



DESENVOLVIMENTO DE ESPECIFICAÇÕES PARA MISTURAS BETUMINOSAS COM BORRACHA DE PNEUS RECICLADOS REAGIDA E ATIVADA.

Lúis Quaresma¹, Carlos Sousa², João Maçãs³, Anabela Martins⁴, Margarida Gonçalves⁵, Hélder Lourenço⁶,
Paulo Valentim⁷, Maria Conceição Machado⁸, Patrícia Salvador⁹, Rosa Mendes¹⁰, Filipe Gameiro¹¹

¹ Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, Portugal, p648@ulusofona.pt

² Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, carlos.sousa@infraestruturasdeportugal.pt

³ Construções J.J.R. & Filhos, S.A., Sta. Catarina da Serra, Portugal, joaomacas@jjr.pt

⁴ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, anabela.martins@infraestruturasdeportugal.pt

⁵ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, margarida.goncalves@infraestruturasdeportugal.pt

⁶ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, helder.lourenco@infraestruturasdeportugal.pt

⁷ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, paulo.valentim@infraestruturasdeportugal.pt

⁸ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, conceicao.machado@infraestruturasdeportugal.pt

⁹ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, patricia.salvador@infraestruturasdeportugal.pt

¹⁰ Construções J.J.R. & Filhos, S.A., Sta. Catarina da Serra, Portugal, rosa@jjr.pt

¹¹ Construções J.J.R. & Filhos, S.A., Sta. Catarina da Serra, Portugal, filipegameiro@jjr.pt

Resumo

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. Foram desenvolvidas tecnologias inovadoras para a produção de misturas betuminosas, utilizando um novo material composto por borracha previamente reagida e ativada (RAR) que pode ser usado diretamente na unidade de fabrico da mistura, sem necessidade de nenhum equipamento especial.

A Infraestruturas de Portugal (IP) desenvolveu especificações para utilização de RAR em misturas betuminosas, em conjunto com a Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologia (ULHT), que foram aplicadas na conservação do pavimento da estrada nacional EN 10, perto de Setúbal, estando a obra a cargo das Construções J.J.R. & Filhos, S.A (JJR). O trabalho realizado em conjunto pela IP, pela ULHT e pela JJR contribuiu para avaliar a adequação das especificações a introduzir em Caderno de Encargos da IP. A execução de beneficiação do restante troço (cerca 2400 metros) com misturas betuminosas do tipo AC10 surf sem recorrer à adição de RAR permite uma avaliação comparativa do desempenho de ambas as camadas superficiais.

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 granulado de borracha proveniente da reciclagem de pneus usados para modificação do betume modificado a utilizar em misturas betuminosas, contemplado no Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO). 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, a tecnologia utilizada para incorporação de granulado de borracha por via húmida,

apresentou algumas exigências construtivas que conduziram à necessidade de introduzir soluções alternativas, sendo uma delas a borracha de pneus reagida e ativada (industrialmente conhecida como RAR).

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 e de uma posterior ativação através de um processo especialmente concebido para formar um granulado de borracha seco ativado.

Através de cooperação entre a IP e a Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias (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 Modificação de betumes pela utilização de granulado de borracha proveniente de pneus usados

Em resultado de investigação realizada em diversos países, 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 inglesa), ou em refinaria (*terminal blend*, na terminologia inglesa). 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 digestão (45 a 60 minutos), após o qual o produto é adicionado ao agregado, como 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, especialmente no que concerne a limitação da propagação de fendas e a redução da emissão de ruído, face às misturas tradicionais. 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:

- 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 a 1 hora), que se revela de difícil implementação em ambiente produtivo e com riscos no capítulo de controlo de qualidade e de desempenho da mistura betuminosa;
- 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, conduzindo a um aumento do custo da instalação;
- Após longos períodos de armazenamento existe a necessidade de reaquecer o BB;
- 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%) mas apresenta também uma previsível maior durabilidade, devido à acrescida flexibilidade e resistência ao envelhecimento, o que acarreta vantagens acrescidas quando aplicada em camadas de desgaste.

