

# Extensor elastómero do betume – A nova fronteira das misturas betuminosas com ligantes betuminosos modificados com borracha

Jorge B. Sousa<sup>1</sup>, Andrey Vorobiev<sup>2</sup>, Rossana Sousa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CONSULPAV – Consultores e Projectistas de Pavimentos, Lda., Milharado, Mafra, Portugal  
email: [jombsousa@aol.com](mailto:jombsousa@aol.com) <http://www.consulpav.com>

<sup>2</sup> Alltech Investments, Ltd., Moscow, Russia

---

## Sumário

*A borracha reciclada de pneus reagida e activada (Reacted and Activated Rubber – RAR), enquanto ligante betuminoso modificado com borracha pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura betuminosa, permitindo substituir parte do betume a utilizar.*

*Este artigo sintetiza os resultados do estudo de I&D efectuado, no qual se demonstra que a RAR modifica o betume puro aumentando o seu grau PG, resiliência, temperatura de amolecimento e suas propriedades após recuperado. Constatou-se ainda que para diferentes tipos de misturas betuminosas fabricadas com RAR, estas apresentam um desempenho superior relativamente à estabilidade, resistência à deformação e à fadiga, assim como uma boa relação custo/benefício.*

---

**Palavras-chave:** *Betume modificado com alta percentagem de borracha; granulado de borracha de pneus, Reacted and Activated Rubber (RAR), Activated Mineral Binder Stabilizer (AMBS), Ligante betuminoso com borracha, Mistura betuminosa convencional, misturas betuminosas com borracha, borracha reciclada de pneus reagida e activada.*

## 1 INTRODUÇÃO

A principal razão para a utilização de betume modificado com borracha (BB) em misturas betuminosas deve-se ao facto de este tipo de betumes proporcionarem 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 quaisquer condições climáticas. Os fabricantes de betumes modificados com borracha habitualmente têm em consideração as condições climáticas e o tráfego na sua formulação para obter um betume modificado com borracha adequado.

A temperaturas médias e elevadas, as propriedades físicas dos betumes modificados com borracha diferem significativamente das propriedades observadas nos betumes convencionais. A borracha tende a endurecer o betume e a aumentar a sua elasticidade (proporção de deformação que é recuperável) para a gama de temperaturas de serviço habituais num pavimento, diminuindo deste modo a susceptibilidade do pavimento à temperatura e melhorando a resistência à deformação permanente (cavados de rodeira) e a resistência à fadiga [2].

Contudo, apesar das vantagens comprovadas das misturas betuminosas com betumes modificados com borracha, as quais evidenciadas nas últimas quatro conferências do *Asphalt Rubber* [10], assim como em outros eventos científicos, continua a não existir um avanço ou desenvolvimento significativo na utilização e implementação desta tecnologia de uma forma prática. Algumas razões para esta “estagnação” podem ser enumeradas:

- (i) O fabrico convencional de BB através do processo de modificação por via húmida, o qual envolve a utilização de temperaturas muito elevadas (superiores a 190 °C) e de um tempo de reacção (45 minutos até 1 hora);
- (ii) A complexidade e o elevado custo da unidade de fabrico do BB que necessariamente deve ser instalada em todas as centrais de fabrico de misturas betuminosas;
- (iii) A necessidade de reaquecer o BB após longos períodos de armazenamento;

- (iv) O elevado custo das misturas betuminosas com BB comparativamente às misturas betuminosas convencionais (superior em 20% a 100%).

Tendo em vista a vantagem comprovada dos betumes modificados com borracha, foi feito um esforço para superar as principais desvantagens acima enumeradas. Uma solução foi desenvolvida para proporcionar uma base para uma nova solução de ligantes betuminosos modificados com borracha, essa solução é a *Reacted and Activated Rubber* – RAR.

## 2 A BORRACHA DE PNEUS REAGIDA E ACTIVADA “REACTED AND ACTIVATED RUBBER” - RAR

### 2.1 Generalidades

A nova borracha reagida e activada (industrialmente conhecida como RuBind), enquanto ligante betuminoso modificado com borracha, é composto por um betume convencional, granulado fino de borracha e por um estabilizador de betume do tipo filer mineral activo (*Activated Mineral Binder Stabilizer* - AMBS) em percentagens devidamente optimizadas. A RAR é produzida através da mistura a quente dos seus constituintes durante um curto período de tempo, sendo posteriormente realizada a activação através de um processo especialmente concebido para formar um granulado de borracha seco activado.

A RAR pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura betuminosa: densa; rugosa; aberta; do tipo SMA; etc., permitindo substituir parte do betume a utilizar, segundo diferentes proporções. A adição de RAR em central é efectuada directamente no misturador ou no tambor secador, imediatamente após a pulverização do betume, utilizando as unidades de alimentação existentes (p.ex. alimentador de fibras para fabrico de misturas betuminosas do tipo SMA, etc.).

Segundo o estudo de investigação e desenvolvimento efectuado, é demonstrado que as misturas betuminosas fabricadas com RAR apresentam um desempenho superior comparativamente às misturas betuminosas convencionais, assim como relativamente a misturas betuminosas com betumes modificados ou com BB. Em geral, foi constatado que a RAR actua como um extensor elastómero do betume que modifica o betume puro aumentando o seu grau PG, a resiliência, a temperatura de amolecimento e as suas propriedades após recuperado. Foi ainda possível constatar que para diferentes tipos de misturas betuminosas fabricadas com RAR, estas apresentam um desempenho superior no que concerne à estabilidade, resistência à deformação e à fadiga, assim como uma boa relação custo/benefício.

### 2.2 Composição da RAR

Como observado na Figura 1, a RAR é composta por betume convencional, granulado fino de borracha (usualmente peneiro #30) e por um estabilizador de betume do tipo filer mineral activo (*Activated Mineral Binder Stabilizer* - AMBS) em percentagens devidamente optimizadas. Uma breve descrição dos constituintes é efectuada seguidamente.



Betume

Granulado de borracha

AMBS

Fig 1. Constituintes da RAR: betume, granulado de borracha e AMBS

O betume a utilizar pode ser convencional com uma elevada penetração. Betumes com um índice de penetração entre 100/200 a 35/50, ou AC 20, ou PG 52 a PG 70, podem ser utilizados. A utilização de betumes mais moles permite a utilização de temperaturas de mistura e de compactação menores, comumente utilizadas para as misturas convencionais sem se perder uma adequada trabalhabilidade, apesar da adição de granulado de borracha.

O granulado de borracha é usualmente composto por borracha proveniente de pneus usados que são reciclados e transformados em granulado ou pó de borracha através de um determinado processo de reciclagem. Os pneus usados são habitualmente provenientes de veículos ligeiros e pesados, devendo ser removidos os arames de aço e fibras antes da trituração. Para a produção de RAR, as partículas de borracha trituradas devem ter uma dimensão inferior a 1,0 mm. O tamanho máximo das partículas de borracha deve ser de #30 mesh. A borracha a utilizar pode ser obtida através do processo de reciclagem criogénico ou ambiental.

O estabilizador de betume do tipo fíler mineral activo (AMBS) é um novo tipo de micro-estabilizador do betume que foi desenvolvido para prevenir o escorrimento de betume nas misturas betuminosas do tipo SMA, durante o armazenamento, transporte e aplicação. Este estabilizador (industrialmente conhecido como iBind) consiste em micro-partículas de sílica mineral (dimensão igual ou inferior a 40 µm), as quais são um resíduo resultante da actividade mineira da empresa Phosphate Industries. A activação, realizada através do envolvimento Nano monomolecular das partículas, é efectuada para que o betume adquira propriedades Thixotropic e Shear-Thinning, uma vez que o mástique presente na mistura deve ter uma elevada viscosidade em repouso (armazenamento, transporte e após aplicação *in situ*), permitindo reduzir o escorrimento, e simultaneamente ter uma baixa viscosidade quando em movimento (fabrico e aplicação) de modo para assegurar uma adequada trabalhabilidade [5].

