

# AVALIAÇÃO DUM SMA COM BORRACHA PARA POTENCIAL USO EM ANGOLA

Kapila S. S. Chissama <sup>1,2,\*</sup>, Luís G. Picado-Santos <sup>1</sup>

1. CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
2. Instituto Superior Politécnico, Universidade José Eduardo dos Santos, Huambo, Angola

\*Autor correspondente: Endereço de e-mail: kapila.chissama@gmail.com

---

O trabalho visa contribuir para a validação tecnológica duma mistura SMA 12.5 com borracha, fabricada pelo processo seco, e evitar a drenagem do betume, de modo a ser uma alternativa às fibras celulósicas dos SMA convencionais, procurando ainda melhorar a durabilidade da mistura SMA. Em laboratório realizaram-se ensaios quanto à sensibilidade à água, deformação permanente, deformabilidade, resistência à fadiga e envelhecimento. Concluiu-se que o SMA12,5 com borracha, é tecnologicamente utilizável, sem problemas perceptíveis de fabricação e construção. Pode constituir uma solução eficiente para ter pavimentos mais eficazes e duradouros para qualquer realidade para além da Angolana, alinhada a economia circular.

---

**Palavras-chave:** Camadas de desgaste de pavimentos; SMA; Borracha; Desempenho; Durabilidade.

## 1 INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste trabalho é contribuir para a validação funcional duma mistura SMA (Stone Mastic Asphalt) com borracha triturada, misturada pelo processo seco (taxa de incorporação média da borracha de 10%), e evitar a drenagem do betume, de modo a ser uma alternativa ao SMA convencional com fibras de celulose e melhorar a durabilidade geral. Permitirá obter maior eficiência na utilização dos recursos disponíveis (borracha triturada, por exemplo), constituindo uma mistura mais resistente às condições climáticas e à realidade do tráfego rodoviário intenso em Angola. A reciclagem da borracha também contribui para a economia circular angolana.

As misturas betuminosas do tipo SMA [1, 2] apresentam uma granulometria descontínua caracterizada por uma grande porção de agregados grossos, uma pequena porção de agregado de tamanho intermediário (2 e 4mm) e uma grande quantidade de filler. A percentagem de betume é geralmente em torno de 7%, sendo necessário adicionar um aditivo, geralmente fibra celulósica, para evitar a drenagem do betume e ajudar a fixá-lo na mistura. A fibra celulósica é tipicamente usada em uma percentagem da massa total entre 0,3% e 0,4%.

As misturas betuminosas SMA [3, 4 e 5] geralmente apresentam excelente resistência à deformação permanente e à fadiga, apresentando durabilidade atractiva devido ao mastic (enchimento mais betume) rico em betume que faz com que dure mais consistentemente do que no caso de uma mistura convencional, a conexão entre os agregados.

As dificuldades que a utilização do SMA pode causar no contexto angolano prendem-se com a necessária incorporação de fibras celulósicas uma vez que terão de ser importadas e gerar custos adicionais difíceis de suportar. No entanto, para minimizar esses custos adicionais, é importante estudar outras possibilidades que evitem as fibras sem riscos relacionados à drenagem do betume durante a construção ou deformação plástica precoce de um pavimento rodoviário [6].

A borracha triturada de pneus em fim de vida tem sido usada há várias décadas para melhorar as propriedades de misturas betuminosas. Três processos principais de adição de borracha triturada foram aplicados para produzir misturas betuminosas: adicionar a borracha pelo processo húmida, pelo processo seco ou fazer a mistura para ser usada em uma refinaria (terminal-blend na terminologia anglo-saxônica) [7, 8].

A borracha usada na mistura pelo processo via seca (introdução directa de granulado de borracha de pequena dimensão na misturadora) permaneceu uma mistura betuminosa de granulometria fortemente graduada. O papel

da fibra celulósica será feito pelo miolo de borracha [8]. Granulados de borracha (0/0,6-0,8 mm) são geralmente utilizados em uma percentagem de 10% a 20% em relação à massa total de betume [7].

Shen et al., [9] compararam o desempenho de oito misturas betuminosas porosas e quatro SMA, projectadas com borracha triturada pelo processo seco e húmido e betume de controle SBS. Para as misturas, os ensaios mediram o módulo dinâmico, a vida à fadiga, à deformação permanente e a perda de Cantabro. Os autores chegaram às seguintes conclusões:

- As propriedades volumétricas e de cisalhamento, suscetibilidade à humidade e perda de Cantabro do SMA atenderam aos requisitos da especificação, embora as profundidades de rutura do SMA emborrachado processado a seco tenham sido maiores do que as do controle SBS;
  - O módulo dinâmico do SMA emborrachado processado a seco não diferiu significativamente do de outros SMAs, independentemente de serem envelhecidos ou não envelhecidos;
  - A vida de fadiga do SMA emborrachado processado a seco não envelhecido ou envelhecido foi semelhante à do SMA processado a húmido, mas geralmente menor do que as amostras de SBS;
  - A perda de Cantabro tanto no SMA processado a seco quanto no húmido foi semelhante ao controle SBS modificado, independentemente da duração do envelhecimento;
  - O SMA processado a seco e os pavimentos de controle apresentaram boas condições após três anos de serviço.
- Nguyen & Tran [8] afirmaram que cerca de 30% de borracha triturada para um SMA com percentagem de betume de cerca de 5,5%, a resistência à deformação permanente é semelhante a SBS e as misturas betuminosas convencionais modificadas com borracha triturada.

A avaliação de alguns outros tipos de SMA, como um SMA híbrido seco com borracha granulada, usando um betume de base modificado com um elastômero e outros modificadores para produzir uma mistura quente (Sangiorgi et al., [10]), permitiu concluir que compara muito bem com SMA convencional. Este aspecto é principalmente verdadeiro quando se compara a ITS dinâmica (Indirect Tensile Strength), ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) e a perda Cantabro.

Estes trabalhos anteriores indicaram que parece valer a pena verificar se o SMA com borracha triturada adicionada pelo processo seco será a solução certa para a tecnologia angolana.

