

IAG134-03-2013
EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS CELULÓSICAS E MISTURAS
RECICLADAS NO DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS
TEMPERADAS.
EFFECTOS DE LA ADICIÓN DE FIBRAS CELULÓSICAS Y MEZCLAS
RECICLADAS EN EL DESEMPEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS
TEMPLADAS (TIBIAS)

Fernando C. G. Martinho
FM Consult / IST - Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, Portugal
fernando.martinho@ist.utl.pt

Luís de Picado Santos
IST – Univ. Técnica de Lisboa
Lisboa, Portugal
picado.santos@civil.ist.utl.pt

Silvino Capitão
Inst. Politec. Coimbra, ISEC
e CESUR, IST-UTL
Coimbra e Lisboa, Portugal
capitao@isec.pt

José Neves
IST – Univ. Técnica de Lisboa
Lisboa, Portugal
jose.manuel.neves@ist.utl.pt

Resumo

O artigo tem como objetivo apresentar uma avaliação do desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas (*MBT*), do tipo AC 20 base/bin/reg 35/50 (segundo a norma europeia EN 13108-1), produzidas à temperatura de 120 °C e compactadas a 100 °C, contendo misturas antigas recicladas e recorrendo à utilização dos aditivos adequados. Com este tipo de misturas consegue-se, simultaneamente, a redução do consumo energético na sua produção e a poupança de matérias-primas (betume e agregados naturais), sem diminuição significativa da resistência. A manter-se a atual conjuntura económica mundial, vislumbra-se um crescimento da procura deste tipo de misturas betuminosas, a curto / médio prazo, não só para a construção de pavimentos rodoviários novos, mas igualmente para a reabilitação dos já existentes. Por outro lado, a atividade de reconstrução de pavimentos flexíveis, está a libertar quantidades apreciáveis de resíduos, constituídos fundamentalmente por misturas betuminosas fresadas, que podem ser reciclados em central. Esta realidade favorece a continuação do desenvolvimento das técnicas que permitam a incorporação deste material contribuindo, assim, para um "ambiente melhor". Para validação dos resultados obtidos, foram também estudadas misturas temperadas incorporando

apenas agregados tradicionais e misturas betuminosas, convencionais, com composição equivalente, fabricadas a quente. Para além dos estudos laboratoriais, foram ainda realizados vários trechos experimentais em obra. Destaca-se o facto de o fabrico deste tipo de misturas não requerer reinvestimento na adaptação das centrais de produção já existentes e o seu custo final ser inferior ao das misturas tradicionais. Os resultados conseguidos até à data revelam, em algumas composições, propriedades médias equivalentes às tradicionais, pelo que se acredita que é possível generalizar a aplicação destas misturas na construção e reabilitação de pavimentos.

Resumen

El artículo tiene como objetivo presentar una evaluación del desempeño de mezclas bituminosas templadas (*MBT*), tipo AC 20 base / bin / reg 35/50 (de acuerdo con la norma europea EN 13108-1), producidas a una temperatura de 120 °C y compactadas a 100 °C. Algunas contienen también mezclas recicladas y los aditivos adecuados. Con este tipo de mezclas se reduce el consumo de energía durante la producción y se ahorran materias primas (los agregados naturales y betún), sin reducción significativa de la resistencia. De mantenerse el entorno económico mundial actual, es previsible un crecimiento de la demanda de este tipo de mezclas bituminosas, a corto y medio plazo, no sólo para la construcción de nuevos pavimentos de carreteras, sino también para la rehabilitación de los ya existentes. Por otro lado, la actividad de reconstrucción de firmes flexibles origina la liberación de cantidades significativas de residuos, que constan principalmente de mezclas envejecidas, que pueden ser recicladas en planta. Este hecho favorece el desarrollo continuo de las técnicas que permiten la incorporación de estos materiales, pelo que se contribuye para un "mejor ambiente". Para validar los resultados obtenidos, también se estudiaron mezclas templadas incorporando áridos tradicionales y mezclas bituminosas convencionales, con una composición equivalente, producidas en caliente. Además de los estudios de laboratorio también se llevaron a cabo varios tramos experimentales en obra. Es de destacar el hecho de que la fabricación de tales mezclas no requiere reinversión en la adaptación de las plantas de producción existentes y el coste final es inferior al de las mezclas tradicionales. Los resultados obtenidos hasta la fecha muestran propiedades equivalentes a las tradicionales, en algunas composiciones, por lo que se demuestra que es posible generalizar la aplicación de estas mezclas en la construcción y rehabilitación de pavimentos.