Em estudos efectuados a nível internacional (Israel, Áustria, Portugal, Suécia, China, Rússia e USA) foi verificado que as misturas SMA, quando fabricadas com este novo micro-nano estabilizador de betume, apresentam um escorrimento reduzido comparável ao que é obtido com a utilização de fibras celulósicas. Utilizando métodos de formulação segundo as normas europeias e americanas, as SMA fabricadas apresentam igualmente um comportamento mecânico semelhante ou melhor no que concerne à: sensibilidade à água, resistência ao desgaste, tracção indirecta, resistência à deformação permanente, e resistência à fadiga. Estes resultados foram obtidos utilizando uma percentagem de betume inferior em 0,5 % a 1,2 % e uma temperatura de mistura inferior em 10 °C a 40 °C comparativamente a misturas SMA com fibras celulósicas [3; 6; 7; 8; 9; 13; 15]. A redução da temperatura de mistura e de compactação pode classificar as misturas betuminosas fabricadas com AMBS como uma mistura SMA temperada – WSMA [14].

Para ensaios realizados em misturas fabricadas segundo o método SUPERPAVE foi demonstrado que a substituição de parte do betume pelo estabilizador AMBS (até 15 %) melhora as propriedades da mistura (resistência à fadiga, resistência à deformação permanente e sensibilidade à água) como constatado no estudo [16]. Neste estudo foi verificado que o estabilizador de betume AMBS também promove uma melhoria da capacidade estrutural do betume e das misturas betuminosas que o incorporam.

Adicionalmente às vantagens evidenciadas em termos de melhoria do comportamento das misturas betuminosas que incorporam AMBS, foi igualmente efectuado uma análise dos benefícios ambientais decorrentes da utilização deste tipo de misturas betuminosas. Da análise efectuada, verifica-se que genericamente que os indicadores ambientais analisados, demonstram uma evidente diminuição quantitativa dos indicadores ambientais negativos, assim como do custo por tonelada de uma mistura betuminosa SMA com AMBS comparativamente a uma mistura SMA com fibras celulósicas ou mesmo comparativamente a misturas betuminosas densas e misturas Superpave [1].

Durante o ano de 2010 a 2011, duas aplicações em estradas comparáveis efectuadas com sucesso em Israel. O comportamento das secções teste até actualmente, validam positivamente os resultados obtidos em laboratório, relativamente às misturas SMA com AMBS [6].

### 2.3 Fabrico de RAR

Desde o início de 2012 até ao momento em que este artigo foi elaborado, a borracha reagida e activada (*Reacted and Activated Rubber*) foi produzida em unidades de fabrico experimentais. Durante o trabalho de investigação e desenvolvimento, a RAR foi produzida e testada para diferentes formulações, função do tipo e proporção relativa

dos seus três constituintes. Em média uma mistura típica de RAR contém cerca de 62 % de borracha, 22 % de betume convencional e 16 % de AMBS. Para um envolvimento final de cada partícula de RAR, após o seu arrefecimento, é adicionado 10 % de AMBS no misturador.

### 3 MODELO ESTRUTURAL E COMPORTAMENTAL SUGERIDO

Como indicado anteriormente, a borracha reagida e activada (RAR), constitui um inovador e melhorado extensor elastómero do betume que é permite quando adicionada a um betume convencional, obter propriedades superiores comparativamente a um betume modificado com polímeros, e até mesmo superiores comparativamente a BB. Um modelo básico sugerido para descrever a estrutura e comportamento da RAR como um modificador do betume é ilustrado na Figura 2.

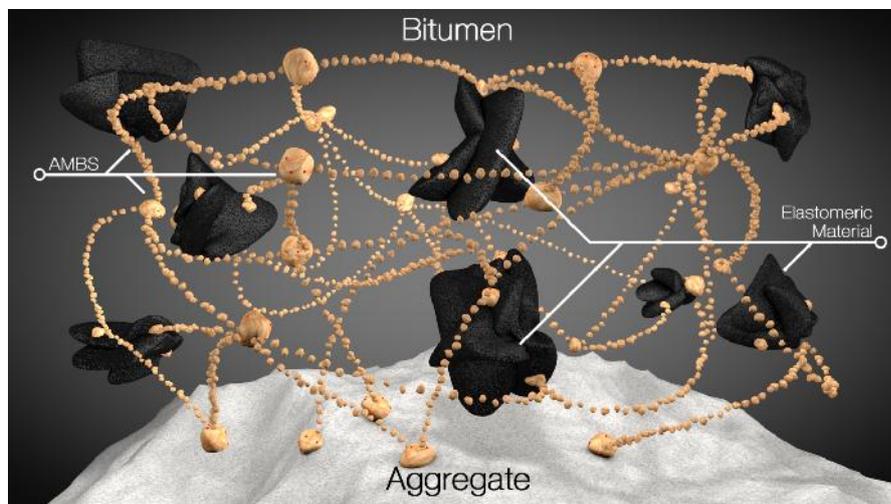


Fig 2. Modelo sugerido para descrever a estrutura e comportamento da RAR como modificador do betume

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

A cadeia orgânica carregada do activador presente no AMBS permite criar uma rede de partículas interligadas. Quando as partículas finas de RAR (material elastómero) são misturadas num líquido como o betume com as partículas de sílica activadas, então as moléculas carregadas do AMBS interligam-se com as partículas de borracha nos locais onde existe material inorgânico carregados electrostaticamente. Deste modo, quando os materiais acima indicados são misturados num betume aquecido, formam uma rede de material elastómero e de partículas de AMBS no betume. Esta rede estrutural, conjuntamente com as capacidades únicas de elasticidade e de interligação do material elastómero, derivam da reacção e activação da borracha a temperaturas elevadas, proporcionando um betume com melhores propriedades mecânicas, melhor comportamento elástico e uma elevada durabilidade. A RAR é igualmente envolvida com uma fórmula especial de AMBS que uma vez dispersa no betume também se interliga ela própria aos agregados. Esta interligação melhora a adesividade entre o betume e o agregado reduzindo a sensibilidade à água. De modo a nova rede interliga os agregados, o betume, o material elastómero e as partículas de AMBS. Tal estrutura não pode ser formada quando apenas se mistura betume com borracha (sem AMBS) como sucede na actual tecnologia de fabrico de BB.

#### 4 PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO DA RAR COMO LIGANTE BETUMINOSO MODIFICADO COM BORRACHA

Nas várias fases de investigação e desenvolvimento da borracha reagida e activada, estudos aprofundados foram realizados no sentido de caracterizar as propriedades e comportamento do novo ligante betuminoso modificado com borracha. Dado que a RAR pretende substituir uma parte do betume não modificado presente numa mistura betuminosa, as propriedades físicas e reológicas da combinação RAR+betume foram estudadas em [12] para várias proporções de RAR relativamente à percentagem de betume original da mistura betuminosa, dependendo do tipo de mistura betuminosa, tais como: misturas densas, SMA, rugosas, abertas, etc..

O Quadro 1 e a Figura 3 apresentam os resultados dos ensaios realizados com betume convencional para duas formulações de RAR, designadas de TA e TA2. A viscosidade, a temperatura de amolecimento, o índice de penetração e a resiliência foram avaliadas em função da percentagem de RAR relativamente à percentagem total de RAR+betume (betume combinado).