O processo para atingir o objectivo definido foi elaborado da seguinte forma:

- Quatro misturas estudadas em laboratório, incluindo o SMA com borracha triturada, outras duas do tipo SMA e uma mistura convencional para termos de comparação;
- Decisão sobre a fórmula de trabalho das misturas (agregados e betume);
- Caracterização laboratorial do desempenho das misturas e desempenho laboratorial após envelhecimento;
- Realização de uma Seção Experimental para avaliar principalmente as dificuldades de produção e aplicação do SMA com granulado de borracha e comparar o desempenho laboratorial da mistura colocada com as fabricadas em laboratório;
- Avaliação dos custos de construção da borracha triturada em comparação com a solução convencional para tecnologia angolana;
- Principais inferências e descrição dos desenvolvimentos ainda necessários.

## **2 METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Metodologia**

A avaliação foi planeada para validar e apoiar uma baixa percentagem de borracha triturada (10% da massa de betume) SMA para a tecnologia angolana. As razões para este facto são duas: o processo de fabricação das misturas deverá ser a seco, o único possível na tecnologia angolana para já, e o custo final de construção da mistura. Por um lado, a elevada percentagem de borracha (20% da massa de betume) das misturas SMA é arriscado de implementar pelo processo seco sem um rigoroso controlo de qualidade na produção e na colocação, o que não é, para já, compatível com as condições de trabalho normal angolano. Por outro lado, o custo final do SMA avaliado está em linha, conforme demonstrado neste artigo (Capítulo 3), com o tipo habitual de custos enfrentados pela tecnologia angolana.

Para fins de comparação de soluções, optou-se por usar o tipo regular de SMA com fibras celulósicas para resolver o problema de drenagem do betume. O mesmo para um SMA com pellets contendo fibras celulósicas e borracha. Ambos os tipos de SMA são mais caros do que o SMA com borracha triturada com menor teor de borracha. Por fim, novamente para fins de comparação, também foi estudada uma solução convencional de mistura a quente para a camada superficial, com granulometria semi-aberta para agregados e sem qualquer aditivo. Este material é a solução mais utilizada em Angola para camadas de desgaste.

As misturas avaliadas do tipo SMA foram SMAB-12.5, SMAVP-12.5 e SMAFEP-12.5 (CEN 13108-5 [11]). Como referência mais geral, foi avaliada uma mistura betuminosa convencional AC14[BBr] (NP EN 13108-1 [12]). Uma visão geral das misturas é a seguinte:

- SMAB-12.5 – SMA com Borracha com granulometria descontínua com tamanho nominal máximo de agregado de 12,5 mm;
- SMAVP-12.5 – SMA convencional com fibras celulósicas Viatop Premium e granulometria descontínua com tamanho nominal máximo de agregado de 12,5 mm;
- SMAFEP-12.5 – SMA convencional com fibras de celulose revestidas com borracha (FEP) e granulometria descontínua com tamanho nominal máximo de agregado de 12,5 mm;
- AC14[BBr] – Mistura betuminosa convencional com granulometria de agregados semi-aberta, com tamanho nominal máximo de agregado de 16,0 mm e utilizando a notação "AC14[BBr]".

Todas essas misturas são geralmente usadas em camadas de desgaste.

## 2.2 Materiais

### 2.2.1 Agregados e Betume

As misturas foram produzidas com agregados graníticos nas frações, "pó de pedra" 0/4 mm e "brita" 4/16 mm. O filer utilizado foi um comercial de origem calcária. As principais características dos agregados são apresentadas no Quadro 1.

O betume utilizado foi da classe de penetração nominal 50/70 (0,1mm), que é o tipo mais utilizado em Angola (IPQ, NP EN 12591 - [13]), sem qualquer modificação, cujas propriedades físicas obtidas em laboratório foram 55,9 (0,1mm) para penetração (a 25°C, agulha de 100g durante 5s) e 50,7°C para o ponto de amolecimento. A Figura 1 mostra a tendência da viscosidade do betume e os intervalos sugeridos pelo fornecedor para fabricação (150 a 190 mPa.s) e compactação (250 a 310mPa.s). Deste modo, o betume induziu a fabricação da mistura a uma temperatura variando entre 151 °C e 162 °C e a compactação da mistura entre 135 °C (a temperatura para a viscosidade de 310 mPa.s) e 141°C. As normas de caracterização utilizadas foram as europeias mandatadas em Portugal.

Quadro 1: Características principais dos agregados

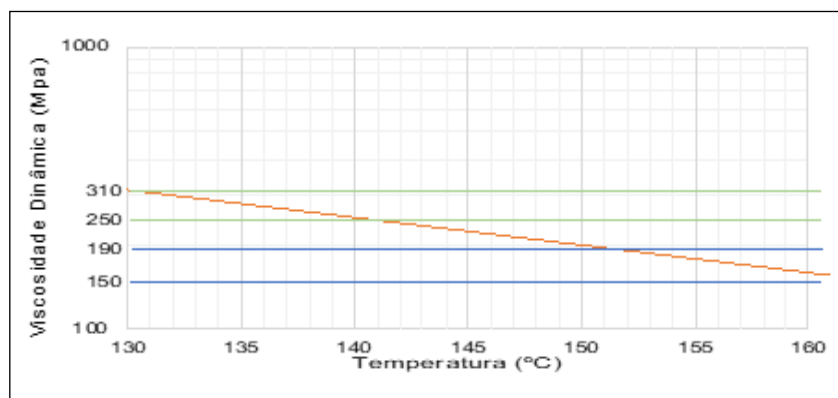
Properties		Standards	Gravel	Gravel	Gravel	Gravel
			8/20	4/12	4/10	0/4
Sand Equivalent		CEN EN 933-8 [14]	---	---	---	70
Methylene Blue		CEN EN 933-9 [15]	---	---	---	MB 0.6
Flakiness Index		CEN EN 933-3 [13]	FI15	FI15	FI15	---
Particle Dens	MI	NP EN 1097-6 [17]	2.63	2.62	2.63	2.61
	PSt		2.61	2.59	2.59	2.60
	PS		2.61	2.61	2.60	2.60
Water Absorption		NP EN 1097-6 [17]	0.40	0.70	0.50	0.20
Resistance to Fragmentation of Coarse Aggregate, Los Angeles Coefficient		CEN EN 1097-2 [16]	LA20	LA20	LA20	---