INTRODUÇÃO

Hoje em dia é atribuída grande importância às considerações de ordem ambiental e económica que estão presentes na seleção e desenvolvimento das misturas betuminosas. Sobretudo por esta razão, a reutilização de resíduos, produzidos por várias indústrias, na construção e reabilitação de infraestruturas de transporte está a ser o objeto de muitas investigações. Na verdade, a eliminação incorreta de resíduos tem importantes impactos ambientais e os custos de manuseamento podem ser muito elevados. Além disso, há uma crescente pressão internacional para que sejam reduzidas as emissões de gases com efeito de estufa, tais como o CO_2 . Ora, as atividades de construção e de reabilitação de pavimentos rodoviários e aeroportuários, particularmente quando estes têm na sua constituição uma espessura significativa de camadas de misturas betuminosas fabricadas a quente (*MBQ*), são responsáveis pela emissão de uma parcela das emissões. Uma das formas de atenuar essas emissões e reduzir o consumo de energia, é a produção de misturas betuminosas temperadas (*MBT*), para as quais há indícios de que, apesar das suas características específicas, permitem um

desempenho estrutural adequado. A *World Road Association (PIARC)* (Olard & Noan, 2008) e a *European Asphalt Pavement Association (EAPA)* (EAPA, 2010), por exemplo, definem que as *MBT* são geralmente produzidas num intervalo de temperaturas compreendido ente 100 e 140°C, o que permite poupar uma parcela de energia significativa em relação às *MBQ* (produzidas acima de 150°C). Para integrar os benefícios associados à redução do consumo de energia e às emissões decorrentes do processo de fabrico, por um lado, com os inerentes à incorporação como agregados de vários subprodutos, por outro lado, é possível produzir *MBT* incorporando diferentes percentagens de materiais britados naturais e os obtidos a partir de resíduos. A construção e a reabilitação estrutural de pavimentos pode integrar a construção de camadas de base, regularização, ou ligação, recorrendo a *MBT* com resíduos. Tem-se concluído que algumas misturas assim produzidas, em determinadas circunstâncias de fabrico e de composição, apresentam propriedades mecânicas adequadas, possibilitando diversas vantagens económicas e ambientais, particularmente associadas à redução do consumo de novos agregados e ligantes.

MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

Existem várias técnicas disponíveis para produzir *MBT*, que são descritas de forma mais detalhada na bibliografia (Capitão *et al.*, 2012) & (Prowell *et al.*, 2011), apresentando-se em seguida apenas uma visão geral sobre as mesmas. Geralmente, as *MBT* são produzidas alterando de forma temporária, ou permanente, algumas propriedades do betume, como por exemplo a sua viscosidade. Em algumas das técnicas utilizadas, a adesividade entre o ligante e as partículas de agregado é melhorada através de aditivos químicos, os quais promovem um melhor envolvimento dos agregados pelo betume. Estes aditivos, tensioativos, atuam a uma escala microscópica na interface entre as partículas do agregado e do betume, reduzindo o atrito entre as superfícies em contacto, possibilitando deste modo uma redução da temperatura de mistura e compactação. Algumas das técnicas incorporam água dispersa na mistura de constituintes sob a forma de pequenas gotículas, ou em materiais naturais ou sintéticos (zeólitos), de modo a melhorar temporariamente a trabalhabilidade da mistura betuminosa, pela formação de vapor de água (formando espuma de betume). As técnicas conhecidas podem ser agrupadas em três grupos principais, consoante o princípio utilizado para baixar a temperatura de fabrico e aplicação da *MBT*: adição de aditivos orgânicos, utilização de aditivos químicos e tecnologias de espumificação do betume. Algumas das técnicas são simples de aplicar, porquanto permitem utilizar as centrais de fabrico sem necessidade de alterações, facto que constitui uma vantagem significativa. Quando comparadas com as *MBQ*, as tecnologias utilizadas nas *MBT* revelam vários benefícios, os quais podem ser agrupados em três categorias: de produção e aplicação, ambientais e económicos. No entanto, podem assinalar-se também algumas desvantagens, que podem ser minoradas no processo construtivo (Capitão *et al.*, 2012) & (Martinho *et al.*, 2012).

