior. A temperatura do betume deverá ser 175 a 185°C e a dos agregados deverá ser tal que a mistura betuminosa saia a 180°C ± 2°C considerando que a RAR é colocada à temperatura ambiente. Em caso algum, mesmo durante o fabrico, a temperatura da mistura poderá exceder os 180°C ± 2°C.

O transporte da mistura desde a central de fabrico até à colocação em obra deverá ser feito com recurso a camiões com meios de cobertura de modo a garantirem que a mistura esteja sempre coberta até à descarga na pavimentadora.

O equipamento de espalhamento das misturas betuminosas deverá ser constituído por uma ou mais espalhadoras, de acordo com as necessidades construtivas.

A compactação da mistura betuminosa deverá ser feita imediatamente após o espalhamento dada a muito alta viscosidade do ligante. Serão utilizados cilindros de rasto liso. O Adjudicatário deverá adaptar o número de cilindros atendendo à largura do espalhamento, de forma a cobrir a largura total da pavimentadora. No caso de serem utilizadas duas espalhadoras em paralelo, o número mínimo de cilindros será de quatro unidades. Se a produção de mistura betuminosa exceder as 160 ton por hora, deve existir um compactador estático adicional. Os compactadores devem ter um peso entre 8 e 10 ton.

Os compactadores devem ter propulsão autónoma e devem ser operados com a roda de tração em posição anterior. Todos os compactadores devem estar equipados com pás e sistema de humedecimento para impedir a aderência da mistura betuminosa aos cilindros de compactação.

O primeiro compactador deve ser mantido tão perto da pavimentadora quanto possível, mas não a mais de 10 m desta. Todas as passagens de cilindro serão realizadas sem vibração com exceção da primeira passagem sobre a mistura ainda não compactada em camadas com espessura igual ou inferior a 0,05 m. Deverão ser efetuadas as passagens necessárias, de acordo com o definido em trecho experimental, antes da mistura atingir o valor mínimo especificado naquele estudo.

A temperatura mínima de início de compactação da mistura betuminosa será de 170°C. A compactação deve estar concluída para uma temperatura da mistura não inferior a 150°C.

## 5 APLICAÇÃO DE MISTURA SMA 10S NA BENEFICIAÇÃO DA EN10, ENTRE O KM 48+000 E O KM 52+700

### 5.1 Projeto

O projeto de beneficiação da EN10, entre o km 48+000 e o km 52+700, visou melhorar o desempenho funcional e prolongar o tempo de vida útil do pavimento, adiando a médio prazo a execução de uma ação de conservação corretiva. A EN 10 apresenta uma faixa de rodagem pavimentada de 7,50 m de largura média (2 vias x 3,75 m) e bermas com 2,50 m de largura média pavimentadas, apresentando um traçado homogêneo pouco sinuoso, de baixa inclinação. As valetas são genericamente revestidas não se verificando grandes problemas de drenagem. [5]. O troço está abrangido pela Secção do SGPav E431 que, segundo os dados de tráfego da IP, apresenta um tráfego médio diário anual (TMDA) de 8702 veículos correspondendo cerca de 8,7% ao tráfego pesado (dados de 2018). De acordo com o SGPav o pavimento da EN 10 é constituído por uma camada de macadame hidráulico com 0,18 m, uma camada de mistura betuminosa densa com 0,06 m e uma camada de betão betuminoso com 0,10 m (em duas camadas de 0,05 m).

A inspeção de superfície, com o objetivo de identificar a tipologia das degradações mais frequentes e definir os tipos de intervenção necessários, registou como patologias mais correntes o fendilhamento, com frequência do tipo pele de crocodilo, a segregação, ninhos, peladas, alguns assentamentos e cavados de rodeira de base larga em pequenas extensões e reparações, assim como desníveis nas bermas provocadas por raízes.



Figura 4 – Estado geral do troço da EN10 [5]

A solução definida para a pavimentação em contínuo da faixa de rodagem e bermas contempla trabalhos de microfresagem na profundidade de 0,01 m, na faixa de rodagem. Após a microfresagem é prevista a execução de camada de desgaste com espessura 0,035 m que entre o km 49+600 e o km 52+700 é realizada em AC10 surf PMB 45/80-65 (mBBr) e entre o km 48+000 e o km 49+600 é realizada em mistura SMA 10S com RAR utilizando betume de base 50/70. Para além dos trabalhos definidos nos parágrafos anteriores, após a microfresagem em contínuo do pavimento na espessura determinada prevê-se a execução de reperfilamentos e saneamentos pontuais em zonas de elevada deformação.