FI15 - Flakiness index do not exceed 15%

FI20 - Flakiness index do not exceed 20%

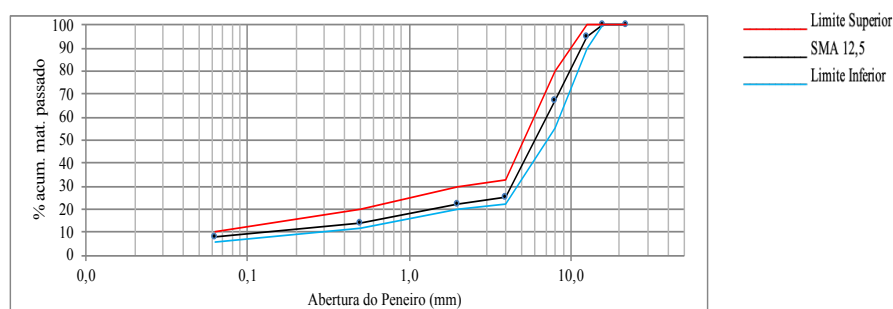
MB 0.6 - The methylene blue value does not exceed 0.6 g/kg

LA20 - Aggregate fractions do not exceed 20% of Los Angeles



**Figura 1: Resultados da viscosidade dinâmica do betume**

A granulometria das diferentes misturas SMA é apresentada na Figura 2, onde também são apresentados os limites indicados na Especificação Portuguesa de Construção. Para a produção de misturas, a granulometria dos agregados foi estabelecida de forma "farmacêutica", ou seja, os agregados inseriram a percentagem em peso estabelecida para cada peneiro em que a respectiva granulometria é desagregada, de forma a tornar as diferentes misturas tão homogêneas quanto possível em termos de composição.



**Figura 2: Curva granulométrica da mistura SMA 12,5.**

A percentagem de betume (em peso total) é apresentada no Quadro 2, para as misturas avaliadas. Deve-se sublinhar que a percentagem de betume é relativamente baixo (5,5% por peso total) quando comparado com algumas indicações estabelecidas, por exemplo provenientes do NAPA [27], foi estabelecido com base em um estudo de composição (ver seção 2.3.1). A decisão também foi equilibrada pela experiência de trabalhar com o esqueleto de agregado utilizado e visando uma percentagem total de betume (betume líquido mais borracha) próximo a 6%, para evitar um comportamento final mais macio para a mistura se fosse usado uma percentagem de betume maior.

### 2.2.1 Fibras e Borracha

O Quadro 2, apresenta a composição dos materiais das misturas analisadas neste estudo:

- Foram utilizadas fibras de celulose SMAVP-12.5, Viatop Premium (fornecidas pela JRS) [14], na percentagem de 0,25% (em relação ao peso total dos agregados);
- Foi utilizado SMAB-12.5, borracha granulada com dimensão 0/0,8mm (fornecida pela Biosafe), adicionada pelo processo seco, com taxa média de incorporação de 10% do peso total de betume;
- SMAFEP-12.5, foram utilizadas fibras de celulose com Viatop Plus FEP com borracha, que incorporou 20% de fibras de celulose e cerca de 80% de “aditivo funcional” não especificado pelo fabricante, diz-se que é essencialmente borracha (fornecido pelo JRS) [14], em um percentual de 0,9% (relativo ao peso total dos agregados)
- AC14[BBr], existe uma mistura convencional sem aditivos.

Os aditivos usados nas misturas SMA são apresentados na Figura 3.

Quadro 2: Composição dos materiais das misturas betuminosas do estudo

Mistura Betuminosa	Agregados Graníticos		Betume	Borracha - 0/0,8mm	Fibras de Celulose	Pellets VP FEP	Ligante Total <sup>(1)</sup>	Tempo de Interação
	(mm)	%	(por peso total)	(por peso total de betume)	(por peso total de agregados)	(por peso total de agregados)	(por peso total)	(Betume-Borracha)
SMAVP-12,5	0/4; 4/10 4/12; 8/20	94,22	5,50	***	0,254 <sup>(2)</sup>	***	5,528	***
SMAB-12,5	0/4; 4/10 4/12; 8/20	93,95	5,50	10	***	***	6,050	130
SMAFEP-12,5	0/4; 4/10 4/12; 8/20	93,66	5,50	***	0,18 <sup>(4)</sup>	0,9 <sup>(3)</sup>	6,170	***
AC 14 [BBr]	0/4; 4/10 4/12; 8/20	95,50	4,50	***	***	***	4,500	***

(1) betume de composição mais betume 50/70 adicional da pellet de fibra celulósica no caso do Viatop Premium (pellet com 90% de fibra celulósica e 10% de betume 50/70); betume de composição mais borracha no caso do SMA com borracha; betume de composição mais "aditivo funcional" no caso de VP FEP (pellet com 20% de fibra celulósica e 80% de "aditivo funcional" não especificado pelo fabricante, sendo dito que é no essencial borracha)

(2) só a fibra celulósica da pellet do Viatop Premium (90% da pellet adicionada)

(3) pellet com 20% de fibra celulósica e 80% de "aditivo funcional" não especificado pelo fabricante, sendo dito que é no essencial borracha

(4) só a fibra celulósica da pellet do Viatop Premium (20% da pellet adicionada)



Figura 3 – Aditivos usados nas misturas betuminosas SMA: a) Fibras de celulose Viatop Premium; b) Fibras de celulose revestidas com borracha Viatop Plus FEP; c) Borracha

As fibras celulósicas (Viatop Premium) para SMAVP-12.5 têm o nome comercial de Arbocell ZZ 8/1 [14], que é o mesmo para o pellet composto (fibras celulósicas e borracha) descrito para SMAFEP-12.5. A borracha granulada para SMAB-12.5, teve a granulometria apresentada no Quadro 3.

Quadro 3: Distribuição de tamanho de partícula para a borracha triturada

Abertura do Peneiro (mm)	Porcentagem Passada (%)
0,8	100
0,5	69
0,25	17
0,063	0

## 2.3 Métodos

### 2.3.1 Considerações Iniciais

A composição das misturas foi estabelecida usando a metodologia Marshall (CEN EN12697-34, 2012 [22]). Além disso, seu comportamento mecânico, com e sem envelhecimento, foi avaliado em laboratório. Este estudo foi dividido em quatro fases:

- Fase 1: Definição do teor ótimo de betume;
- Fase 2: Avaliação da sensibilidade à água;
- Fase 3: Avaliação do comportamento relacionado à deformação permanente, deformabilidade e fadiga.
- Fase 4: No processo de envelhecimento de misturas betuminosas utilizou-se a metodologia TEAGE [23] e posteriormente fez a avaliação de desempenho como na Fase 3.