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

A borracha de pneus reagida e ativada (industrialmente conhecida como RAR) é composta por um betume puro, por granulado fino de borracha e por um estabilizador do tipo filler 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, 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. O ativador das partículas de borracha, do tipo filler 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 [2].

De acordo com as Cláusulas Técnicas Especiais da Infraestruturas de Portugal [3], 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 na Tabela 1.



Figura 2. Aspeto geral da RAR

Tabela 1. Fuso granulométrico da RAR

Dimensão nominal das aberturas dos peneiros (mm) ^(a)	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

3 Especificações da Infraestruturas de Portugal para misturas betuminosas com adição de RAR

3.1 Âmbito

Sendo conhecidas as potenciais vantagens do uso e aplicação de misturas betuminosas com adição de RAR e, tendo por base amassaduras experimentais resultado de formulações teóricas provenientes de análise extensa do Estado da Arte, foram, então, desenvolvidas Cláusulas Técnicas Especiais (CTE) pela Infraestruturas de Portugal (IP) [3], com vista à aplicação e à execução de camadas em mistura betuminosa a quente com adição de RAR incluindo as misturas indicadas na Tabela 2.

Tabela 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-descontínua com adição de RAR	SMA 10S RAR	10	Desgaste	0,025 a 0,05
	SMA 8S RAR	8	Desgaste	0,02 a 0,05

3.2 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 na Tabela 3, sendo avaliadas em ensaios realizados de acordo com as referências normativas que são especificadas.

Tabela 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) Média de recuperação a 3,2 kPa	EN 16659	%	≥ 35	≥ 70	≥ 70	≥ 80
	Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235

3.3 Características da mistura betuminosa

Os requisitos das misturas betuminosas do tipo SMA permitem a definição da composição, pelo que, para o efeito, são conduzidos estudos pelo método Marshall (EN 12697-30 e EN 12697-34) em associação com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho [3], tal como indicado na Tabela 4, onde figuram os requisitos para misturas SMA super-descontínuas.

No Caderno de Encargos são apresentadas as especificações e os critérios de aceitação para as unidades terminadas. Dada a classificação como misturas SMA, serão também utilizadas estas misturas como termo comparativo para análise qualitativa dos resultados obtidos, sendo, portanto, premente definir os limites de aceitação. 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 recurso ao método volumétrico da mancha de areia 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. No que concerne ao valor

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

Tabela 4. Requisitos/propriedades para misturas betuminosas SMA super-descontínuas

Requisitos e propriedades		Referência 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	S_{max15}	Valor a declarar
	Estabilidade, mín.			kN	$S_{min7,5}$	S_{min8}
	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 ^(a) - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(b) determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	VM_{Amin24}	VM_{Amin25}
Porosidade, Vm		EN12697-8	EN 12697-8 - Calculada com base na - baridade máxima teórica (a) - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade (b) - determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	$V_{min1,5}-V_{max3,5}$	$V_{min3,0}-V_{max5,5}$
Percentagem de ligante betuminoso (betume+RAR)		-	-	%	$B_{min11,5}$	$B_{min11,0}$
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_{AIR}	EN12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, temperatura do ensaio a 60°C	mm/10 ³ ciclos de carga	0,08	0,07
	Profundidade de rodadura máxima, PRD_{AIR}			%	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% ^(d)	%	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 ⁻⁶ ; o resultado é o valor médio de três provetes	ciclos de carga	1,5 x 10 ⁶	1,2 x 10 ⁶
Relação ponderal de RAR /ligante betuminoso		-	-	%	38 a 42	38 a 42
Sensibilidade à água, ITSR, mín		EN12697-12	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 – 75 pancadas, temperatura do ensaio: 15°C	%	$ITSR_{90}$	$ITSR_{90}$
Escorrimento de betume, máx		EN 12697-18	Ensaio de Schellenberg em copo de vidro	%	0,3	0,3

(a) - Calculada para a percentagem ótima de ligante da mistura em estudo.