Quadro 1. Propriedades da RAR+betume em função da percentagem de RAR utilizada no betume combinado

RuBind	% RAR	Viscosidade	Anel e Bola	Penetração	Resiliência	Data
TA	10	250	56	38	11	14-03-2012
	15	350	56	38	14	
	20	650	57	36	22	
	25	1150	59	34	25	
	30	2200	62	30	27	
TA2	0	115	54	46	7	12-03-2012
	10	250	55	40	11	
	15	325	56	37	17	
	20	450	59	35	25	
	25	1012	63	27	30	
	30	2800	70	22	38	

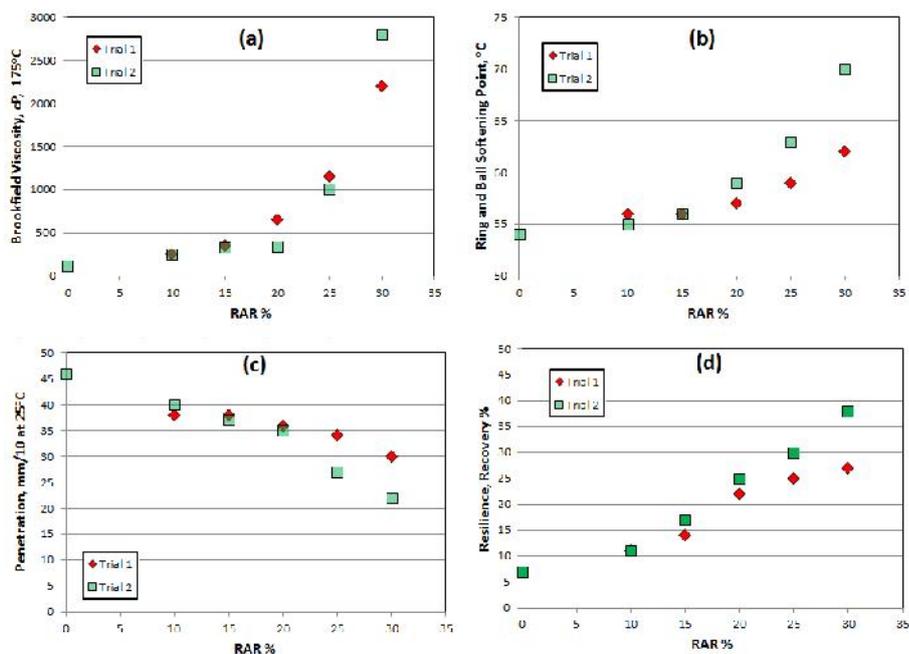


Fig 3. Propriedades convencionais do betume, a) Viscosidade, b) temperatura de amolecimento por anel e bola, c) índice de penetração e d) resiliência

Pode ser verificado que a proporção de RAR utilizada na mistura com o betume, apresenta um efeito significativo nas propriedades básicas do betume combinado (RAR+betume), aumentando a viscosidade, a temperatura de amolecimento e a resiliência, e diminuindo a penetração do betume. Tais modificações irão ter um papel importante nos diferentes tipos de misturas betuminosas.

No que diz respeito ao comportamento reológico dos betumes nas misturas betuminosas, habitualmente caracterizado através de ensaios de *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), permite aferir a influência da percentagem de RAR no betume avaliado através da variação do grau PG, como se pode visualizar na Figura 4 e 5, para o indicador positivo e negativo do grau, respectivamente.

Como se pode observar, a adição de RAR a um betume convencional permite melhorar significativamente o comportamento reológico do betume. Tal é reflectido pelo aumento do indicador positivo do grau PG e por uma diminuição do indicador negativo do grau PG, em função do aumento da proporção de RAR no betume combinado (RAR+betume). Este efeito é similar ao que se obtém para a modificação de betumes convencionais através adição de polímeros. Deve ser reforçado que a adição de RAR ao betume convencional, através da presença de granulado de borracha e da obtenção de uma estrutura de ancoragem criada pelo AMBS, produz um betume combinado com propriedades elásticas muito superiores.

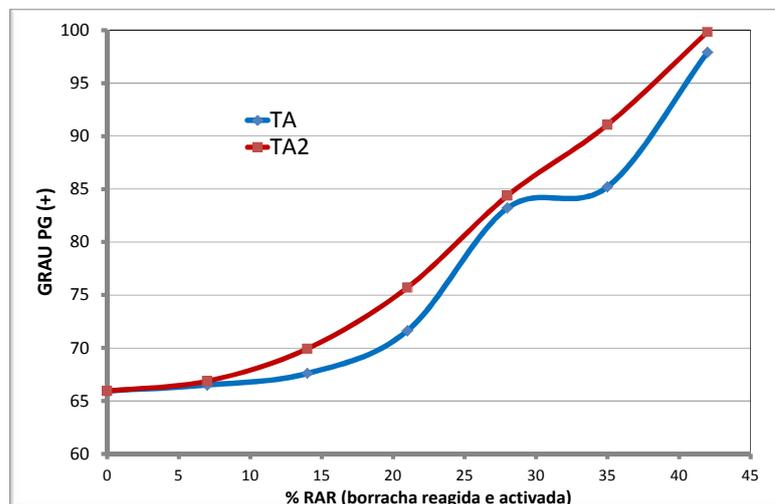


Fig 4. Efeito da % de RAR no grau PG do betume combinado (RAR+betume) (indicador positivo do grau PG)

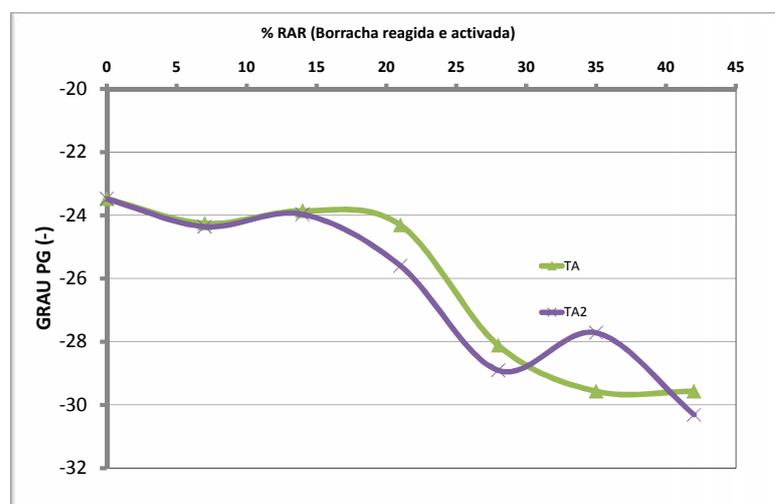


Fig 5. Efeito da % de RAR no grau PG do betume combinado (RAR+betume) (indicador negativo do grau PG)

Resultados semelhantes no que respeita à influência da RAR na melhoria do comportamento reológico do betume, foram observados durante um estudo extensivo realizado com betumes utilizados na Rússia [13]. Como pode ser constatado na Figura 6, a adição de 21 % de RAR a um betume convencional com um PG64 a PG70 promove um aumento para PG88 a PG94. Tal demonstra um significativa modificação do betume, como convencionalmente obtido através de modificação com polímeros.