### 5.2 Estudo de formulação da mistura betuminosa SMA 10S RAR

Os agregados utilizados na mistura betuminosa são de natureza granítica (granodioritos), provenientes de Pedreira em Montemor-o-Novo, e compreendem duas frações granulométricas, 0/4 mm e 4/10 mm, que, de acordo com o estudo realizado, são misturas com percentagens respetivamente de 13% e de 87%. A curva granulométrica da mistura de agregados é apresentada na Figura 5. Na mesma Figura apresentam-se os resultados da análise granulométrica da RAR. Foi utilizado um betume da classe 50/70 fornecido pela CEPISA. Os resultados de caracterização do ligante betuminoso são apresentados no Quadro 5.

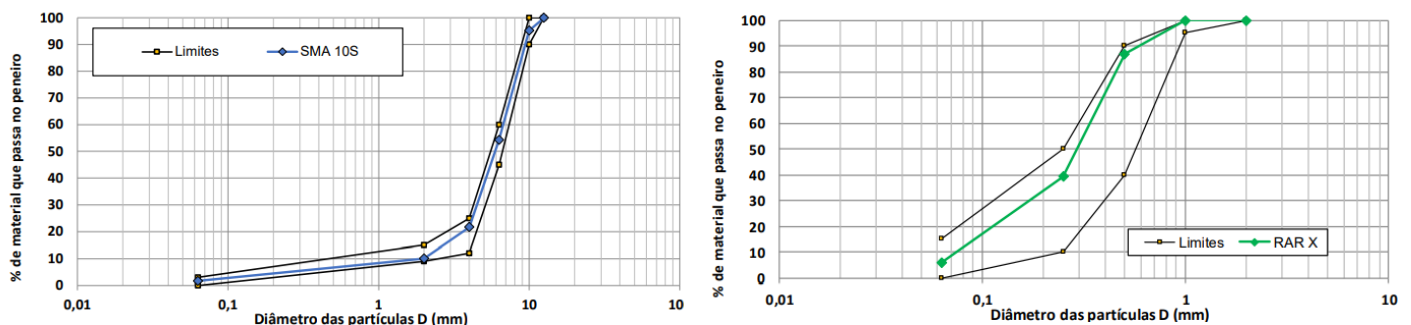
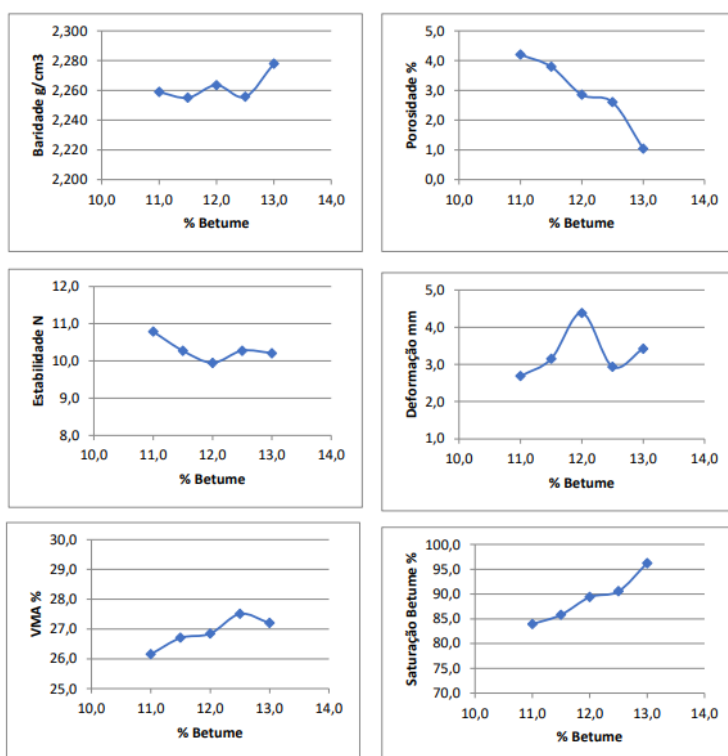


Figura 5 – Limites e curva granulométrica da mistura de agregado e da RAR [6]



