

MISTURAS BETUMINOSAS DO TIPO SMA – A EXPERIÊNCIA DA MOTA-ENGIL ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO

João Afonso¹ e Luís Gomes²

¹Mota-Engil Engenharia e Construção, Direção Coordenação Técnica Rodoviária – Núcleo Técnico de Pavimentos, Rua do Rego Lameiro 38, 4300-454, Porto, Portugal

email: joao.afonso@mota-engil.pt <http://www.mota-engil.pt>

²Mota-Engil Engenharia e Construção, Direção Coordenação Técnica Rodoviária, Rua do Rego Lameiro 38, 4300-454, Porto, Portugal

Sumário

As misturas betuminosas do tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) têm tido uma aplicação cada vez maior em Portugal. Com a necessidade de manter a rede de estradas nacional desenvolvida no nosso país nos últimos anos, as misturas SMA constituem uma excelente opção, apresentando um elevado desempenho mecânico (devido ao imbricamento dos agregados e à superior quantidade de betume utilizada na sua formulação) e excelentes características superficiais. Sendo misturas betuminosas com aplicação algo recente em Portugal, a Mota-Engil Engenharia e Construção apresenta a sua experiência na formulação e aplicação deste tipo de misturas, dando ênfase a alguns dos resultados de ensaios laboratoriais e da auscultação dos pavimentos.

Palavras-chave: *Stone Mastic Asphalt*, elevado desempenho, características funcionais, controlo laboratorial

1 INTRODUÇÃO

As misturas betuminosas do tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*) tiveram origem na década de sessenta na Alemanha, sendo que o objetivo inicial que levou ao seu desenvolvimento foi o de criar uma mistura mais resistente ao desgaste provocado pelos pneus com pitons utilizados em zonas e épocas com gelo. Com o desenvolvimento destas misturas constatou-se que apresentavam uma melhor resistência às deformações permanentes e uma maior durabilidade, tendo-se generalizado a sua utilização principalmente nos países no norte da Europa. Em Portugal, só no ano de 2004 foram aplicadas as primeiras misturas betuminosas do tipo SMA [1].

As misturas SMA possuem granulometria descontínua, com um elevado imbricamento entre os agregados, em que os vazios são preenchidos por mástique betuminoso. São produzidas incorporando uma percentagem de betume superior ao normal (percentagens entre 5,5% e 6,5%), juntando-se habitualmente fibras de celulose de forma a ajudar ao envolvimento dos agregados com o betume e a evitar o escorrimento do ligante. O elevado imbricamento entre os agregados e a superior quantidade de betume (habitualmente modificado) fazem com que as misturas SMA apresentem grande resistência às deformações permanentes e uma elevada resistência à fadiga.

Nos anos mais recentes, Portugal assistiu a uma modificação do paradigma da construção rodoviária. Tendo executado uma parte importante das vias previstas na rede fundamental do seu plano rodoviário, o desafio passou a ser conservar e manter um elevado desempenho em todas as vias construídas. Esta necessidade de manter um elevado desempenho na rede viária desenvolvida, aliada às superiores características reconhecidas às misturas betuminosas SMA levaram ao crescimento da sua utilização em Portugal nos tempos mais recentes. As misturas betuminosas do tipo SMA aparecem principalmente com utilização ao nível das camadas de desgaste, tirando partido das suas características funcionais, mas também ao nível de camadas subjacentes, sempre que se pretenda conferir ao pavimento um desempenho mecânico superior. Tirando partido das características destas misturas é ainda possível a sua utilização noutro tipo de aplicações, sendo disso um exemplo a impermeabilização de tabuleiros de obras de arte. Neste contexto, a Mota-Engil Engenharia e Construção apresenta a sua experiência na formulação e aplicação de misturas betuminosas do tipo SMA em empreitadas realizadas para vários donos de obra, dando ênfase ao objetivo da sua aplicação, aos resultados laboratoriais obtidos na formulação das misturas

betuminosas e no âmbito do controlo da qualidade da obra e ainda aos resultados dos ensaios de auscultação dos pavimentos. Com esta divulgação pretende-se contribuir para o estabelecimento futuro de parâmetros de referência em Portugal para este tipo de misturas betuminosas, tendo em conta que, por exemplo, o Caderno de Encargos Tipo Obra da ex-Estradas de Portugal (CETO da EP) ainda não inclui este tipo de misturas e muitas vezes os projetistas e donos de obra têm de recorrer a analogias com outros tipos de misturas semelhantes a estas ou ainda a especificações estrangeiras.