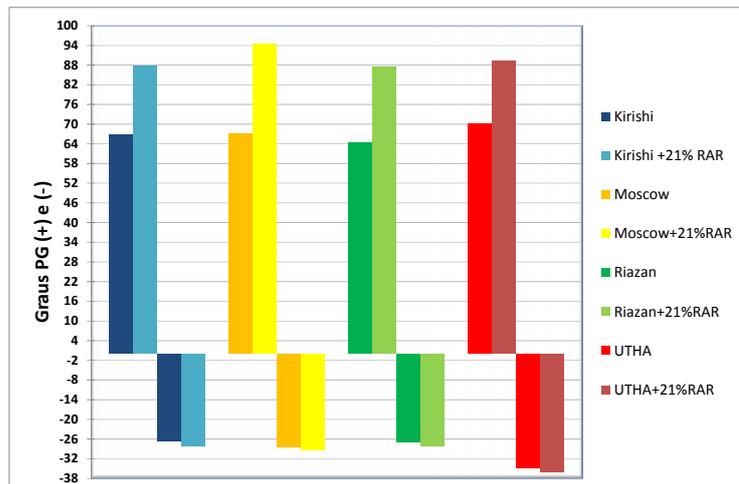


Fig 6. Efeito da adição de RAR no grau PG do betume combinado (RAR+betume) como estudado para betumes utilizados na Rússia

Relativamente à substituição de parte do betume utilizado numa mistura betuminosa por RAR foi igualmente constatado que apresenta um efeito modificador significativo das propriedades do betume combinado recuperado. A influência da percentagem de RAR nas propriedades do betume combinado recuperado pode ser estudada utilizando ensaios convencionais de recuperação do betume, assim como através do novo conceito de JNR. Este conceito é baseado em *Multi Stress Creep Recovery* (MSCR) AASHTO TP 70, sendo um indicador da qualidade do betume, no que concerne à sua resistência à deformação permanente e genericamente à sua capacidade de recuperar da deformação. Os resultados do ensaio de recuperação são apresentados na Figura 7 e 8.

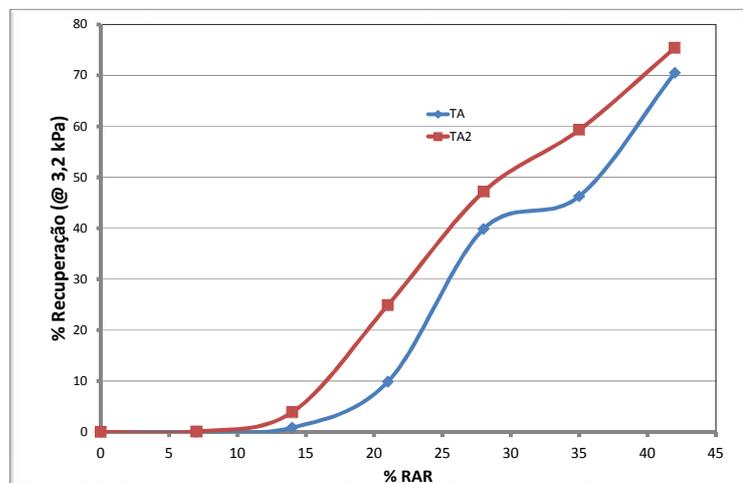


Fig 7. Efeito da % de RAR no betume combinado recuperado quando ensaiado segundo o método convencional de recuperação de betume

De acordo com os resultados obtidos, a adição de RAR a um betume não modificado melhora significativamente a capacidade de recuperação do betume. Tal é evidenciado pelo aumento da magnitude da recuperação ou da diminuição dos valores de JNR, em função do aumento da proporção de RAR no betume combinado.

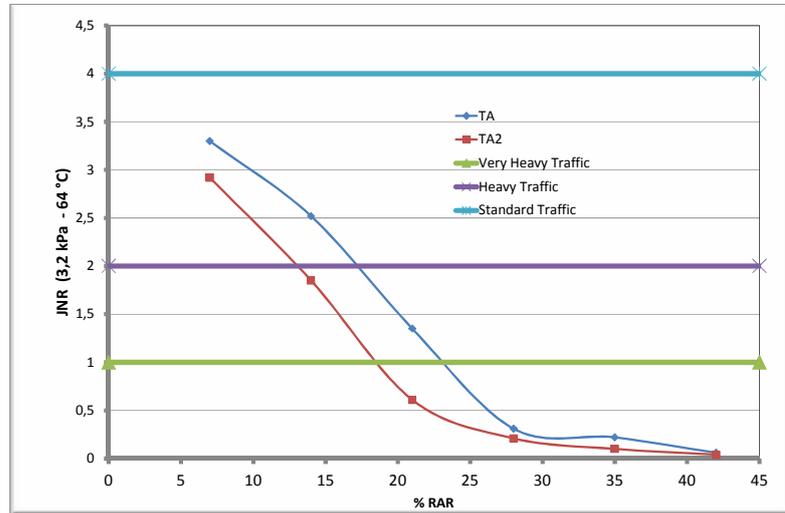


Fig 8. Efeito da % de RAR no betume combinado recuperado quando ensaiado segundo o método JNR

Na Figura 9, são igualmente apresentados resultados semelhantes no que diz respeito à influência da RAR na excepcional capacidade de recuperação do RAR+betume, obtidos ainda no decorrer do amplo estudo realizado sobre betumes utilizados na Rússia [13]. Pode-se observar que a adição de 21% de RAR a um betume convencional aumenta significativamente o potencial de recuperação do novo betume. Tal é possível ser aferido através dos valores de JNR muito reduzidos para o betume combinado que classificam este betume como sendo adequado para um tráfego *Extremely Heavy*.

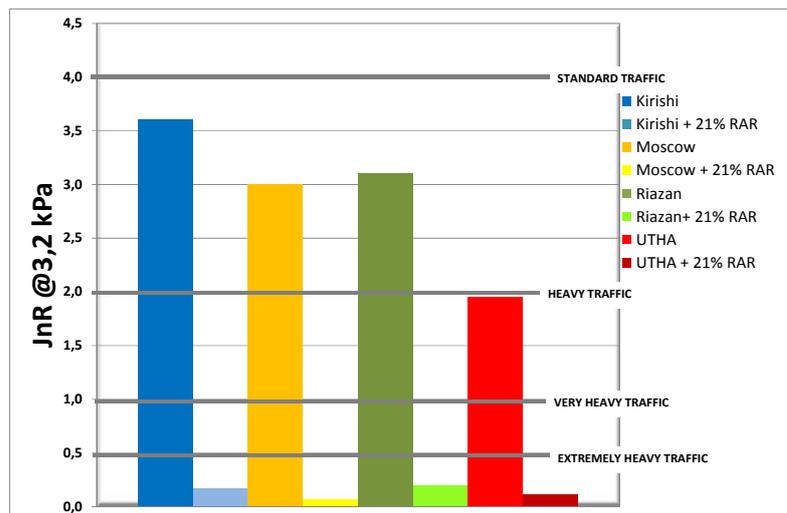


Fig 9. Efeito da adição de RAR no potencial de recuperação de um betume combinado recuperado (expresso por JNR) para betumes utilizados na Rússia

## 5 PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM RAR

Como mencionado anteriormente, a RAR é utilizada para substituir parte do betume não modificado utilizado numa mistura betuminosa. Durante as várias fases do estudo de investigação e desenvolvimento realizado, foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas e a durabilidade das misturas betuminosas, compostas por betume combinado (RAR+betume). Tal foi efectuado para várias proporções de RAR relativamente à percentagem de betume original na mistura betuminosa, dependendo do seu tipo (misturas densas, SMA, rugosa, abertas, etc.). Apresentam-se seguidamente alguns exemplos típicos dos resultados obtidos nos ensaios:

Durante o processo de formulação de misturas betuminosas densas convencionais com RAR através do método de *Marshall*, foi constatado que a magnitude absoluta da estabilidade era muito superior à que era obtida para misturas betuminosas densas convencionais. Como apresentado na Figura 10, a estabilidade máxima para a mistura densa foi obtida para 20 % de RAR no betume combinado. Um valor relativamente elevado foi observado para a estabilidade óptima (18000 N ou 4050 lb.) associado a valores habituais de deformação. Significa que a utilização de RAR aumenta a resistência da mistura betuminosa de forma substancial sem com isso aumentar a sua rigidez.

Os ensaios de *Marshall* foram igualmente realizados para as misturas SMA fabricadas na Rússia para quatro tipos de betume utilizados localmente [13]. Duas misturas (com 6,2 % de betume) foram fabricadas com um betume extremamente modificado com polímeros (SBS e Bitract), tendo as outras duas misturas sido fabricadas com um betume mole (Riazan), estabilizado com 0,4 % de fibras celulósicas (6,5 % de betume), e a restante mistura com adição de 30 % de RAR no betume combinado. Os resultados da estabilidade *Marshall* são apresentados na Figura 11, sendo os resultados do escorrimento apresentados na Figura 12.