**Quadro 5 – Requisitos/propriedades para o ligante betuminoso com relação ponderal de RAR /ligante betuminoso de 40%**

Requisitos/ Propriedades		Referência normativa	Unidade	Valores nominais	Resultados obtidos
Massa volúmica do ligante betuminoso (betume+RAR)	a 25°C	EN 15326	Mg/m <sup>3</sup>	A declarar	1,132
Consistência à temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25°C	NP EN 1426	0,1 mm	> 10	20
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	≥ 70	81
Durabilidade (Resistência ao envelhecimento – RTFOT a 163°C, NP EN 12607-1)	Penetração retida	NP EN 1426	%	≥ 60	80
	Aumento da temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	Classe 2 ≤ 10	5
	Redução da temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	≤ 5	—
	Variação de massa (valor absoluto)	NP EN 12607-1	%	Classe 4 ≤ 0,8	0,1
Outros requisitos	Resiliência	ASTM D 5329	%	≥ 50	58
	Viscosidade dinâmica a 175°C após 5 min (VIS 5 min @ 175°C)	EN 13302	MPa.s	≥ 5000	8600
	Viscosidade dinâmica a 175°C após 120 min	EN 13302	MPa.s	>VIS 5 min @ 175°C <1,5 x VIS 5 min @ 175°C	9400
	MSCR - Média de recuperação a 3,2 kPa	EN 16659	%	≥ 80	80
	Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 235	—



**Figura 6 – Resultados do estudo Marshall [6]**

Uma vez definida a curva granulométrica da mistura, procedeu-se ao estudo Marshall para determinar a percentagem de ligante a incorporar na mistura betuminosa, bem como a relação ponderal de RAR no ligante betuminoso. Para o efeito, fabricaram-se provetes com diversas percentagens de ligante e de RAR, compactados com a aplicação de 75 pancadas em cada face do provete e submetem-se os provetes ao ensaio Marshall. Posteriormente, conduziu-se o estudo Marshall para a mistura SMA 10S com adição de 40% de RAR, com 11%, 11,5%, 12%, 12,5% e 13,0% de betume, com o intuito de aferir a percentagem ótima de betume a incorporar na mistura. Os gráficos resultantes do estudo Marshall são apresentados na Figura 6.

Na análise aos resultados do estudo Marshall, optou-se por 11,5% de ligante betuminoso como percentagem ótima. A baridade dos provetes Marshall entre os 11% e os 12,5% é praticamente idêntica e a porosidade dos provetes, nas percentagens 11% e 11,5%, cumprem os limites do CTE da IP. A seleção de ligante betuminoso deveu-se, em grande parte, à evolução das porosidades nas diferentes percentagens



### 5.3 Avaliação do desempenho da mistura betuminosa SMA 10S RAR

Foi realizado o ensaio de determinação de Índice de Resistência Conservada (IRC) - ensaios de compressão Marshall MIL-STD- 620A. O resultado obtido foi de 94,1%. A sensibilidade à água foi avaliada de acordo com o método A, baseado em ensaios de tração indireta (por compressão diametral) de provetes cilíndricos, previstos na norma europeia EN 12697-12. Este método assenta na determinação da resistência conservada em ensaio de tração indireta (ITSR). Este ensaio foi realizado tendo-se obtido o resultado de 100%.

A avaliação do desempenho relativo à deformação permanente foi realizada por ensaio de pista realizado em lajetas produzidas em laboratório e compactadas com recurso a um compactador. Os ensaios de deformação permanente foram realizados segundo o procedimento B ao ar, preconizado na norma EN 12697-22, tendo as lajetas sido acondicionadas durante 4 horas à temperatura de 60°C e posteriormente sujeitas a 10.000 ciclos de carga. Na Figura 7 apresentam-se os resultados obtidos.

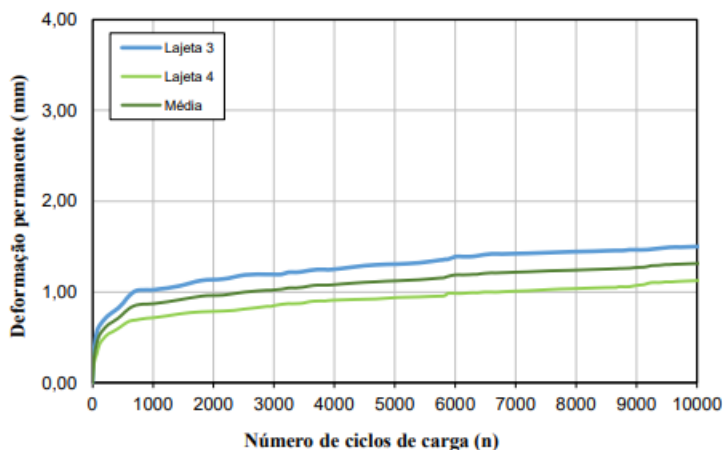


Figura 7 – Resultado do ensaio de deformação permanente [6]

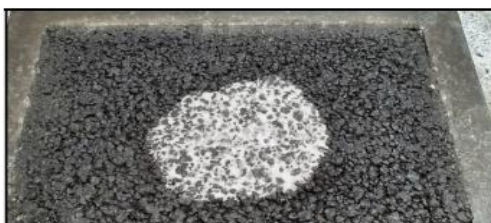


Figura 8 – Provette para ensaio de mancha de areia

Realizou-se a avaliação da macrotextura pela técnica volumétrica da mancha de areia – medição da profundidade média de textura da superfície (MTD – Mean Texture Depth), nas três lajes compactadas em laboratório para os ensaios de pista e de determinação da vida à fadiga, obtendo-se um valor médio de MTD de 1,06 mm.