2 VIADUTO IX – A7: BASTO/RIBEIRA DE PENA

2.1 Enquadramento

O viaduto IX do lanço Basto/Ribeira de Pena da autoestrada A7 da Concessão Norte é composto por dois tabuleiros independentes. O presente caso de estudo refere-se à reabilitação do viaduto do sentido decrescente (Ribeira de Pena/Basto), com uma extensão de cerca de 450 metros, efetuada em Julho/2013. Previamente à reabilitação efetuada, o pavimento do viaduto apresentava patologias de grau de severidade elevado, algumas das quais reapareceram já após intervenções de reparação anteriores. As patologias consistiam principalmente em fendas longitudinais, pele de crocodilo, ninhos e buracos pronunciados. A sua causa foi atribuída à elevada porosidade das camadas do pavimento associada à incorreta construção da impermeabilização prevista para o tabuleiro. Para esta nova intervenção de reabilitação foram definidas duas possíveis soluções para a impermeabilização do tabuleiro, sendo que ambas contemplavam a total remoção das misturas betuminosas e da tela de impermeabilização existente. A primeira solução de impermeabilização sugerida passava pelo recurso a uma nova tela, corretamente aplicada, enquanto a segunda solução passava pela impermeabilização do tabuleiro com recurso a uma membrana do tipo SAMI-BMB (*Stress Absorbing Membrane Interlayer* com recurso a betume modificado com borracha). Após a adoção de uma das soluções de impermeabilização seriam repostas as misturas betuminosas. [2]

No seguimento do exposto, entendeu a Mota-Engil Engenharia e Construção propor uma solução inovadora e diferente das iniciais. A solução proposta e aceite pelo dono de obra passou pela remoção da totalidade das misturas betuminosas aplicadas no tabuleiro e da tela impermeabilizante e posterior aplicação de uma camada com uma mistura betuminosa SMA 8 numa espessura de 3cm, com dupla função de impermeabilização e regularização, seguida da aplicação de uma camada com uma mistura betuminosa SMA 12, numa espessura de 4cm, com função de camada de desgaste.

2.2 Características das misturas betuminosas a aplicar

Dada a inexistência de especificações em Portugal para o tipo de misturas betuminosas que se pretendia aplicar, foi necessário proceder ao seu estudo tendo em vista a elaboração de uma proposta a ser apresentada ao dono de obra sob a forma de uma nota técnica. Os fusos granulométricos foram definidos fazendo uma analogia com os fusos habitualmente utilizados na Alemanha (mas utilizando os peneiros da Série Base + Série 2 por ser a habitual em Portugal) e garantindo que era cumprido o estabelecido na norma EN 13108-5.

Quadro 1. Fusos granulométricos definidos para as misturas SMA 12 e SMA 8

Peneiros (mm)	SMA 12 (desgaste)		SMA 8 (regularização)	
	Lim. Inf.	Lim Sup.	Lim. Inf.	Lim Sup.
20	100	100		
12,5	90	100	100	100
8	50	65	90	100
6,3	35	45	37	57
2	22	32	20	30
0,063	6	12	7	11

Relativamente às outras características das misturas, foram exigidos valores análogos aos estipulados no Caderno de Encargos Tipo Obra da ex-Estradas de Portugal (CETO da EP), nomeadamente ao nível de características

Marshall, vazios na mistura de agregados (VMA) e porosidade. Foram estipulados ainda os requisitos e propriedades definidos no quadro seguinte:

Quadro 2. Requisitos e propriedades definidos para as misturas SMA 12 e SMA 8

Requisitos e Propriedades		Ref. Normativa	Condições dos ensaios	Un.	Valores
Resistência à Deformação Permanente (“Wheel-tracking”)	Taxa de deformação WTS_{AIR}	EN12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, temperatura do ensaio a 60 °C	mm/10 ³ ciclos de carga	0,07
	Profundidade de rodeira máxima, PRD_{AIR}			%	Valor a declarar
Porcentagem de betume, mín.		-	-	%	$B_{min}5,5$
Sensibilidade à água, ITSR, mín		EN12697-12	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 – 50 pancadas, temperatura do ensaio: 15° C	%	ITSR ₉₀ (90%)
Escorrimento de betume, máx		EN 12697-18	Ensaio de Schelenberg	%	0,3

Optou-se pela utilização de um betume modificado com polímeros (PMB 45/80-65) e pela introdução de fibras de celulose revestidas com betume, numa percentagem em massa de 0,4%, de forma a evitar o escorrimento do ligante em virtude de estarmos na presença de misturas betuminosas com uma elevada percentagem de betume.

Relativamente às características superficiais da camada terminada, foi definido que as mesmas deveriam estar de acordo com o estipulado no CETO da EP no que concerne ao microbetão betuminoso rugoso.