MATERIAIS UTILIZADOS

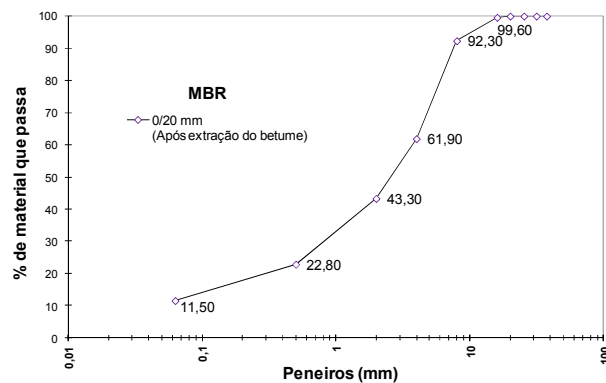
Os materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas temperadas podem ser os habituais, aos quais se acrescentam os aditivos adequados. No caso deste estudo, utilizou-se também um “resíduo” para substituir uma parte dos agregados naturais. Na verdade, a produção de resíduos está a aumentar para níveis preocupantes em todo o mundo e a sua deposição em aterros licenciados está a ser cada vez mais difícil e dispendiosa, pelo que é importante reutilizá-los. Este estudo vai de encontro ao interesse público já que possibilita a incorporação de materiais

reciclados no fabrico das misturas betuminosas, de modo a melhorar a gestão sustentável dos materiais e resíduos.

Agregados

Um dos subprodutos utilizados como agregado é produzido pela própria indústria de construção de pavimentos e designa-se por misturas betuminosas recuperadas (*MBR*). Este “agregado” têm uma granulometria 0/20mm (Figura 1) e foi recolhido por fresagem de pavimentos existentes. A sua caracterização foi feita para avaliar as propriedades fundamentais e a percentagem de matéria estranha (conforme especificado na norma europeia EN 12697-42). As propriedades das amostras recolhidas variam com a origem dos materiais recuperados, por isso é essencial separá-los durante a remoção e identificá-los, de acordo com a sua origem, para se obterem materiais homogêneos, logo mais adequados a uma reutilização futura (Baptista e Picado-Santos, 2007).

Figura 1: Aspeto e granulometria das misturas betuminosas recuperadas (*MBR*)



Ligante

As *MBT* que se descrevem neste artigo incorporam um betume do tipo 35/50, o qual apresenta uma penetração média a 25°C de cerca de 45x0,1mm e uma temperatura de amolecimento da ordem dos 56°C. Só foi utilizado este tipo de ligante porque, atualmente, é o mais utilizado em Portugal na construção / reabilitação de pavimentos flexíveis.

Aditivos

De entre os vários aditivos estudados (que permitem a redução da temperatura de manipulação das *MBT*) nas misturas aqui apresentadas foram incluídos dois aditivos: um orgânico (cera sintética obtida pelo processo *Fisher-Tropch*) (SasolWax, 2013) combinado com fibras celulósicas (JRS, 2013) e um outro químico (Akzonobel, 2013). Estes aditivos têm o aspeto apresentado na Figura 2.