Neste caso pode ser igualmente observado que a mistura SMA com RAR sobrepõe-se às restantes misturas no que diz respeito à estabilidade *Marshall*, assim como na sua capacidade para minimizar o escorrimento da mistura nos períodos de repouso antes da compactação.

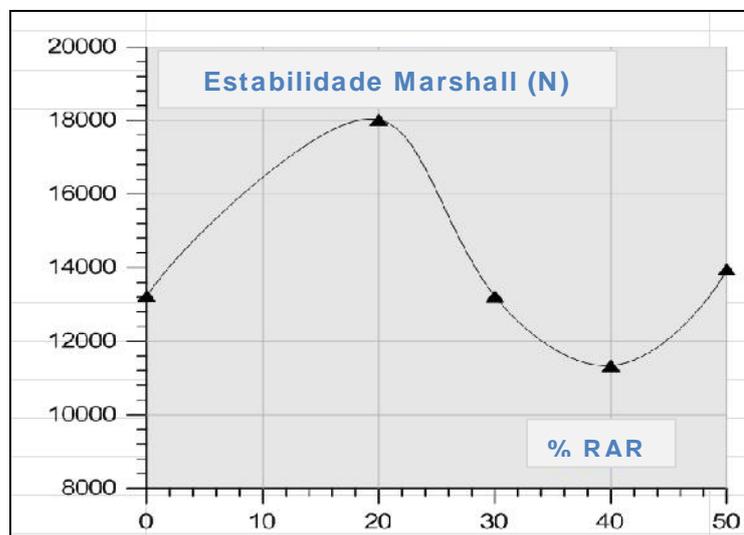


Fig 10. Estabilidade Marshall de uma mistura densa em função da percentagem de RAR utilizada no betume combinado

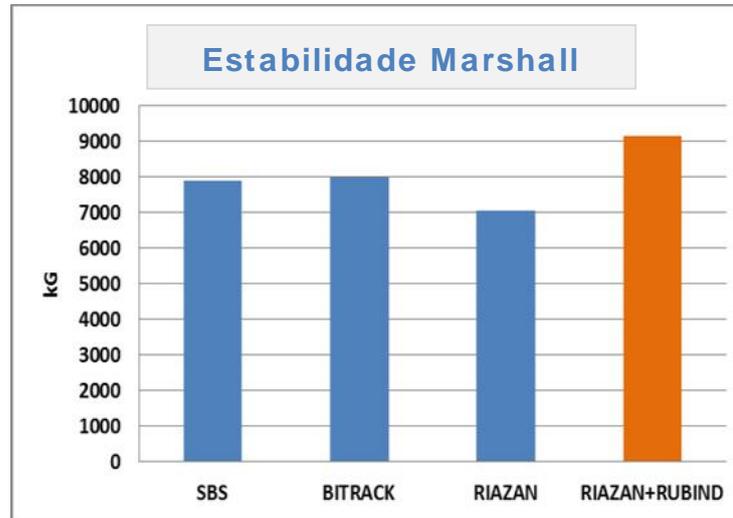


Fig 11. Estabilidade Marshall média obtida para os quatro betumes aplicados na Rússia



Betume	Escorrimento - EN12697-18		
	Amostra 1	Amostra 2	Média
SBS	0,60	0,33	0,47
Bitrack	0,09	0,04	0,07
Riazan + 0,4% Fibras	0,08	0,09	0,09
Riazan + Rubind	0,10	0,04	0,07

Fig 12. Resultados do escorrimento do betume obtidos para quatro betumes utilizados na Rússia

Consequentemente é constatado que o ligante betuminoso modificado com RAR pode também ser utilizado como um efectivo estabilizador passível de substituir o uso fastidioso de fibras celulósicas para minimizar o escorrimento do betume em misturas betuminosas do tipo SMA. Resultados similares foram obtidos para as misturas SMA analisadas em Israel com 15 % a 25 % de RAR, como se pode observar no Quadro 2.

Quadro 2. Resultados dos ensaios de escorrimento obtidos para uma mistura SMA convencional (Israel) com a adição de RAR

Ensaio de escorrimento em misturas SMA com RAR (Dimona, Maio, 14, 2012)			
Tipo de RAR	Produzido na DSI Dimona, 2 de Maio, 2012, amostra 3		
Betume	PG 70-22, Haifa Refineries		
Agregados	Finos - dolomite; grossos - basalto		
Mistura SMA	SMA 12.5, norma Israelita, 6,0% de betume		
Granulometria	Fracção agregados grossos próximo do limite inferior		
Temp. de mistura e de escorrimento	170 °C		
Betume+RAR na mistura %	6,0		
% RAR utilizado (Betume+RAR)	15	20	25
% Betume na mistura	5,1	4,8	4,5
% RAR na mistura	0,9	1,2	1,5
% escorrimento EN 12697 (método de Schellenberg)	0,03	0,01	0,00

Adicionalmente, foram realizados ensaios para avaliação da resistência à deformação permanente em diferentes misturas betuminosas do tipo SMA com fibras celulósicas e com AMBS (como estabilizador do betume), comparativamente a misturas betuminosas rugosas com RAR para diferentes formulações segundo as *ADOT curves*. Os resultados são apresentados na Figura 13.

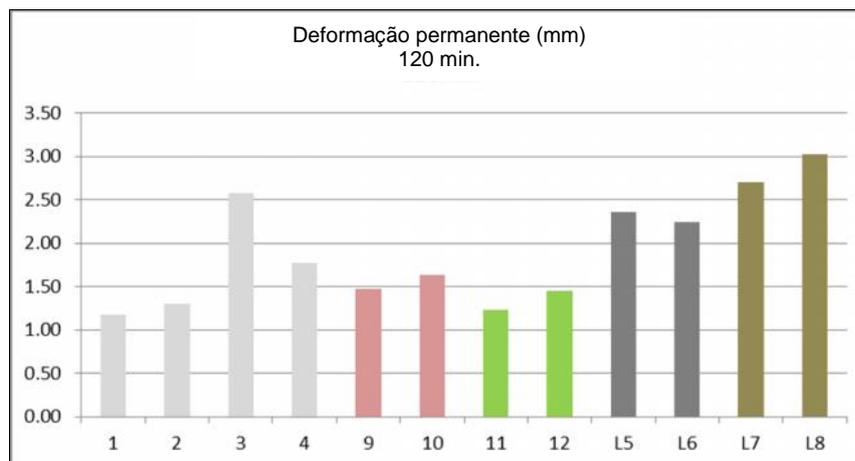


Fig 13. Resultados da resistência à deformação permanente para misturas betuminosas rugosas com RAR e misturas SMA

Como pode ser observado, as misturas rugosas que contêm RAR, exibem uma resistência à deformação permanente muito superior quando comparadas com as misturas SMA. A média da deformação é de 1,58 mm e de 2,58 mm, respectivamente. Se omitido o resultado da mistura n.º 3, a média dos valores da deformação passariam de 1,58 mm para 1,38 mm. Tal significa que uma mistura betuminosa SMA convencional apresenta uma deformação permanente 87 % superior a uma mistura betuminosa rugosa com RAR.