2.3 Formulação das misturas betuminosas SMA 12 e SMA 8

Tendo sido aceite pelo dono de obra a proposta de intervenção apresentada pela Mota-Engil Engenharia e Construção, passou-se para a fase da formulação das misturas betuminosas. Tal como referido, a base para o estudo foi a nota técnica apresentada ao dono de obra e o CETO da EP. No seguimento do estudo de formulação foram obtidos os seguintes resultados (apresentados os resultados obtidos para a percentagem ótima de betume):

Quadro 3. Valores obtidos nos estudos de formulação das misturas SMA 12 e SMA 8

Caraterística da Mistura	SMA 12	SMA 8	Nota Técnica
	Pb = 5,5%	Pb = 6,0%	
Estabilidade (kN)	13,1	12,5	$S_{min}12,5 - S_{max}21$
Deformação (mm)	4	4	F2 a F4
Q_{min} (kN/mm)	3	3	$Q_{min}3$
Vazios na mistura de agregados, V.M.A (%)	15,7	16,7	$VMA_{min}14$
Baridade (kg/m ³)	2375	2348	-
Baridade máxima teórica (kg/m ³)	2448	2420	-
Porosidade, V_m (%)	3,0	3,0	$V_{min}3,0 - V_{max}6$
Escorrimento de betume, máx (%)	0,02	0,05	0,3
Índice de resistência conservada, I.R.C. (%) ¹	97	95,3	≥ 80
Sensibilidade à água, ITSR (%) ¹	90,9	94,2	ITSR ₉₀
Resistência à Deformação Permanente ¹ (“Wheel-tracking”) - Taxa de deformação WTS_{AIR}	0,022	0,007	≤ 0,07

¹ Ensaios realizados em amostras colhidas na transposição para a central de fabrico.

As percentagens de betume estipuladas, algo baixas em relação ao habitual em outros países da Europa, foram limitadas pelos valores de porosidade mínima definidos. Com um limite mínimo inferior, poderia ter sido definida uma percentagem de betume superior à utilizada o que, com maior experiência na aplicação destas misturas e a manter-se os valores obtidos, pode eventualmente vir a ser considerado.

2.4 Controlo da qualidade em obra

Após aprovação do estudo de formulação por parte do dono de obra e de todos os procedimentos inerentes ao início de uma empreitada, deu-se início à execução da mesma. Foram aplicadas cerca de 430 toneladas de mistura SMA 8 e cerca de 720 toneladas de mistura SMA 12.



Fig.1. Aplicação da mistura SMA 12 no Viaduto IX do lanço Basto/Ribeira de Pena da autoestrada A7

No âmbito do habitual controlo da qualidade foram realizados ensaios laboratoriais em amostras recolhidas e ensaios após conclusão da aplicação das camadas. Foram atingidos os parâmetros indicados na proposta ao cliente, tendo-se conseguido aplicar misturas mecanicamente estáveis (mesmo com percentagens de betume superiores ao habitual, graças à contribuição das fibras de celulose revestidas com betume) mas principalmente com características de resistência e durabilidade muito elevadas.

2.5 Caracterização final do pavimento

Concluída a empreitada, realizaram-se os ensaios de caracterização final do pavimento por forma a avaliar as principais características superficiais do pavimento. Destas, a macrotextura é o parâmetro funcional mais influenciado pelo tipo de mistura aplicada, ao passo que o coeficiente de atrito é mais afetado pela proveniência e tipologia dos agregados ou pela película de betume que os reveste, não estando estritamente correlacionado com o tipo de mistura.

Assim, de forma a apresentar as características superficiais mais intrínsecas deste tipo de misturas (SMA) obtidas na auscultação de pavimentos, apresentam-se neste ponto (e em todos os pontos análogos seguintes no presente documento) os valores obtidos na medição da macrotextura e do IRI.

Para a macrotextura foram obtidos valores médios, na totalidade da extensão intervencionada, de 1,0 mm na via direita e 1,3 mm na via esquerda. Quanto ao IRI, foram registados valores médios de 1,3 mm/km para a via direita e de 1,2 mm/km para a via esquerda, tendo sido obtido, de acordo com a classificação do CETO da EP, a classificação máxima de “Muito Bom”, retratando a excelente regularidade final do viaduto.

3 A25 – BENEFICIAÇÃO ENTRE CARVOEIRO E BOA ALDEIA

3.1 Enquadramento

A empreitada de beneficiação da A25 entre o Carvoeiro e Boa Aldeia desenvolveu-se entre os km's 29+300 e 73+947, numa extensão aproximada de cerca de 45 km, nos meses de Setembro a Novembro de 2013. O principal objetivo foi a beneficiação do pavimento através da melhoria das suas características superficiais. Para isso, a principal intervenção definida passou pela fresagem dos pavimentos degradados e a sua reposição, contemplando ainda a selagem de eventuais fissuras existentes. O estado inicial do pavimento caracterizava-se por

uma boa condição de conservação na sua generalidade, embora com fendilhamento longitudinal algo frequente e com zonas pontuais com patologias do tipo “pele de crocodilo” e bombagem de finos. [3]