A composição dos materiais das misturas betuminosas utilizadas neste estudo é apresentada na Quadro 2. Os métodos usados nos ensaios de desempenho realizados, utilizou-se os procedimentos propostos nas normas europeias aplicáveis, cuja referência está indicada na Quadro 4 [15,16,17,18,19,20,21]. O ensaio de afinidade

entre o agregado e o betume [15] e o ensaio de escorrimento do betume foram realizados também nas misturas SMA (CEN EN 12697-18 [17]).

### 2.3.2 Definição da Percentagem de Betume

Para o estudo de Marshall, foram consideradas as percentagens de betume de 5,0%, 5,5% e 6,0% para a mistura betuminosa SMAVP-12,5, obtendo-se uma percentagem óptima de betume de 5,5%, que foi a percentagem de betume utilizado em todas as outras misturas do tipo SMA. Para a mistura convencional AC14[BBr], foram utilizadas percentagens de betume de 4,0%, 4,5% e 5,0%, obtendo-se uma percentagem óptima de betume de 4,5%.

Na produção das misturas betuminosas em laboratório, utilizou-se a temperatura do betume de cerca de 155°C para aquecer o betume antes da fabricação e cerca de 140°C para a compactação. Todos os agregados foram previamente aquecidos a 175°C.

Para a mistura SMAB-12.5, antes de adicionar o ligante aos agregados minerais, os granulados de borracha foram misturados com os agregados aquecidos por cerca de 15 segundos, adicionando o ligante em seguida. Após a mistura dos materiais, observou-se um tempo de digestão de 130 minutos entre betume e borracha. A mistura betuminosa foi colocada em estufa à temperatura de 146°C. Desta forma, foi garantido o tempo necessário de interação física entre o betume e os granulados de borracha. Após esta etapa, a mistura foi compactada.

### 2.3.3 Caracterização Mecânica das Misturas

Todas as misturas deste trabalho foram caracterizadas quanto a sensibilidade à água, à deformação permanente, à deformabilidade, à fadiga e ao envelhecimento. No módulo de deformabilidade utilizou-se uma amplitude de deformação de 50µm/m, com as frequências de 1Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz e 30Hz. Os ensaios de resistência à fadiga foram realizados através de ensaios de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos. Os ensaios do módulo de deformabilidade foram realizados a temperaturas de 20°C e 30°C. As temperaturas de ensaio escolhidas, foram aplicadas antes do ensaio de fadiga.

Os ensaios de fadiga foram realizados sob condições controladas por extensão. Para todas as misturas betuminosas, os níveis de extensão selecionados foram: 200, 300 e 400µm/m e a frequência de ensaio foi 10,0Hz.

No Quadro 4, apresentam-se as normas de ensaio e metodologias utilizadas na caracterização mecânica das misturas.

Quadro 4: Normas de ensaio e metodologias utilizadas na caracterização mecânica das misturas

Ensaio	Norma	Método
Sensibilidade à Água - ITRSR (Via Resistência à Tracção Indirecta)	EN12697-12[21]; EN12697-23[24]	Método A - ITRSR (Compressão Diametral)
Módulo de Deformabilidade	EN12697-26[26]	Flexão em Quatro Pontos em Provetes Prismáticos
Resistência à Fadiga	EN12697-24[25]	Flexão em Quatro Pontos em Provetes Prismáticos
Deformação Permanente	EN12697-22[23]	Wheel Tracking - (Dispositivo de Pequeno Tamanho - No Ar)
Afinidade entre o Betume e o Agregado	EN12697-11[20]	Método da Garrafa Rolante
Escorrimento do Betume	EN12697-18[22]	Método de Schellernberg

### 2.3.4 Envelhecimento das Misturas

O processo de envelhecimento das misturas betuminosas foi realizado pelo método TEAGE - Tecnico Accelerated Aging, descrito em Crucho et al. [23, 24]. Em resumo, a simulação em laboratório do TEAGE usa duas acções que afectam o envelhecimento de misturas betuminosas como parte de um pavimento: radiação solar e danos por humidade. Para simular tais acções, o TEAGE utiliza uma combinação de radiação UV e ciclos de rega/secagem. Durante a simulação TEAGE, as amostras de misturas betuminosas estão continuamente sujeitas à radiação UVB e ciclos de rega (por imersão das amostras)/secagem. Para isso, foi assumida e validada uma equivalência entre a energia recebida pelo pavimento real devido à radiação solar UVB e a energia transmitida aos provetes pelas lâmpadas TEAGE UVB utilizadas. Esta suposição validada reduz consideravelmente o período de condicionamento para obter um efeito real semelhante. A aplicação de ciclos de rega/secagem para simular a ocorrência de um caudal de água superficial, suficiente para provocar um efeito de desgaste específico,

o limiar mínimo admitido foi a precipitação diária superior a 5mm. Assim, durante o condicionamento, um percentual específico de tempo de imersão será aplicado aos provetes. Para ajustar o condicionamento TEAGE para as condições climáticas do local do campo, deve-se conhecer a energia total recebida devido à radiação solar e distribuição de precipitação. Neste trabalho, o envelhecimento foi simulado durante cerca de sete anos, utilizando a região do Huambo em Angola como local alvo. Esta é também a região onde foi realizada o “trecho experimental”.

### 2.3.5 Afinidade entre o Betume e o Agregado

Os ensaios de afinidade entre o agregado e o betume foram realizados de acordo com a norma CEN EN12697-11 [15]. Os resultados dos ensaios de afinidade mostraram, em geral, uma baixa afinidade dos agregados graníticos com o ligante asfáltico convencional. A Figura 4 apresenta a evolução da cobertura dos agregados ao longo do tempo de ensaio. Observou-se que a mistura agregado-betume apresentou baixo desempenho em termos de afinidade em ambas as avaliações, após 6 e 24 horas, respectivamente. No entanto, estes resultados estão de acordo com os que caracterizam o tipo de agregado efectivamente utilizado na tecnologia de pavimentação de Angola, levando à continuação do estudo sem qualquer alteração para aumentar a afinidade.