Complementarmente foi realizado um amplo estudo para avaliação da resistência à fadiga, usando o ensaio de flexão em quatro pontos (AASHTO T321) para diversos tipos de misturas betuminosas. Os ensaios foram realizados em misturas betuminosas SMA com betumes modificados, misturas betuminosas rugosas com BB e misturas betuminosas densas, comparativamente a misturas betuminosas rugosas com RAR. Várias misturas betuminosas rugosas com RAR foram formuladas para a mesma percentagem de betume e de agregados, tendo como referência a mistura AR-GAP A. A mistura betuminosa rugosa de referência (AR GAP A), tinha 8,23 % de BB e 1 % de cimento ou de cal. Como tal, a percentagem total de aditivo para a mistura betuminosa rugosa de

referência era 9,23 %. As misturas betuminosas rugosas com RAR foram formuladas de tal modo que a soma da percentagem de betume não modificado mais a percentagem de RAR fosse até 9,23 %. As seguintes misturas foram fabricadas B6.19RAR3.04 (representando o primeiro número a percentagem de betume igual a 6,19% e o segundo número a percentagem de RAR 3,04%), B5.45RAR3.78 e B4.71RAR4.52. A RAR utilizada é constituída por cerca de 62 % de granulado de borracha podendo ser facilmente constatado que as misturas tinham cerca de 20 %, 25 % e 30 % de granulado de borracha relativamente ao total de 9,23% de betume.

Os resultados do ensaio de flexão em quatro pontos são apresentados na Figura 14 (os ensaios foram executados a extensão controlada a 10 Hz, 20 °C e para 500 microextensão). Pode ser verificado que as misturas betuminosas rugosas com RAR apresentam um comportamento muito superior a qualquer uma das outras misturas betuminosas estudadas. Verifica-se ainda que a mistura com 49 % de RAR no betume combinado (B4.71RAR4.52), apresenta uma resistência à fadiga que é cerca de 7 vezes superior à que foi obtida para uma mistura betuminosa rugosa com BB.

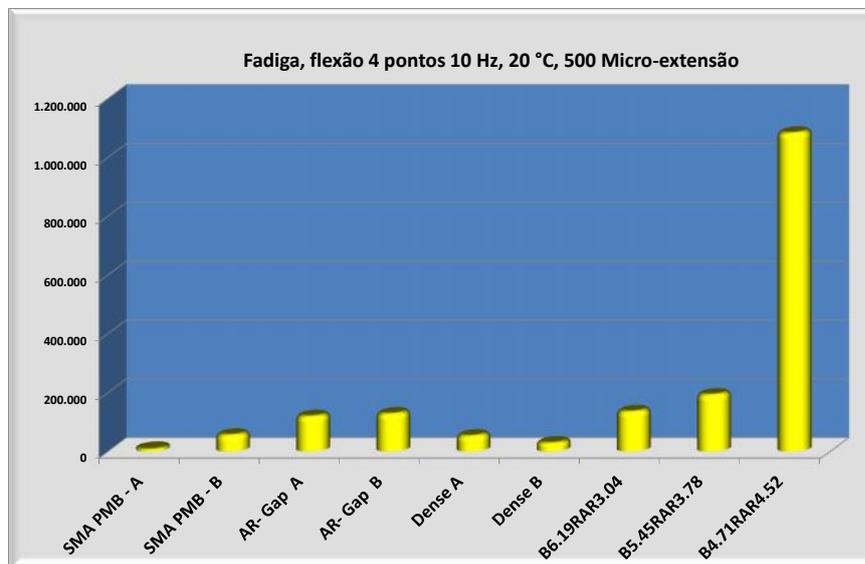


Fig 14. Resultados do ensaio de avaliação da resistência à fadiga para diferentes tipos de misturas betuminosas comparativamente às misturas betuminosas rugosas com RAR

Foram ainda efectuados ensaios para avaliar a recuperação das misturas betuminosas com RAR um dia após a realização do ensaio de estabilidade. Para o efeito foram utilizados provetes cilíndricos *Marshall*, tendo-se efectuado a medição da deformação com uma craveira a após a aplicação da carga (ver Figura 15). Posteriormente o provete foi condicionado durante 24 horas a 20 °C. Após este período, voltou-se a efectuar a mesma medição tendo-se verificado que ocorreu uma recuperação da deformação de  $15,35 - 12,43 = 2,92$  mm. Tal consiste numa recuperação radial de 2,9 mm o que é substancial para uma mistura betuminosa. Observando a Figura 7, verifica-se que a recuperação total do betume combinado (betume+RAR) é ainda muito superior.

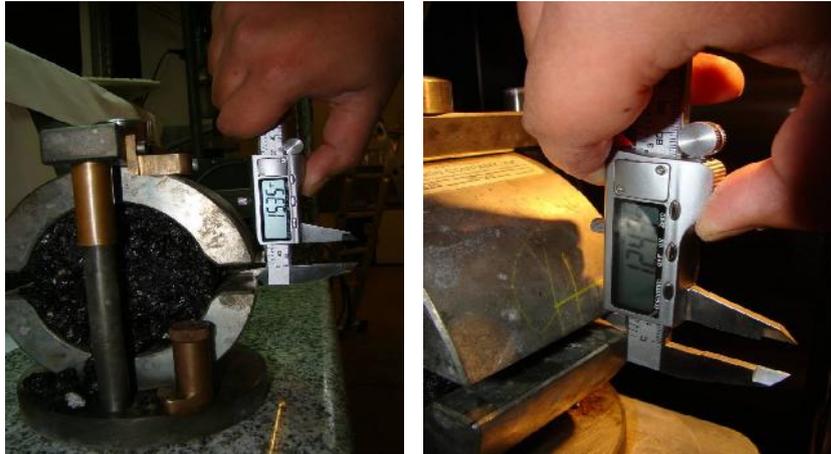


Fig 15. Medição da recuperação ocorrida numa mistura betuminosa com RAR utilizando o equipamento do ensaio de estabilidade *Marshall*

A realização de ensaios de recuperação foram igualmente realizados nas misturas betuminosas rugosas com RAR após a realização dos ensaios de deformação permanente. Os resultados são apresentados na Figura 16.

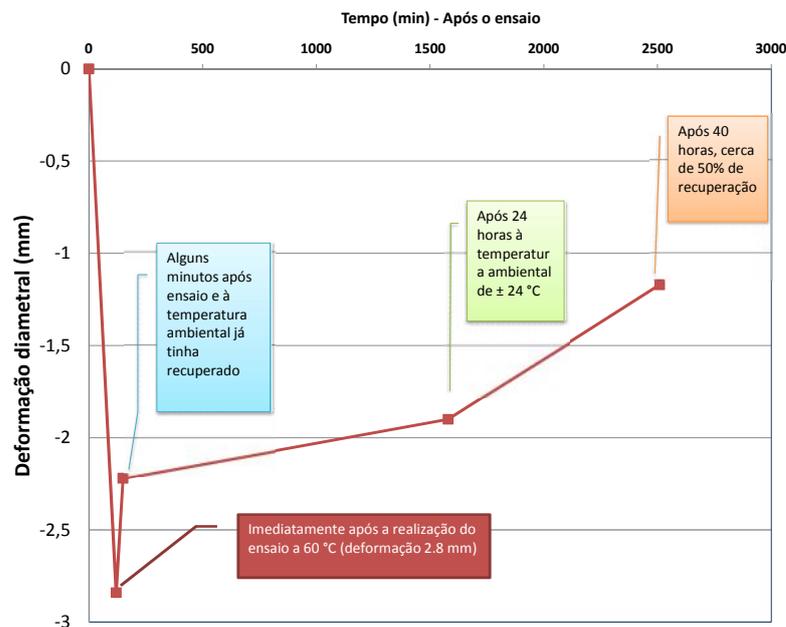


Fig 16. Recuperação observada nas misturas betuminosas com RAR após o ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente

As deformações foram medidas no centro da placa, após uma deformação total de 2,8 mm ser atingida (ensaio realizado a 60 °C durante 2 horas). Como pode ser observado, uma recuperação imediata superior a 0,6 mm foi obtida (cerca de 21 %). Posteriormente verificou-se uma contínua recuperação até uma percentagem superior a 40 % (decorridas 40 horas) relativamente à deformação total inicial.