A análise estrutural e das características superficiais permitiu concluir que o pavimento apenas necessitaria de intervenções pontuais, definidas em função da avaliação do pavimento realizada. Além da selagem de fissuras e granalhagem do pavimento, foram definidas intervenções de fresagem de 5 cm e reposição com 5 cm de uma mistura do tipo SMA 12 e de fresagem de 11 cm e reposição com 6 cm de uma mistura do tipo AC20 subjacente a 5 cm de uma mistura do tipo SMA 12, sendo a definição feita em função da profundidade da fissuração. Uma mistura do tipo SMA 12 para camada de desgaste permitiria aplicar uma mistura com uma vida útil superior [4] num pavimento já com boa capacidade de carga, mantendo valores de macrotextura idênticos aos existentes.

A Mota-Engil Engenharia e Construção propôs a aplicação de uma mistura betuminosa do tipo SMA 12 com uma formulação semelhante àquela que tinha sido aplicada na obra do Viaduto IX da autoestrada A7 – Basto/Ribeira de Pena, em função dos bons resultados obtidos, tendo sido esta proposta aceite pelo dono de obra.

3.2 Formulação da mistura betuminosa SMA 12

Para a presente empreitada os agregados utilizados na formulação da mistura (e a utilizar posteriormente na execução da empreitada) tiveram a mesma proveniência que os que foram utilizados na obra do Viaduto IX da autoestrada A7 - lanço Basto/Ribeira de Pena. Dessa forma, foi apresentado o mesmo estudo de formulação ao dono de obra, tendo apenas sido aferida novamente a resistência à deformação permanente. No ensaio “Wheel-tracking”, uma vez mais, foram obtidos excelentes resultados, nomeadamente uma taxa de deformação máxima de 0,026 mm/10³ ciclos de carga e uma profundidade máxima de rodeira (WTS_{AIR}) de 4,8%, realçando outra vez as características de resistência às deformações deste tipo de mistura.

3.3 Controlo da qualidade em obra

Em fase de execução da empreitada e no âmbito do seu controlo da qualidade foram realizados os habituais ensaios laboratoriais. Na empreitada foram aplicadas cerca de 20.000 toneladas de misturas do tipo SMA 12.



Fig.2. Aplicação da mistura SMA 12 na autoestrada A25

Os valores obtidos no controlo da qualidade em obra estiveram de acordo com o estudo apresentado, cumprindo com as especificações definidas para as misturas betuminosas.

3.4 Caracterização final do pavimento

No final da empreitada foi feita a avaliação das características superficiais do pavimento. Como a presente empreitada incidiu apenas em áreas de intervenção pontuais, definidas em projeto, os valores aqui apresentados para a medição da macrotextura retratam apenas os valores médios obtidos apenas nas zonas onde foi feita intervenção no pavimento com aplicação de camada de desgaste em SMA 12. Foram obtidos valores médios na extensão intervencionada de 1,1 mm tanto no sentido crescente como no decrescente.

Relativamente ao IRI, e considerando neste caso a medição em toda a extensão dos lanços ensaiados, no sentido crescente foram registados valores médios de 1,48 mm/km na via interior, 1,29 m/km na via exterior e 1,27

m/km nas vias de lentos. No sentido decrescente, foram registados valores médios de 1,21 m/km na via interior, 1,33 m/km na via exterior e 1,18 m/km na via de lentos. De acordo com o CETO da EP, todas as vias apresentariam a classificação máxima de “Muito Bom”.

4 A24 – LANÇOS G e F, GRANDES REPARAÇÕES

4.1 Enquadramento

Na autoestrada A24, executaram-se trabalhos de pavimentação no lanço G (Lamego/Bigorne) entre os km's 103+000 e 114+500 em ambos os sentidos e no lanço F (Castro Daire Norte/Castro Daire Leste) entre os km's 123+500 e 127+000 apenas no sentido decrescente. A intervenção preconizada, levada a cabo entre Julho e Setembro de 2014, tinha como objetivo corrigir patologias detetadas no pavimento e repor as suas características estruturais e funcionais, garantindo um nível de serviço concordante com o pretendido pelo dono de obra. [5]

As campanhas de ensaios e de inspeção do pavimento, bem como a sua análise estrutural, resultaram na identificação da necessidade da remoção da camada de desgaste em toda a extensão em análise (numa espessura de 5 cm), bem como, em algumas extensões, na fresagem adicional de parte da camada de ligação subjacente e a sua reposição (em espessuras entre 5 e 9 cm). A fresagem adicional seria reposta com uma mistura do tipo AC20 e a camada de desgaste seria reposta com 5 cm de uma mistura do tipo SMA 12. [5]

Novamente, em função dos bons resultados obtidos anteriormente, a Mota-Engil Engenharia e Construção propôs junto do dono de obra a aplicação na camada de desgaste de uma mistura betuminosa do tipo SMA 12, com um fuso granulométrico semelhante àquela que tinha sido aplicada na obra do Viaduto IX da autoestrada A7 - lanço Basto/Ribeira de Pena e na beneficiação da A25. Esta proposta foi posteriormente aceite.