(b) - Para a moldagem dos provetes é utilizado o compactador de impacto com 75 pancadas, de acordo com a norma EN 12697-30.

(c) - Este valor corresponde à menor percentagem de ligante betuminoso a utilizar no fabrico da mistura betuminosa - a considerar para ponto de partida do ensaio Marshall - a partir da qual serão fabricadas mais 4 misturas betuminosas, com cinco percentagens de ligante betuminoso, com incrementos sucessivos de 0,5 % de betume

(d) - Para cada percentagem de ligante o valor declarado corresponde ao valor médio de no mínimo três ensaios.

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

Relativamente aos requisitos referentes ao processo construtivo, estes serão abordados no caso de estudo.

4 Caso de Estudo: Aplicação de mistura SMA 10S na beneficiação da EN10, entre o km 48+000 e o km 52+700

4.1 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 homogéneo pouco sinuoso, de baixa inclinação. As valetas são genericamente revestidas, não se verificando grandes problemas de drenagem [4]. Segundo os dados de tráfego da IP, apresenta um tráfego médio diário anual (TMDA) de 8702 veículos correspondendo cerca de 8,7% a 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).



Figura 4. Estado geral do troço da EN10 [4],[5]

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, cavados de rodeira de base larga em pequenas extensões e reparações, assim como desníveis nas bermas provocadas por raízes.

A solução definida para a pavimentação em contínuo da faixa de rodagem e bermas contemplou trabalhos de microfresagem na profundidade de 0,01 m, na faixa de rodagem. Após a microfresagem foi prevista a execução de camada de desgaste com espessura 0,035 m, que, entre o km 49+600 e o km 52+700, foi realizada em AC10 surf PMB 45/80-65 (mBBr) e, entre o km 48+000 e o km 49+600, 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, previu-se a execução de reperfilamentos e saneamentos pontuais em zonas de elevada deformação.

4.2 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, cuja percentagem, de acordo com o estudo realizado, é de 13% e de 87%, respetivamente. 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 na Tabela 5.

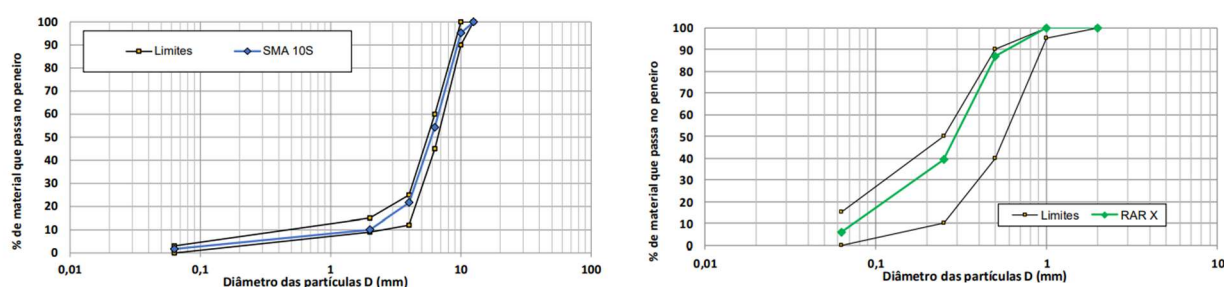


Figura 5. Limites e curva granulométrica da mistura de agregado (esquerda) e da RAR (direita) [6]

Tabela 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 ³	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	-

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, submeteram-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 idêntica e a porosidade dos provetes, nas percentagens 11% e 11,5%, cumpre os limites das CTE da IP. A seleção de ligante betuminoso deveu-se, em grande parte, à evolução das porosidades nas diferentes percentagens.