## 6 ASPECTOS LOGÍSTICOS E TECNOLÓGICOS

Uma vez que o granulado de borracha é o maior elemento constituinte da RAR (mais do que 60 % relativamente à massa total da RAR), é logicamente recomendado a instalação de uma unidade de produção de RAR dentro da central de reciclagem de borracha. Os outros dois constituintes (betume e AMBS) serão transportados para a central de reciclagem, sendo posteriormente o produto final RAR exportado directamente para as centrais de fabrico de misturas betuminosas.

Ao contrário do BB, a RAR produzida industrialmente (fornecida sob a forma de granulado seco), pode ser adicionada directamente no misturador ou no tambor secador de qualquer central de fabrico de misturas betuminosas. Os habituais alimentadores auxiliares existentes em qualquer tipo de central podem ser utilizados (ver a Figura 17).

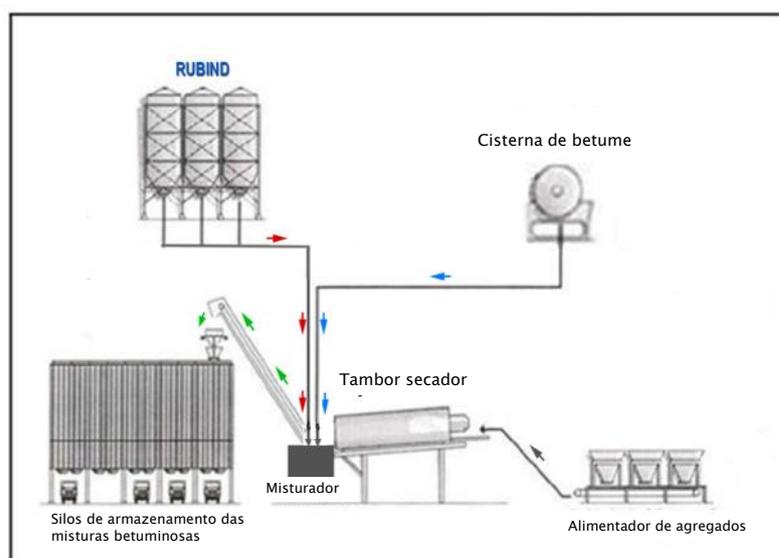


Fig 17. A adição de RAR pode ser efectuada directamente no misturador ou no tambor secador de qualquer tipo de central de fabrico de misturas betuminosas utilizando um comum alimentador auxiliar

A RAR deve ser adicionada à mistura betuminosa, em laboratório ou na central de fabrico de misturas betuminosas, após o betume ser aplicado no misturador – primeiro agregados e fíler, posteriormente deve ser adicionado o betume convencional, e após o betume envolver adequadamente os agregados é adicionada a RAR. O ciclo de mistura terminará após se misturar mais cerca de 30 segundos, de modo a assegurar a adequada distribuição da RAR e sua absorção pelo betume.

A temperatura de mistura para misturas betuminosas com RAR é idêntica à utilizada para outros tipos de misturas betuminosas nas quais se adicionam aditivos (usualmente entre 170 °C e 180 °C). Contudo, se maiores percentagens de RAR forem utilizadas (tais como por exemplo 3,5 % numa mistura betuminosa rugosa), os agregados devem ser aquecidos a uma temperatura superior, para que a mistura atinja rapidamente a sua temperatura de mistura. Em laboratório, antes da compactação, a mistura de RAR com betume e agregados devem ficar na estufa durante cerca de 1 hora a 170 °C. Este procedimento simula o tempo que usualmente decorre desde o fabrico da mistura em central até a sua aplicação e compactação *in situ*. Durante este tempo a RAR está a activar o betume e a superfície dos agregados.

A RAR melhora as qualidades do betume. Partindo desta perspectiva, quanto maior a percentagem de RAR utilizada, melhor. Isto pode ser claramente observado no que foi mencionado anteriormente no ponto 5. Um melhoramento significativo das propriedades do betume pode ser observado quando a percentagem de RAR no betume combinado é superior a 15 %. Contudo, existe um ponto a partir do qual não existe betume convencional suficiente para envolver adequadamente os agregados, ou a viscosidade se torna demasiadamente elevada. Tal

irá causar um aumento do volume de vazios e do VMA após efectuada a compactação, para além dos limites aceitáveis. Tal pode ainda criar um envolvimento parcial dos agregados.

A experiência tem mostrado que deve sempre existir pelo menos cerca de 4 % de betume convencional (relativamente à massa total da mistura betuminosa) em qualquer tipo de mistura betuminosa, de modo a permitir que o betume envolva adequadamente os agregados e que a trabalhabilidade seja suficiente. Como tal, a diferença para a percentagem óptima necessária utilizando um betume convencional podem ser compensada com a utilização de RAR em substituição do betume. Como exemplo, se na formulação de uma mistura SMA for requerida a utilização de 6 % de betume, então na formulação da mistura SMA com RAR será expectável a utilização de 4 % de um qualquer tipo de betume convencional e 2 % de RAR (isto é 33 % do betume combinado). Numa mistura betuminosa densa, com uma percentagem óptima de betume de 5 %, pode ser utilizado 4 % de betume convencional e cerca de 1 % de RAR. A utilização base de 4 % de betume também depende da curva granulométrica da mistura betuminosa utilizada assim como da quantidade de agregados finos/grossos utilizados. Para qualquer caso, a percentagem óptima de betume combinado (RAR+betume) pode e deve ser determinado com qualquer tipo de método de formulação.

Como orientação genérica, seguidamente apresenta-se a percentagem de RAR no betume combinado e na massa total da mistura, para quatro tipos diferentes de misturas betuminosas:

- (i) Misturas betuminosas densas – 20 % do betume combinado ou 1 % relativamente à massa total da mistura betuminosa;
- (ii) Misturas SMA – 30 % do betume combinado ou 2 % relativamente à massa total da mistura betuminosa;
- (iii) Misturas betuminosas rugosas – 40 % do betume combinado ou 3 % a 4 % relativamente à massa total da mistura betuminosa;
- (iv) Misturas betuminosas abertas – 50 % do betume combinado ou 4 % a 5 % relativamente à massa total da mistura betuminosa.

Quando utilizadas misturas betuminosas com RAR, não é requerida a utilização de outros aditivos (fibras, polímeros modificadores, etc.). Tal deve-se ao facto da RAR ter sido formulada para melhorar a adesividade, a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente comparativamente a misturas betuminosas idênticas sem RAR. Por outro lado, quando consideradas misturas betuminosas temperadas, pode ser avaliação a adição de um aditivo adequado.

## 7 CONCLUSÕES E PRINCIPAIS VANTAGENS

Como descrito no artigo, a nova borracha reagida e activada – RAR (industrialmente conhecida como RuBind), é um ligante betuminoso modificado com borracha melhorado. A RAR é composta por betume convencional, granulado fino de borracha e por um estabilizador de betume do tipo filler mineral activo (*Activated Mineral Binder Stabilizer* - AMBS) em percentagens devidamente optimizadas. A RAR é produzida através da mistura a quente dos seus constituintes durante um curto período de tempo, sendo posteriormente realizada a activação através de um processo especialmente concebido para formar um granulado de borracha seco activado.

A RAR pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura betuminosa: densa; rugosa; aberta; do tipo SMA; etc., permitindo substituir parte do betume a utilizar, segundo diferentes proporções. A adição de RAR em central é efectuada directamente no misturador ou no tambor secador, imediatamente após a pulverização do betume, utilizando unidades de alimentação existentes (p.ex. alimentador de fibras para fabrico de misturas betuminosas do tipo SMA, etc.).