4.2 Formulação da mistura betuminosa SMA 12

O estudo de formulação foi então realizado tendo-se considerado a utilização de um betume modificado com polímeros 45/80-65 e a introdução de uma percentagem de 0,4% em massa de fibras de celulose revestidas com betume. Obtiveram-se os resultados apresentados no quadro abaixo, tendo sido definida uma composição capaz de corresponder às características exigidas para a mistura.

Quadro 4. Valores obtidos nos estudos de formulação das misturas SMA 12

Caraterísticas da Mistura	SMA 12	
	Valores obtidos Pb = 5,5%	Valores exigidos
Estabilidade (kN)	13	$S_{\min}12,5 - S_{\max}21$
Deformação (mm)	4	F2 a F4
Q_{\min} (kN/mm)	4	$Q_{\min}3$
Vazios na mistura de agregados, V.M.A (%)	17	$VMA_{\min}14$
Baridade (kg/m ³)	2329	-
Baridade máxima teórica (kg/m ³)	2435	-
Porosidade, V_m (%)	4,4	$V_{\min}3,0 - V_{\max}6$
Índice de resistência conservada, I.R.C. (%)	97	≥ 80

4.3 Controlo da qualidade em obra

Na presente empreitada foram aplicadas cerca de 23.000 toneladas de mistura betuminosa do tipo SMA 12. Ao longo da sua execução foram sendo efetuados ensaios de controlo da qualidade confirmando-se as características definidas no estudo de formulação da mistura betuminosa. Além do habitual controlo da qualidade em continuidade durante a empreitada, realizaram-se ainda ensaios para determinação da resistência à fadiga e do módulo de rigidez de provetes extraídos do pavimento. Apresentam-se os resultados obtidos de seguida:

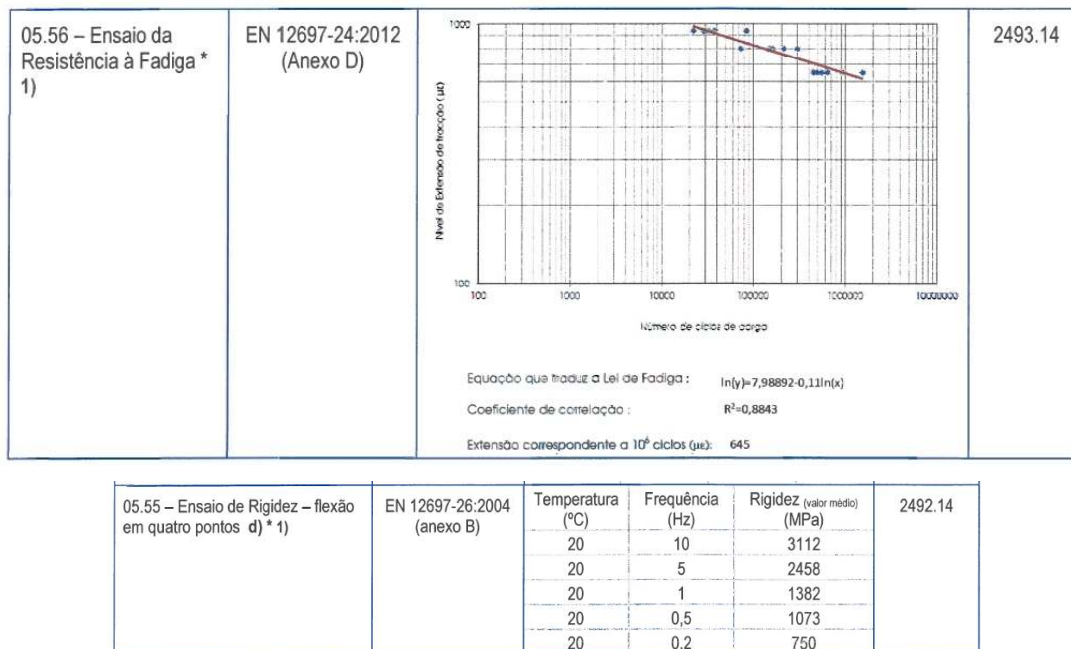


Fig.3. Resultados de ensaios de avaliação da resistência à fadiga e do módulo de rigidez

Uma extensão correspondente a 10^6 ciclos de 645 μm (ensaio realizado a uma temperatura de 20°C com uma frequência de 10 Hz) mostra que a mistura SMA 12 aplicada possui uma elevada resistência à fadiga.