### 5.4 Processo construtivo

O fabrico da mistura foi realizado numa central de produção do tipo contínuo, da marca ERMONT modelo RM-160, com capacidade de produção máxima de 160 ton/h, instalada em Alcácer do Sal. A RAR foi colocada em silo alimentador e introduzida na secção final do tambor misturador. Para aumentar o tempo de mistura da RAR foi reduzida a capacidade de produção na ordem dos 40%.



Figura 9 – Central de fabrico da mistura betuminosa



Figura 10 – Espalhamento e compactação

O espalhamento da mistura betuminosa foi realizado por uma pavimentadora da marca VÖGELE SPRAY-JET, modelo SUPER 1800-3i, com mesa flutuante de extensão hidráulica, capaz de repartir uniformemente sem a produção de segregação. A pavimentadora é provida de um sistema automático de nivelamento progressivo, constituído por sensores e por um pêndulo. A compactação da mistura betuminosa foi iniciada imediatamente após o espalhamento a uma temperatura de cerca de 170°C. Foi utilizado um cilindro de rasto liso do

tipo HAMM HD 110. Todas as passagens de cilindro foram realizadas sem vibração com exceção da primeira passagem. A compactação foi concluída para uma temperatura da mistura de cerca de 130°C.



Figura 11 - Aspeto superficial após compactação

Após compactação foi obtida uma superfície com boa qualidade com textura semelhante à que tinha sido obtida em laboratório aquando da realização do estudo de formulação.

Num local foram colocados elementos de separação antes da colocação da camada de desgaste para permitir facilitar a remoção de pequenas lajes para a execução de ensaios de avaliação da resistência á fadiga através de ensaios de laboratório.

## 6 CONCLUSÕES

No presente artigo apresentaram-se as especificações técnicas promovidas pela Infraestruturas de Portugal relativas a misturas betuminosas do SMA em que o ligante betuminoso é constituído por uma mistura de um betume do tipo 50/70 com granulado de borracha obtido a partir de pneus usados reagida e ativada (industrialmente conhecida como RAR).

Foram apresentadas as características previstas nas especificações para o produto RAR, para o ligante betuminoso e para as misturas betuminosas, sendo destacadas as exigências relativas ao desempenho da mistura.

Apresentou-se a aplicação experimental numa empreitada de beneficiação do pavimento de um trecho da EN10 perto de Setúbal. A avaliação da experiência realizada permitiu avaliar a adequação das especificações a introduzir em Caderno de Encargos da Infraestruturas de Portugal.

## 7 REFERÊNCIAS

1. J. Epps, *Uses of recycled rubber tires in highways*, National Academic Press, Washington, EUA, 1994.
2. J. Mark, B. Erman, F. Eirich, *Science and technology of rubber*, 4ª edição, Academic Press, 2013.
3. J. B. Sousa, A. Vorobiev, R. Sousa, *Extensor elastómero do betume – A nova fronteira das misturas betuminosas com ligantes betuminosos modificados com borracha*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, abril de 2013.
4. Infraestruturas de Portugal, *Misturas betuminosas com adição de RAR. Cláusulas técnicas especiais*, Protocolo de Cooperação entre Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias e Infraestruturas de Portugal, S.A, novembro de 2020.
5. Infraestruturas de Portugal, *EN10, KM 48+000 e km 52+700. Beneficiação. IPV 2021. Projeto de Execução. Memória descritiva e justificativa*, Direção da Rede Rodoviária, 2021.
6. F. Silva, J.B. Sousa, *Estudo de Formulação de Mistura Betuminosa SMA 10S RAR*, Estudo efetuado a pedido de JJR, março de 2022.

## 8 AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar o seu agradecimento à empresa JJR, responsável pela execução dos trabalhos de beneficiação, que muito contribuiu para a prossecução do trabalho.

Desejam ainda expressar o seu agradecimento ao técnico da Infraestruturas de Portugal Paulo Valentim que com a sua participação na formulação dos materiais, na verificação das condições de execução e na caracterização de materiais aplicados, muito contribuiu para o sucesso e para a qualidade do trabalho realizado.