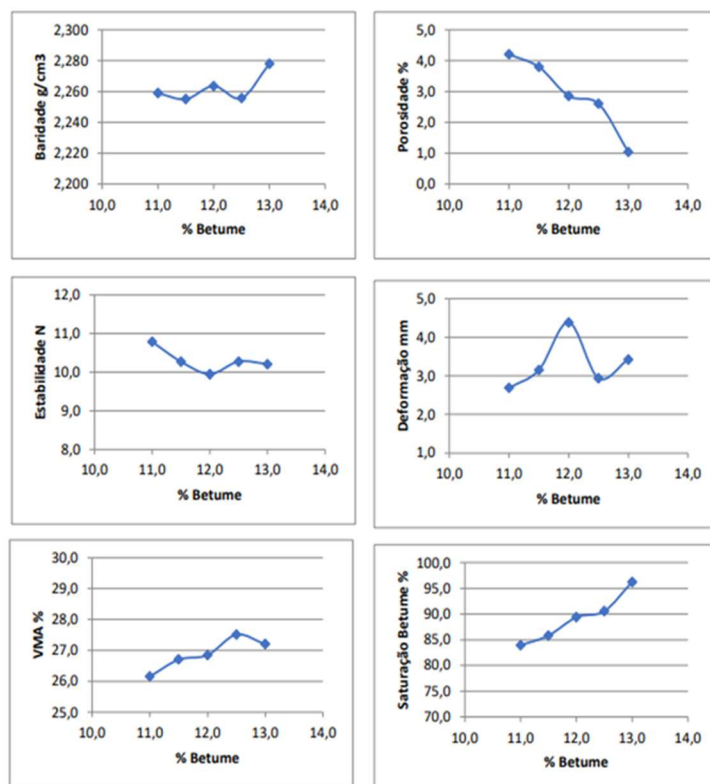


Figura 6. Resultados do estudo Marshall [6]

4.3 Execução de amassaduras experimentais e 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- 620^a, cujo 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), tendo-se obtido o resultado de 100%.

A avaliação do desempenho relativo à deformação permanente foi realizada em ensaio de pista, com recurso a lajetas produzidas em laboratório, 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, submetidas a 10.000 ciclos de carga. Na Figura 7 apresentam-se os resultados obtidos.

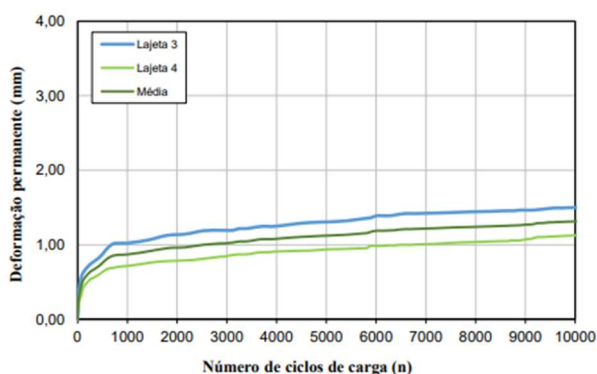


Figura 7. Resultado do ensaio de deformação permanente [6]

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, como é indicado na Figura 8, tendo-se obtido um valor médio de MTD de 1,06 mm.



Figura 8. Provete para ensaio de mancha de areia [6]

4.4 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 (Figura 9).



Figura 9.

Central de fabrico da mistura betuminosa

Previamente, e por forma a acautelar o devido controlo de todo o processo construtivo, desde a formulação, fabrico-teste, fabrico final, transporte e aplicação, foram consideradas, por parte da JJR, diversas variáveis críticas que, sem o cumprimento das mesmas o processo não poderia avançar, nomeadamente:

- i. Aprovisionamento atempado da quantidade total de RAR (seis meses antes da aplicação da mistura);
- ii. Definição do fornecedor do ligante (betume 50/70), recolha de amostras e validação das suas características. Foi utilizado, desde o primeiro dia de formulação até ao fabrico final, o mesmo fornecedor, mitigando eventuais alterações das características de lote para lote, que viessem a influir no resultado final;
- iii. Realização de amassaduras experimentais, cujos principais objetivos foram a afinação e calibragem da central de fabrico e a aferição das características finais da mistura produzida e emergente validação do seu cumprimento, em conformidade com as especificações definidas nas Clausulas Técnicas Especiais;
- iv. Planeamento e dimensionamento dos recursos a alocar aos trabalhos, tanto ao nível do centro de produção e central de fabrico, bem como ao transporte da mistura, o seu espalhamento e a adequada compactação e cura;
- v. Monitorização constante da previsão das condições climáticas, por forma a planear e definir as datas de realização, quer do “Trecho Experimental”, quer do troço final e definitivo, para um

período em que estivessem reunidas as condições adequadas, em cumprimento do definido nas especificações técnicas da Infraestruturas de Portugal.

Para introdução de RAR na mistura, procedeu-se a uma adaptação mecânica da central de fabrico, com introdução de um silo doseador/alimentador que introduz a RAR na secção final do tambor misturador, conforme indicado nas Figuras 10 e 11.

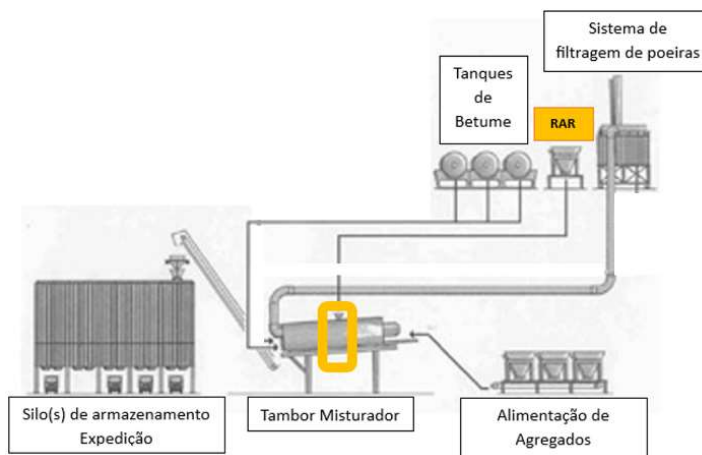


Figura 10. Esquema de funcionamento da central de fabrico e seu silo

O silo doseador/alimentador foi devidamente calibrado e programado, sendo comandado por via de um variador eletrónico, monitorizado a partir do posto de comando da central de fabrico (Figura 11), através do qual é definido o caudal de entrada de RAR, em função da velocidade de fabrico da central.



Figura 11. Silo alimentador/doseador (esquerda) e comando do variador (direita)

Concluída a adaptação da central de fabrico procedeu-se à realização de amassaduras experimentais, com o intuito de, numa primeira fase, definir a velocidade de fabrico da unidade industrial e, posteriormente, constatar e validar o cumprimento das especificações técnicas definidas para a mistura, emergentes da aprovação do estudo de formulação proposto.

De forma iterativa ajustou-se a velocidade de fabrico para 70 ton/h, valor para o qual, após recolha da mistura, se obteve o cumprimento das características técnicas preconizadas, salientando-se as seguintes evidências práticas:

- Volume adequado de agregado no interior do tambor-misturador;
- Maior índice de ocupação do tambor-misturador;
- Adequado envolvimento agregado/RAR (visível homogeneidade na mistura).

Foi realizado o trecho experimental, no qual foram recolhidas, caracterizadas e ensaiadas diversas amostras (Figura 12), com vista à obtenção e tratamento de resultados. Os resultados obtidos após ensaio das amostras recolhidas durante o “Trecho Experimental” confirmaram o cumprimento do especificado, o que permitiu avançar para a fase de aplicação final e definitiva.