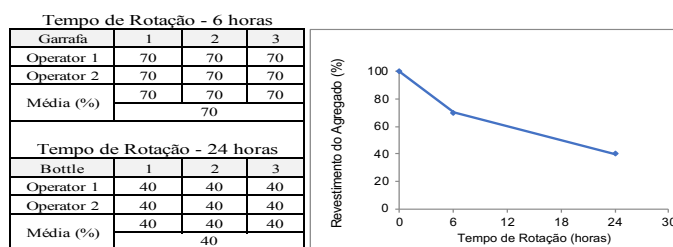


Figura 4 – Resultados do ensaio de afinidade entre o betume e o agregado

### 2.3.6 Drenagem do Betume

A mistura betuminosa do tipo SMA, com uma forte granulometria de agregados descontínuos e um teor de ligante médio a alto, precisa ser verificado pelo ensaio de drenagem do betume. Este ensaio permite a necessidade de ajustar o aditivo utilizado (uma fibra celulósica comum ou outra como borracha triturada) para manter o betume na mistura. Neste estudo, este ensaio foi realizado de acordo com a EN 12697-18 [17], o chamado método de Schelleberg. O Quadro 5 apresenta os resultados para as três misturas do tipo SMA avaliadas neste estudo. A quantidade média de material drenado (D médio) ao final do ensaio foi muito baixa, portanto nenhuma das misturas apresentou qualquer problema quanto a esta situação. O AC14[BBr] como mistura convencional não precisa ser verificado neste aspecto.

Quadro 5: Resultados dos ensaios de drenagem do betume

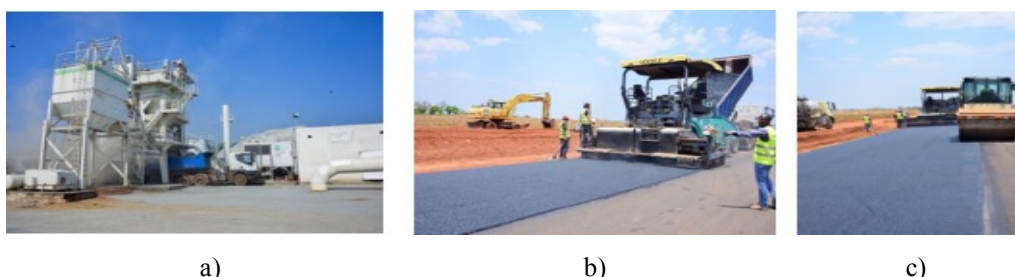
Nº Provette	SMAB-12,5						
	W <sub>1</sub> (g)	W <sub>2</sub> (g)	W <sub>3</sub> (g)	W <sub>4</sub> (g)	R %	D %	D médio %
1	280,60	1010,65	281,10	0,00	0,0	0,1	0,1
2	279,30	1116,90	280,30	0,00	0,0	0,1	
3	292,45	1234,15	293,15	0,00	0,0	0,1	
SMAVP-12,5							
4	280,60	1010,65	281,10	0,00	0,0	0,1	0,1
5	279,30	1116,90	280,30	0,00	0,0	0,1	
6	292,45	1234,15	293,15	0,00	0,0	0,1	
SMAFEP-12,5							
7	280,20	1000,30	280,95	0,00	0,0	0,1	0,1
8	278,90	1000,20	279,80	0,00	0,0	0,1	
9	292,20	1000,40	293,05	0,00	0,0	0,1	

W<sub>1</sub> é a massa do provete vazio, em gramas (g);  
W<sub>2</sub> é a massa do provete mais a mistura, em gramas (g);  
W<sub>3</sub> é a massa do provete mais o material retido após virar, em gramas (g);  
W<sub>4</sub> é a massa do resíduo seco retido no peneiro, em gramas (g).  
R é o resíduo no peneiro, em percentagem (%);  
D é o material drenado, em percentagem (%);  
Dmédio é a média do material drenado, em percentagem (%).

### 2.3.7 Trecho Experimental

A fim de se realizar uma validação técnica dos resultados em laboratório e perceber quais os problemas que a produção e colocação da mistura SMAB-12.5 levantariam em relação a um AC14 convencional, foi realizada um trecho experimental à escala real em Angola. A Figura 5 mostra três fotografias de diferentes fases de produção das misturas e construção da secção.

As lajes para extrair os provetes prismáticos necessários (vigas) foram obtidas por corte do pavimento após compactação e resfriamento. Os cortes foram feitos em zonas específicas do pavimento onde a ligação com a camada inferior foi eliminada usando película de papel entre as duas camadas.



**Figura 5 – Trecho Experimental com SMA 12,5 com Borracha (CRSMA-12,5): a) Fabrico e transportação; b) Espalhamento; c) Compactação**

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como já dito, em laboratório, as misturas foram avaliadas à sensibilidade à água, à deformabilidade, à fadiga, à deformação permanente e ao envelhecimento.

O Quadro 7 apresenta os resultados para:

- ITSr (média de 4 provetes seco e molhado);
- Baridade Máxima Teórica (média de 4 provetes e mostrou apenas para razões de comparação / interpretação);
- Indicador de Ensaio de Schellemborg (3 provetes para cada mistura de acordo com EN 12697-18 [17], ensaio de drenagem do betume);
- Ensaio Wheel Tracking (2 lajes para cada mistura);
- Módulo de Deformabilidade (média de 3 vigas, novamente, por razões de comparação);
- Fadiga (18 provetes, 6 para cada nível de tensão para obter a lei de fadiga, permitindo a computação de  $\epsilon_6$  correspondente à tensão para  $10^6$  ciclos de carga).

A partir da análise dos resultados no Quadro 6, parece que o SMAB-12.5, em termos de desempenho mecânico, apresenta resultados favoráveis quando comparados ao SMAVP-12,5 e ao AC14 [BBr], permitindo admitir que mecanicamente é uma solução eficiente, mesmo para altas temperaturas de serviço. Nesta discussão, não foi incluído os resultados para o SMAFEP-12,5, que apresentaram resultados laboratoriais acima dos outros três avaliados, mas, devido ao seu custo de implementação para o mercado angolano, não é uma alternativa real.