Fig.4. Aplicação da mistura SMA 12 na autoestrada A24

4.4 Caracterização final do pavimento

No lanço G (Lamego/Bigorne), no que concerne à macrotextura, foram obtidos valores médios de 1,0 mm nas duas vias do sentido crescente e 1,1 mm e 1,0 mm respetivamente na via direita e na via esquerda do sentido decrescente. Quanto ao IRI, obtiveram-se valores médios de 1,15 m/km e 1,06 m/km respetivamente na via direita e na via esquerda do sentido crescente e valores médios de 1,21 m/km e 1,15 m/km respetivamente na via direita e na via esquerda do sentido decrescente, possuindo todas as vias, de acordo com a classificação do CETO da EP, o nível de “Muito Bom”.

Já no lanço F (Castro Daire Norte/Castro Daire Leste), na medição da macrotextura foram obtidos valores médios de 1,1 mm nas duas vias do sentido intervencionado. Quanto ao IRI, registaram-se valores médios de 1,11 m/km e 1,17 m/km respetivamente na via direita e na via esquerda do sentido decrescente. Também aqui, de acordo com o CETO da EP, a classificação seria de “Muito Bom” para ambas as vias.

5 IC2 (EN1) – REQUALIFICAÇÃO ENTRE LEIRIA E BARRACÃO

5.1 Enquadramento

A intervenção no IC2 entre Leiria (124+000) e Barracão (136+000), realizada em Junho de 2015, contemplou trabalhos de pavimentação apenas entre os km's 124+000 e 126+536. O objetivo passou por melhorar as condições de circulação e de segurança rodoviária ao mesmo tempo que se restaurava a vida útil do pavimento.

O levantamento do estado inicial do pavimento mostrou que as patologias mais frequentes passavam por fendilhamento do tipo pele de crocodilo e fissuração longitudinal, incidindo mais no sentido ascendente. A inspeção visual mostrou também deformações nas vias ascendentes, estando de acordo com os ensaios de FWD efetuados que aí mostraram uma menor capacidade estrutural [6]. Dada a profundidade das fendas nas carotes retiradas do pavimento, optou-se pela fresagem da totalidade das misturas betuminosas a quente existentes (numa espessura de 12 cm) e pela reposição e reforço do pavimento com 19 cm de misturas betuminosas do tipo SMA. O reforço do pavimento com misturas do tipo SMA visava a melhoria da sua capacidade estrutural e das suas características superficiais [6]. Os 19 cm de misturas betuminosas do tipo SMA foram divididos em três camadas: 5 cm de SMA 11 em camada de desgaste, 6 cm de SMA 16 em camada de ligação e 8 cm também de SMA 16 em camada de base. Todas as misturas foram produzidas com recurso a um betume modificado com polímeros 45/80-65 e com a adição de 0,3% em massa de fibras de celulose revestidas com betume.

Relativamente às empreitadas referidas nos pontos anteriores, as especificações fornecidas pelo dono de obra contemplavam algumas diferenças em relação à formulação das misturas betuminosas, nomeadamente ao nível da sua granulometria. Foram então realizados os respetivos estudos de formulação.

5.2 Características das misturas betuminosas a aplicar

Tal como foi referido no ponto anterior, na empreitada em análise foram aplicadas misturas betuminosas do tipo SMA com fusos granulométricos ligeiramente diferentes daqueles que já tinham sido utilizados anteriormente pela Mota-Engil Engenharia e Construção, principalmente ao nível da mistura SMA 16. A utilização das misturas SMA em camadas de ligação e de base constituiu também uma novidade em relação ao anteriormente executado.

5.3 Formulação das misturas betuminosas SMA 11 e SMA 16

Os estudos de formulação das misturas betuminosas foram realizados de forma a definir a composição capaz de corresponder às características exigidas para as misturas, nomeadamente ao nível dos já referidos fusos granulométricos e também ao nível das características Marshall. No quadro abaixo apresentam-se os valores obtidos, considerando já a percentagem ótima de betume para cada uma das misturas betuminosas

Quadro 5. Valores obtidos nos estudos de formulação das misturas SMA 11 e SMA 16

Caraterística da Mistura	SMA 11		SMA 16	
	Valores obtidos	Valores exigidos	Valores obtidos	Valores exigidos
Percentagem de betume (%)	6,3	≥ 6	5,5	$\geq 5,5$
Estabilidade (kN)	11,4	$S_{\min}7,5 - S_{\max}17,5$	11,4	$S_{\min}7,5 - S_{\max}15$
Deformação (mm)	3,3	F2 a F4	3,3	F2 a F4
Q_{\min} (kN/mm)	3,5	$Q_{\min}3$	3,5	$Q_{\min}2,5$
Vazios na mistura de agregados, V.M.A (%)	19,5	$VMA_{\min}14$	16,8	$VMA_{\min}14$
Baridade (kg/m ³)	2490	-	2384	-
Baridade máxima teórica (kg/m ³)	2601	-	2486	-
Porosidade, V_m (%)	4,3	$V_{\min}3,0 - V_{\max}6$	4,1	$V_{\min}3,0 - V_{\max}6$
Índice de resistência conservada, I.R.C. (%)	95	≥ 80	90,5	≥ 80