Segundo o estudo de investigação e desenvolvimento efectuado, é demonstrado que as misturas betuminosas fabricadas com RAR apresentam um desempenho superior comparativamente às misturas betuminosas convencionais, assim como relativamente a misturas betuminosas com betumes modificados ou com betume modificado com borracha (BB). Em geral, foi constatado que a RAR actua como um extensor elastómero do betume que modifica o betume puro aumentando o seu grau PG, a resiliência, a temperatura de amolecimento e

as suas propriedades após recuperado. Foi ainda possível constatar que para diferentes tipos de misturas betuminosas fabricadas com RAR, estas apresentam um desempenho superior no que concerne à estabilidade, resistência à deformação permanente e à fadiga, assegurando uma boa relação custo/benefício.

Seguidamente apresenta-se as principais vantagens da RAR como ligante betuminoso modificado com borracha a utilizar no fabrico de misturas betuminosas (comparativamente à tecnologia convencionalmente utilizada para modificação do betume com borracha):

- (i) Fabrico mais fácil e rápido. Não é necessária uma unidade de mistura como no caso do fabrico do BB ou na modificação com polímeros;
- (ii) Não é necessária a realização de ciclos de reaquecimento na central de fabrico de misturas ou no local de aplicação;
- (iii) O produto RAR é um material granulado seco – fácil de manusear, armazenar e transportar;
- (iv) Pode ser adicionado em qualquer central de fabrico de misturas betuminosas directamente no misturador ou no tambor secador;
- (v) Quando misturada a RAR com um betume convencional na central de fabrico de misturas betuminosas, é obtido um ligante betuminoso modificado com borracha com propriedades únicas, permitindo uma melhor resiliência e recuperação, assim como uma maior viscosidade e temperatura de amolecimento;
- (vi) Com o aumento da percentagem de RAR no betume combinado (RAR+betume) qualquer grau PG pode ser obtido (para ambos os indicadores, positivo ou negativo do grau PG);
- (vii) Com a correcta percentagem de RAR, qualquer tipo de mistura betuminosa com RAR pode ser fabricada (densa, rugosa, SMA, aberta, etc.);
- (viii) Possibilidade de fabrico de misturas betuminosas com ligante betuminoso modificado com borracha melhoradas (ainda com uma maior percentagem de borracha) que são mais resistentes, mais resilientes e exibem uma melhor recuperação, resistência à deformação permanente e resistência à fadiga;
- (ix) A RAR apresenta uma elevada eficiência podendo substituir as fastidiosas fibras celulósicas nas misturas do tipo SMA.
- (x) Podem ser fabricadas misturas betuminosas temperadas com a utilização de um aditivo adequado;
- (xi) Benefícios ambientais através da utilização de proporções elevadas de borracha (a partir da reciclagem de pneus usados) e menor energia gasta durante a produção do ligante betuminoso modificado com borracha;
- (xii) Boa relação custo/benefício comparativamente às misturas betuminosas convencionais ou com BB;
- (xiii) Agora um novo e melhorado ligante betuminoso modificado com borracha pode ser fabricado e implementado em qualquer obra, em qualquer país.

## **8 AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de agradecer à equipa de técnicos da CONSULPAV, o seu devoto trabalho laboratorial e respectiva análise dos dados durante as várias fases de investigação e desenvolvimento. Pretende-se agradecer igualmente às equipas de produção e de laboratório da Dimona Silica Industries – DSI pela dedicação na produção e controlo da qualidade da RAR. Agradecimentos especiais são prestados ao indispensável Mr. Ronen Peled, DSI CEO, pela sua valiosa ajuda e incentivo. Finalmente, agradecimentos são dados ao Dr. Geoffrey Rowe, Mr. George Way, Mr. Mats Norell e Dr. Shakir Shatnawi pela revisão detalhada e sugestões importantes efectuadas ao presente artigo.

## REFERÊNCIAS

1. Bendov, O. & Gingold, G., "iBind - Activated Mineral Stabilizer for SMA – Environmental Indicators Comparison" preparado para Dimona Silica Industries - DSI Ltd., ASSIF Strategies, Agosto 2010.
2. CALTRANS – State of California Department of Transportation, Division of Engineering Services, Office of Flexible Pavement "Asphalt Rubber Usage Guide", MS#5, Janeiro 2003.
3. CONSULPAV – Consultores e Projectistas de Pavimentos, Lda, "Study of European SMA 11 and South Carolina SMA 12.5 with PG-76 Bitumen – iBind vs. Fibers" Study Realized for DSI Israel, Report EST 10-02, Lisboa Portugal, Agosto 2010.
4. Ishai, I., Sousa J.B., Svehinsky, G. "Activated Minerals as Binder Stabilizers in SMA Paving Mixtures" Compendium, 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board – TRB, Washington DC, Janeiro 2011.
5. Ishai, I., Svehinsky, G. and Sousa J.B. "Introducing an Activated Mineral as Innovative Binder-Stabilizer for SMA Paving Mixtures" Compendium, International Road Congress on Innovation in Road Infrastructures", International Road Federation – IRF, Moscovo, Rússia, Novembro 2011.
6. Ishai, I. & Svehinsky, G. "A Road Test Comparing SMA Mixes with iBind vs. Cellulose Fibers – Overlaying of Access Road to the Revaya Quarry, Bet She'an Valley, Israel" preparado para DSI – Dimona Silica Industries, Agosto 2011.
7. Ishai, I., Svehinsky, G., Sousa J.B. "A Micro Ground Mineral Activated by NANO Molecules as Binder Stabilizer in SMA Paving Mixtures", the Second International Symposium on Asphalt Pavements & Environment. International Society of Asphalt Pavements (ISAP), Fortaleza Brazil, Outubro 2012.
8. JSTRI – Jiangsu Transportation Research Institute "The Test Report of Stone Mastic Asphalt Mixtures with iBind Additives", preparado para DSI Israel, Report No. 011908098, Nanjing China, Novembro 2010.
9. Smith, Mark, "Laboratory Report on the Evaluation of iBind as an Additive to Asphalt Mixtures" Akzo Nobel Surface Chemistry AB, Asphalt Applications, Stenungsund Sweden, Report No. 11007, Maio 2011.
10. Sousa, J.B. et al (Editors) – Proceedings, International Asphalt Rubber Conferences: AR2000 em Vilamoura, AR2003 em Brasília, AR2006 em Palm Springs e AR2009 em Nanjing.
11. Sousa, J.B. "Study of RuBind Stage 4 – Russian Bitumen", RuBindTM. CONSULPAV – Consultores e Projectistas de Pavimentos, Lda, Casais da Serra, Portugal, Junho 2012.
12. Sousa, J.B. & Silva, F. "Development Studies Study of RuBind Stage 5 – PG Grade Evaluation TA and TA2 RuBind Formulations", RuBindTM. CONSULPAV – Consultores e Projectistas de Pavimentos, Lda, Casais da Serra, Portugal, Junho 2012.
13. Sousa J.B., Ishai, I., Svehinsky, G. "Flexural Fatigue Tests and Prediction Models – Tools for Investigating SMA Mixes With New Innovative Binder Stabilizer", Third International Workshop on Four Point Bending (4PB), University of California em Davis CA, Setembro 2012.
14. Svehinsky, G., Ishai, I., Sousa, J.B. "Developing Warm SMA Paving Mixes Using Activated Mineral Binder Stabilizers and Bitumen Flow Modifiers" Proceedings, the Second International Conference on Warm Mix Asphalt, St. Louis Missouri, Outubro 2011.
15. Watson, D.E. & Moore, J.R. "Evaluation of SMA Mixture with iBind and Fibers" National Center for Asphalt Technology – NCAT at Auburn University, Alabama, Report No. 11-04, Agosto 2011.
16. Wu, C., Sousa, J.B., Li, A., Zhao, Z. "Activated Minerals as Binder Stabilizers in Middle Course's Asphalt Concrete Paving Mixtures", Compendium, 91th Annual Meeting of the Transportation Research Board – TRB, Washington DC, Janeiro 2012.