No que diz respeito aos custos directos (fabricação e colocação), a mistura betuminosa SMA com Borracha triturada (SMAB-12,5) tem valores mais elevados em comparação com uma mistura betuminosa rugosa convencional AC14.

No Quadro 6 apresenta-se a comparação com outros SMA convencionais com borracha-modificada para ilustrar o nível de desempenho do SMAB-12,5.

De acordo com [25], a diferença na percentagem de betume mais o uso de borracha para modificar o betume (8,6 percentagem de betume mais 21,8% de borracha, referente à percentagem de betume) implica uma diferença nos custos, a preços correntes de aproximadamente 30% a mais, em comparação com uma mistura betuminosa contínua convencional (cerca de 5,5% de percentagem de betume). No caso do SMA 12,5 (SMAB-12,5) deste estudo, onde tem 5,5% de betume e 10% de incorporação de borracha, pode-se inferir de indicações de Picado-Santos et al. [25] que a diferença para a AC14 convencional será de cerca de 15/20%. Tendo um custo do material maior que 20%, mantendo a espessura de 5cm e considerando o mesmo custo para aplicação, o custo global adicional no Quadro 8 será de cerca de 3,4%.



Por outro lado, de acordo com [26], a diferença na percentagem de betume, mais o uso de fibras de celulose Viatop Premium implica uma diferença nos custos, a preços actuais, para a mistura final de aproximadamente 40% a mais para o SMA-12,5 Convencional Viatop Premium (SMAVP-12.5) em comparação com uma mistura betuminosa convencional, AC 14 [BBr]. Este custo adicional ainda seria significativamente maior no caso da SMA 12,5 com fibras de celulose revestidas de borracha (SMAFEP-12.5).

Embora o custo do SMA-12,5 com Borracha (SMAB-12,5) seja maior do que uma mistura convencional (3,4% por 1 km de estrada), é uma mistura que suporta melhor à acção dos veículos mais pesados devido a estrutura esquelética do agregado. Também deve ser ressaltado que a durabilidade no SMA com a Borracha é muito mais efectiva devido a um mástique mais rico em betume e borracha que cria uma película de protecção aos agregados muito mais resistente ao envelhecimento [26], tendo também apresentado melhor resistência à fadiga.

A Figura 6, apresenta as pontuações globais calculadas, para o SMAVP-12,5, SMAB12,5 e o AC14[BBr]. Conforme já destacado, o SMAB-12,5 apresentou melhor pontuação. Um aspecto interessante é que o AC14[BBr] apresentou uma melhor pontuação do que o SMAVP-12,5. Isso se deve a uma melhor resposta sob o Wheel Tracking a temperatura de ensaio de 60°C. Este facto provavelmente está relacionado a menor percentagem de betume do AC14[BBr], induzindo no esqueleto do agregado uma melhor resposta às condições Wheel Tracking, causando um melhor resultado final quando comparado ao SMAVP-12,5. Existe uma alta probabilidade de que a 45 a 50°C (mais provável de acontecer como o limite de alta temperatura para as condições do centro de Angola), a diferença será superada pelo SMAVP-12,5 devido ao comportamento do betume nas condições do ponto de amolecimento (muito mais viscoso) e assim uma melhor resposta às condições Wheel Tracking.

Quadro 6 – Comparação com outra abordagem [6] para definir um SMA com borracha triturada

Mistura Betuminosa	Tipo de Betume	Betume	Borracha 0-0,8mm	Fibras de Celulose	Betume Total	ISTR	WTS	Schelleberg
		(por peso total)	(por peso total)	(por peso total)	(por peso total)			
	%	%	%	%	%	%	mm/10 <sup>3</sup> ciclos	%
SMA-11-cf	modificado com SBS (45/80-65)*	5,9	...	0,31	6,20	95,5	0,084	0,14
SMAB-12,5	convencional (50/70)	5,5	10	...	6,05	72,0	0,161	0,10
SMA-11-cr	modificado com SBS (45/80-65)**	5,9	12	...	6,61	96,9	0,038	0,05

\* betume modificado com SBS mostrando a Penetração de 53 (0,1mm) e Anel e Bola de 65,2°C.

\*\* betume modificado com SBS mostrando a Penetração de 51 (0,1mm) e Anel e Bola de 66,3°C.

Quadro 7 – Resultados dos Ensaio das Misturas do Estudo: ITSR, Baridade Máxima Teórica, Schelleberg, Wheel Tracking, Módulo de Deformabilidade e Fadiga

Designação	Misturas Betuminosas																		
	ITSR	Bar. Máx.	Schelleberg	Wheel Tracking		Modulos de Deformabilidade - 20°C						Modulos de Deformabilidade - 30°C						Fadiga - 20°C	
				mrd*	WTS*	1 Hz	3 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	30 Hz	1 Hz	3 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	30 Hz	10 Hz	
	%	kg/m <sup>3</sup>	%	mm	10 <sup>3</sup> ciclos	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
SMAVP-12,5	51	2378,3	0,1	11,4	0,819	1551	2454	2889	3580	4386	4898	516	817	994	1287	1687	1990	182	
SMAB-12,5	72	2446,9	0,1	4,28	0,161	2434	3329	3865	4635	5483	6017	927	1382	1704	2178	2743	3067	187	
SMAFEP-12,5	66	2416,5	0,1	2,46	0,090	3051	4044	4585	5380	6274	6785	906	1302	1537	1845	2446	2735	196	
AC14 [BBr]	70	2521,3	-	5,62	0,311	1884	2896	3453	4217	5222	5858	550	870	1090	1447	1923	2237	172	
Misturas Betuminosas Envelhecidas no TEAGE																			
SMAB-12,5 - Env. TEAGE	-	-	-	-	-	3859	5082	5584	6447	7619	8191	1221	1744	2037	2504	3069	3466	195	
AC14 [BBr] - Env. TEAGE	-	-	-	-	-	2977	3988	4555	5400	6322	6863	996	1464	1729	2194	2795	3118	157	
SMAVP-12,5 - Env. TEAGE	-	-	-	-	-	2213	3044	3501	4161	5004	5340	785	1192	1429	1788	2287	2543	171	
Trecho Experimental - Angola																			
SMAB-12,5 - TE	-	-	-	9,29	0,450	2480	3196	3571	4130	4673	5044	-	-	-	-	-	-	210	

mrd\* - profundidade máxima da rodeteira; WTS\* - Wheel Tracking no ar.