Figura 12. Aplicação de SMA10S com RAR – “Trecho Experimental” (esquerda) e recolha de amostras junto à central de fabrico (direita)

Com a validação de resultados, após realização do “Trecho Experimental”, procedeu-se ao planeamento e agendamento da realização do troço final e definitivo, tendo o mesmo sido planeado executar em duas jornadas de trabalho, com a realização de uma via/dia trabalhado. Função da quantidade de trabalho do troço final. foi incrementado o número de camiões de carga a alocar, reservando-se oito unidades. O espalhamento da mistura betuminosa foi realizado por uma pavimentadora da marca VÖGELE, modelo SUPER 1800-3i e a compactação da mistura betuminosa (Figura 13) foi iniciada imediatamente após o espalhamento, a uma temperatura de cerca de 170°C. A temperatura foi medida regularmente durante a compactação (Figura 13) de forma que esta fosse concluída para uma temperatura da mistura de cerca de 150°C.



Figura 13. Aplicação e compactação (esquerda) e temperatura de compactação (direita)

4.5 Avaliação do desempenho futuro

De modo a monitorizar a performance do pavimento nos tempos vindouros, tanto a curto como a médio e longo prazo, foi executada a beneficiação do restante troço (cerca 2400 metros) com misturas betuminosas do tipo AC10 surf sem recorrer à adição de RAR. Deste modo, propõe-se que ambos os pavimentos estejam sujeitos à mesma carga viária e elementos atmosféricos e meteorológicos, para que a performance de ambas as camadas superficiais possam ser monitorizadas, avaliadas e tecidas as devidas conclusões.

5 Considerações finais, conclusões e desenvolvimentos futuros

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, também, alvo de escrutínio, as características previstas para o produto, ligante resultante e proposta mistura betuminosa, sendo detalhadas as exigências relativas ao seu desempenho.



Figura 14. Recolha de amostras (esquerda) e preparação para posterior recolha de lajes (direita)

De acordo com os resultados obtidos antes, durante e após aplicação experimental no trecho da EN10 supramencionado, foi possível retirar as seguintes conclusões:

- i. A experiência realizada permitiu avaliar a adequação das especificações a introduzir no Caderno de Encargos da Infraestruturas de Portugal;
- ii. Os resultados obtidos nas amassaduras, em obra, foram os expectáveis e adequam-se ao formulado em ambiente controlado;
- iii. A metodologia de execução proposta é compatível e exequível, resultando num acabamento superficial e compactações desejadas.

Propõe-se que sejam conduzidas campanhas de monitorização do comportamento e auscultação do pavimento de modo a caracterizar a sua performance. Desta forma será possível validar a aplicabilidade desta solução em larga escala, confirmando os benefícios tecnológicos expectáveis.

Espera-se, assim, contribuir para a divulgação da tecnologia e redução dos custos associados, através da liberalização da mesma. Prevê-se a possibilidade de lançamento de mais troços experimentais a concurso, com base nesta tecnologia, nomeadamente em zonas de proximidade urbana e camadas de auscultação e performance das camadas a horizonte de 5 anos.

6 Agradecimentos

Os autores desejam expressar o seu agradecimento aos colaboradores das entidades IP, ULHT e JJR, bem como às suas administrações pela oportunidade concedida em participar em projetos inovadores, e por terem sido colocado à disposição todos os recursos, sem exceção, para garantia da boa execução, que muito contribuíram para a prossecução do trabalho.

7 Referências

- [1] J. Epps, *Uses of recycled rubber tires in highways*, National Academic Press, Washington, EUA, 1994.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] L. Quaresma, E. Correia, F. Marques & al *Development of New Specifications for Bituminous Mixtures with Reacted and Activated Rubber from Recycled Tires*envolvimento de *Estudo de Formulação*, junho de 2022.
- [6] F. Silva, J.B. Sousa, *Estudo de Formulação de Mistura Betuminosa SMA 10S RAR*, Estudo efetuado a pedido de JJR, março de 2022.