5.4 Controlo da qualidade em obra

Durante a execução da empreitada, em que foram aplicadas cerca de 16.000 toneladas de misturas betuminosas do tipo SMA, foram realizados os ensaios referentes ao controlo da qualidade que atestaram os resultados obtidos na realização do estudo de formulação, cumprindo-se assim com as especificações exigidas. Além dos habituais ensaios, realizou-se também a avaliação da resistência à fadiga e do módulo de rigidez em provetes extraídos do pavimento após a aplicação das misturas betuminosas. Na figura seguinte é possível verificar os resultados obtidos para a mistura SMA 16:

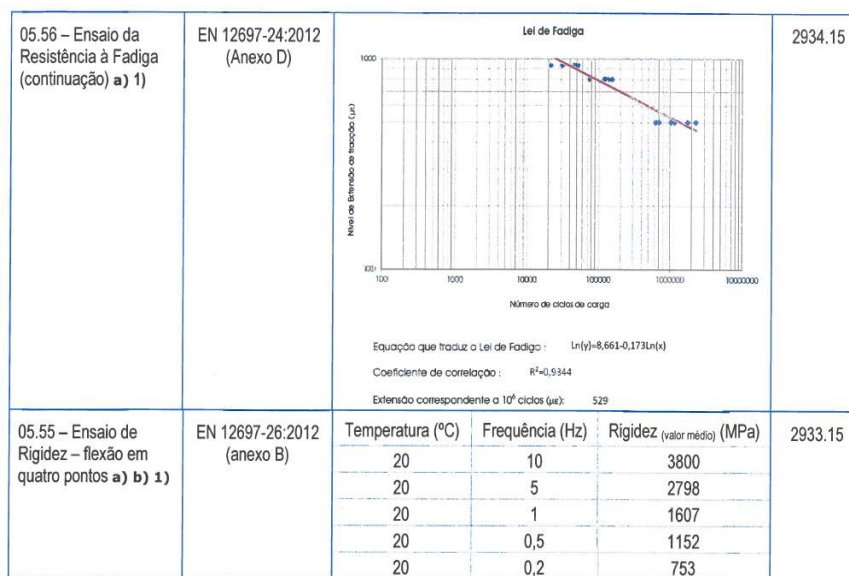


Fig.5. Resultados de ensaios de avaliação da resistência à fadiga e do módulo de rigidez

Uma extensão correspondente a 10^6 ciclos de $529 \mu\text{m}$ (ensaio realizado a uma temperatura de 20°C com uma frequência de 10 Hz) atesta novamente a excelente resistência à fadiga deste tipo de misturas betuminosas.

5.5 Caracterização final do pavimento

Uma vez mais, concluída a realização da empreitada, foi efetuada a caracterização final do pavimento.

Para a macrotextura foram obtidos valores médios de 1,2 mm na via direita do sentido crescente, 1,1 mm na via de lentos do sentido crescente e 1,0 mm no sentido decrescente.

Relativamente ao IRI, foram registados valores médios de 0,96 m/km na via direita do sentido crescente, 1,15 m/km na via de lentos do sentido crescente e 1,18 m/km no sentido decrescente. Com exceção de apenas um lote, todos os outros obtiveram a classificação máxima de “Muito Bom” de acordo com o CETO da EP.

6 CONCLUSÕES

Nos anos mais recentes, a Mota-Engil Engenharia e Construção aplicou cerca de 60.000 toneladas de misturas betuminosas do tipo SMA. A experiência adquirida em todas as empreitadas, como retratado nos pontos anteriores, permite afirmar que se confirma o seu elevado desempenho mecânico e as suas excelentes características superficiais.

A título de conclusão, para confirmação do superior comportamento mecânico das misturas SMA, apresenta-se abaixo uma comparação entre uma mistura tradicional (AC14 Surf 35/50 (BB)) e uma mistura do tipo SMA (SMA12 Surf PMB 45/80-65) relativamente aos resultados dos ensaios de avaliação da resistência à fadiga e da resistência às deformações permanentes (“Wheel-tracking”), avaliados em provetes retirados do pavimento:

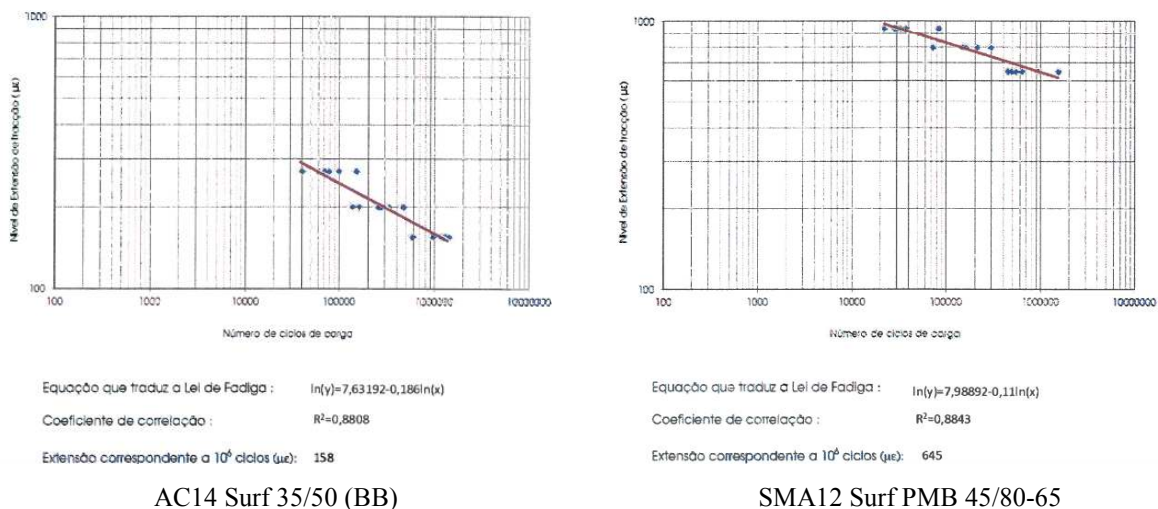


Fig.6. Comparação de resultados de ensaios de avaliação da resistência à fadiga (T=20°C, f=10Hz)

05.36 – Ensaio de pista ("Wheel Tracking") a) b)	EN 12697-22:2003+A1:2007	WTS _{SAIR} (mm/103ciclos) = 0,24 PRDAIR (%) = 5,4 RDAIR (mm) = 4,4
AC14 Surf 35/50 (BB)		
05.36 – Ensaio de pista ("Wheel Tracking") a) c)	EN 12697-22:2003+A1:2007	WTS _{SMA} (mm/103ciclos) = 0,09 PRD _{SMA} (%) = 6,5 RD _{SMA} (mm) = 3,3
		SMA12 Surf PMB 45/80-65

Fig.7. Comparação de resultados de ensaios de avaliação da resistência às deformações permanentes

É possível verificar uma extensão correspondente a 10^6 ciclos no ensaio de resistência à fadiga muito superior na mistura SMA do que na mistura AC14, bem como um taxa de deformação no ensaio de resistência às deformações permanentes bastante inferior nas misturas do tipo SMA.

Uma última nota para o facto das percentagens de betume utilizadas não serem tão elevadas como as habituais em outros países Europeus (embora em alguns países com climas diferentes de Portugal) e se situarem habitualmente muito próximo ou coincidindo com os limites inferiores estipulados. Com maior experiência na aplicação destas misturas e eventualmente alterando os valores especificados para as misturas betuminosas é possível que se consiga incorporar percentagens de betume mais elevadas.

7 REFERÊNCIAS

1. F. Martinho, S. Lanchas, R. Nunez, F. Batista e H. Miranda, *A experiência portuguesa em misturas betuminosas do tipo SMA com fibras celulósicas*, Atas do 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, Portugal, 10-12 Abril 2013.
2. Estrutovia, *Concessão Norte – A7 Lanço Basto / Ribeira de Pena – Viaduto IX – Reparação do Tabuleiro e Encontros: Memória Descritiva e Justificativa*, 2013.
3. Elsamex Portugal, *Concessão das Beiras Litoral e Alta - BLA – Beneficiação da A25 Entre o IC2 e Boa Aldeia, Lotes de Construção 1, 2 e 3: Memória Descritiva e Justificativa*, 2013.
4. EAPA (European Asphalt Pavement Association), *Sustainable Roads - Long-Life Asphalt Pavements - Technical Version*, Bruxelas, Bélgica, 2007.
5. Elsamex Portugal, *NORSCUT – Concessionária de Autoestradas: Lanço G – Lamego/Bigorne e Lanço F - Castro Daire Norte/Castro Daire Leste – Grandes Reparações – Projeto de Execução, Pavimentação*, 2014
6. Atkins, *Projeto de Execução “IC2 (EN1) – Requalificação entre Leiria (km 124+000) e L.D. Leiria/Coimbra (km 163+506)” – 1ª Fase – entre Leiria (km 124+000) e Barracão (km136+000) – P3-Pavimentação, Memória Descritiva e Justificativa*, 2014