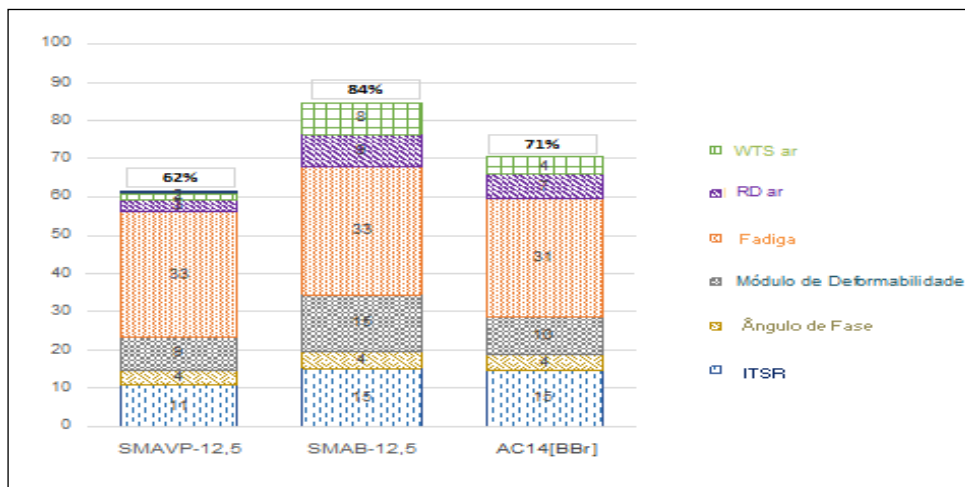


Figure 6 – Indicador Global de Desempenho: SMAVP-12,5, SMAB-12,5, e AC14 [BBr]

Quadro 8: Custos médios de construção de estrada em Angola com plataforma de 9,0m de secção transversal por 1km de comprimento

Designação	Custo do Material	Custo de Aplicação	Custo Total
			(€)
Aterros Solos de Empréstimos (e=0,40m)	1,351 €/m <sup>3</sup>	1,185 €/m <sup>3</sup>	9129,600
Brita 2 (e=0,20m)	34.432 €/m <sup>3</sup>	2,084 €/m <sup>3</sup>	65728,800
Tout Venant (e=0,30m)	32,853 €/m <sup>3</sup>	2,951 €/m <sup>3</sup>	96670,800
Rega de Impregnação	1,152 €/m <sup>2</sup>	0,088 €/m <sup>2</sup>	11160,000
Macadame (e=5cm)	222,631 €/m <sup>3</sup>	30,429 €/m <sup>3</sup>	113877,000
Rega de Colagem	0,601 €/m <sup>2</sup>	0,088 €/m <sup>2</sup>	6201,000
Camada de Desgaste (e=5cm)	222,631 €/m <sup>3</sup>	30,429 €/m <sup>3</sup>	113877,000
Drenagem	-	-	26522,313
Sinalização Horizontal e Vertical	-	-	11371,109
Lancil de Passeio (25x15/12)	6,845 €/ml	11,666 €/ml	18511,000
Passeios em Betonilha	9,136 €/m <sup>2</sup>	0,647 €/m <sup>2</sup>	88047,000
Rede de Iluminação Pública	-	-	20883,268
Custo médio total estimativo por Km de Estrada em Angola (AC 14):			581978,890
Largura da Estrada: 9,00m			
Comprimento da Estrada: 1.000,00m			

## 4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objectivo contribuir para a validação técnica de uma mistura SMA com Borracha para constituir uma alternativa às fibras de celulose e, eventualmente, melhorar a durabilidade global da mistura betuminosa SMA. A mistura SMA com Borracha foi avaliada para ser aplicada em Angola, um país com temperaturas quentes e tráfego intenso. Em termos de produção, o SMA com Borracha não implica importar qualquer material elementar.

A partir da análise geral dos resultados obtidos em laboratório, pode-se extrair as seguintes principais inferências:

- O SMAB-12,5, apresentou melhores indicadores quando comparado com o SMAVP-12,5 e com AC14 [BBr], nomeadamente para deformação permanente (respectivamente 250% e 64% melhor), para o módulo de deformabilidade (respectivamente 80% e 60% melhor), para fadiga (respectivamente igual e 6% melhor), e para a sensibilidade à água (respectivamente 36% melhor e igual).
- Após o processo de envelhecimento no TEAGE [23], os resultados para o módulo de deformabilidade (respectivamente 36% melhor e 15% melhor) e para a fadiga (respectivamente 13% melhor e 25% melhor), permitindo ressaltar que o SMAB-12,5 melhorou o comportamento com o envelhecimento em relação as outras duas misturas.
- Em termos de drenagem de betume, o SMAB-12,5 apresentou um desempenho semelhante aos outros tipos de SMA, mostrando que será adequado para ser usado na prática.

- Sobre as questões de produção e construção do SMAB-12.5, o Trecho Experimental executado não levantou qualquer questão especial em comparação com um AC14[BBr] convencional, indicando que nenhuma adaptação especial deve ser implementada ao construir com o SMAB-12.5. Em termos de desempenho mecânico, todos resultados indicaram que o SMAB-12,5-TE (amostras obtidas do Trecho Experimental) realizaram-se em linha com o que foi referido como SMAB-12.5.
- O SMAB-12,5, comparado com outro SMA semelhante (Quadro 6), mostrou que também poderia fornecer um ajuste para praticar o comportamento sendo menos caro (usando betume convencional em vez de betume modificado com SBS e aditivo para melhorar a afinidade).
- Espera-se um aumento de custos de cerca de 3 ou 4% por m<sup>2</sup> (avaliação realizada para 9000 m<sup>2</sup>) ao usar o SMAB-12,5 em vez de AC14 [BBr]. No entanto, é também esperado uma melhoria da vida útil de pelo menos de 20% [25].

Em resumo, face os resultados apresentados, pode-se presumir que o SMAB-12,5 é tecnologicamente utilizável, sem quaisquer problemas notáveis de fabricação e construção. Além disso, sendo a borracha obtida de pneus em fim de vida, a solução é mais sustentável e de acordo com uma economia circular mais eficiente. Com um comportamento mecânico semelhante ao indicado pelo estudo laboratorial, o SMAB-12,5 pode constituir uma solução válida para ter pavimentos mais eficazes e duráveis na tecnologia angolana ou em qualquer outra realidade.

## 5 AGRADECIMENTOS

À CEPESA pelo fornecimento de betume, à Lena pelo fornecimento dos agregados e à JRS pelo fornecimento das fibras de celulose Viatop Premium e as fibras de celulose Viatop PLUS FEP, ao Grupo Elevo, pela cooperação e por ter aceite e patrocinado o Trecho Experimental realizado em Angola, ao INEA por autorizar a construção do Trecho Experimental e ao Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do IST pelo apoio inestimável na concretização de todos os ensaios necessários.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] Martinho, F.; Picado-Santos, L.; Neves, J.; (2013). “Efeitos da adição de fibras celulósicas e misturas recicladas no desempenho de misturas betuminosas temperadas” (Effect of the addition of cellulosic fibres and RAP on the performance of asphalt warm-mixes). Actas do XVII Congresso Ibero-Latinamericano do Asfalto, artigo 134-3-13, Antigua, Guatemala. [In Portuguese]
- [2] Spanish Centre for Public Works Studies and Experimentation (CEDEX, 2015). “SMA Mixtures Draft Specifications (SMA-DS)”. Environment Friendly Asphalt Mixture Project, 2015. <[http://www.proyectosma.eu/modules/mastop\\_publish/files/files\\_524aeb98888f4.pdf](http://www.proyectosma.eu/modules/mastop_publish/files/files_524aeb98888f4.pdf)>, Last access to information, July 1, 2015.
- [3] Lekhaz, D.; Saravanan, K.; Goutham, S.; (2020). Effect of rejuvenating agents on Stone Matrix Asphalt mixtures incorporating RAP. *Construction and Building Materials*, 254 (2020) 119298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119298>
- [4] Moghades Nejad, F., Aflaki, E., Mohammadi, A., (2010). “Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures”. *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 1158–1165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.025>
- [5] Woodward, D., Millar, P., Lantieri, C., Sangiorgi, C., Vignali, V, (2016). “The wear of Stone Mastic Asphalt due to slow speed high stress simulated laboratory trafficking”. *Construction and Building Materials*, 110 (2016) 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.031>
- [6] Manosalvas-Paredes, M.; Gallego, J.; Saiz, L.; Bermejo, J. (2016). Rubber modified binders as an alternative to cellulose fiber – SBS polymers in Stone Matrix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 121 (2016) 727–732. *Construction and Building Materials* 121 (2016) 727–732 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.028>
- [7] Picado-Santos, L.; Capitão, S.; Neves, J.; (2020). “Review – Crumb Rubber Asphalt Mixtures: A Literature Review. *Construction and Building Materials* 247 (2020) 118577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577>
- [8] Nguyen, H. & Tran, N., (2018). Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of asphalt concrete and stone mastic asphalt using dry process. *International Journal of Pavement Research and*

Technology., 11, 236–244.

<https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.014>.

[9] Shen, J.; Xie, Z. & Li, B.; (2015). Comprehensive Evaluation of the Long-Term Performance of Rubberized Pavement: Phase II, The Influence of Rubber and Asphalt Interaction on Mixture Durability. Georgia Department of Transportation, GDOT Research Project No. 12-29 (performed by College of Engineering and Information Technology, Georgia Southern University), Forest Park, GA-USA.

[10] Sangiorgi, C.; Tataranni, P.; Simone, A.; Vignali, V.; Lantieri, C.; Dondi, G.; (2018). Stone mastic asphalt (SMA) with crumb rubber according to a new dry-hybrid technology: A laboratory and trial field evaluation. *Construction and Building Materials* 182 (2018) 200–209.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.128>

[11] CEN EN 13108-5, (2016). Bituminous Mixtures - Material Specifications - Part 5: Stone Mastic Asphalt. European Committee for Standardization, Brussels.

[12] IPQ, NP EN 13108-1, (2011). Misturas betuminosas Especificações dos materiais Parte 1: Betão betuminoso (Bituminous mixtures – Material specifications – Part 1: Asphalt concrete).

[13] IPQ, NP EN 12591, (2011): Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação (Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens).

[14] JRS, (2021). [https://www.jrs.eu/jrs\\_en/fiber-solutions/bu-road-construction/products/](https://www.jrs.eu/jrs_en/fiber-solutions/bu-road-construction/products/)

[15] CEN EN12697-11, (2012). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen”.

[16] CEN EN12697-12, (2008). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens”. European standard. European Committee for Standardization.

[17] CEN EN12697-18, (2004). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 18: Binder drainage.

[18] CEN EN12697-22, (2003) + A1, (2007). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking. European standard. European Committee for Standardization.

[19] CEN, EN12697-23, (2017). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.

[20] CEN EN12697-24, (2012). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue. European standard. European Committee for Standardization.

[21] CEN EN12697-26, (2012). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness. European standard. European Committee for Standardization.

[22] CEN EN12697-34, (2012). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall Test. European standard. European Committee for Standardization.

[23] Crucho, J., Picado-Santos, L.; Neves, J.; Capitão, S.; Al-Qadi, I.; (2020). “Tecnico accelerated ageing (TEAGE) – a new laboratory approach for bituminous mixture ageing simulation”. *International Journal of Pavement Engineering*, 21, 753-765.

<https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1508845>

[24] Crucho, J.; Picado-Santos, L.; Neves, J.; Capitão, S.; (2020). The TEAGE ageing method for asphalt mixtures. *Transportation Engineering* 2 (2020) 100030.

<https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100030>

[25] Picado-Santos, L.; Capitão, S.; Feiteira, J.; (2019). “Crumb Rubber Asphalt Mixtures by Dry Process: Assessment after Eight Years of Use on a Low/Medium Trafficked Pavement”. *Construction and Building Materials*, 215 (2019) 9-21.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.129>

[26] Martinho, F.; (2020). “Validação Laboratorial de um Mástique Modificado Inovador para a Produção de Misturas Betuminosas mais Sustentáveis”. Tese de Doutoramento em Engenharia de Materiais, IST, 2020.

[27] NAPA (2002). “Designing and Constructing SMA Mixtures—State-of-the-Practice”. National Asphalt Pavement Association (NAPA), QIP 122, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Maryland, USA.