Figura 2: Aditivos utilizados nas Misturas Betuminosas Temperadas, *MBT*



FORMULAÇÃO DAS MISTURAS TEMPERADAS COM FIBRAS CELULÓSICAS

Foram produzidas diversas misturas betuminosas temperadas (MBT) e também uma mistura betuminosa fabricada a quente (MBQ), com agregados calcários novos e tradicionais, para servir de referência. As misturas produzidas e aplicadas nos trechos experimentais, cujos resultados são aqui divulgados, têm as seguintes referências:

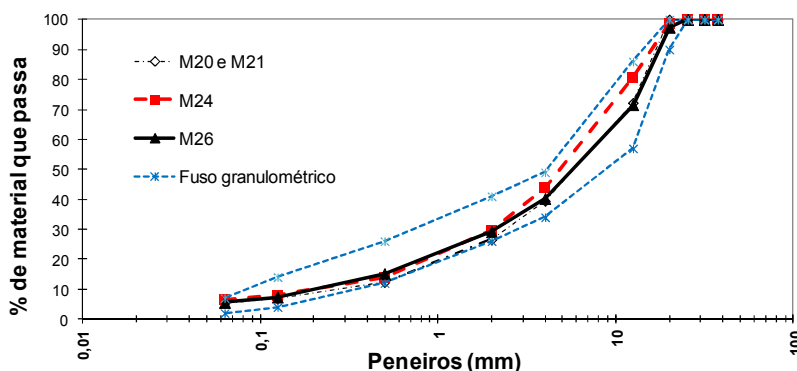
Sem fibras: **M20** (MBT com aditivo químico) e **M26** (MBQ);

Com fibras: **M21** (MBT com aditivo orgânico) e **M24** (MBT c/ aditivo orgânico e MBR).

Curvas granulométrica das misturas

As curvas granulométricas das misturas de agregados cumprem o fuso granulométrico habitual definido nas normas europeias para as misturas do tipo *AC 20 base/reg/bin 35/50*, Figura 3.

Figura 3: Curvas da mistura de agregados das MBT e MBQ



Temperaturas de mistura e compactação

Nas *MBT* estudadas os agregados calcários foram aquecidos a 120°C, enquanto os materiais para a *MBQ* foram aquecidos a 160°C. A temperatura de compactação foi de cerca de 100°C para todas as composições de *MBT* estudadas e 140°C para a *MBQ*. Nas misturas que incorporam *MBR*, o agregado virgem de calcário foi aquecido a 160°C e a *MBR* foi introduzida na misturadora da central de fabrico à temperatura ambiente, sendo aquecida por condução. Em resumo, as temperaturas adotadas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Temperaturas de fabrico e aplicação das misturas betuminosas

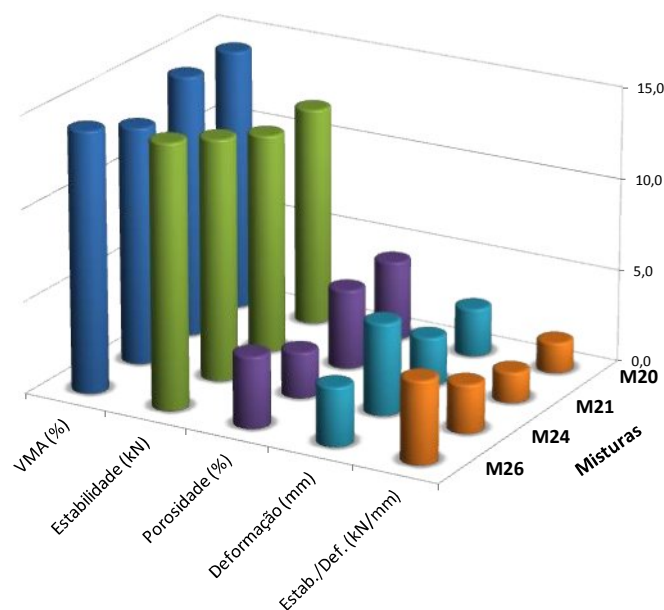
Temperaturas (°C)

		Mistura Quentes (MBQ)	Mist. Temperadas (MBT)
Agregados	Calcáreo	175	140
	Reciclado		20
Ligante		165	160
Mistura		170	120
Compactação		160	100

Propriedades volumétricas

A Figura 4 resume a composição de 4 das misturas produzidas em central e suas propriedades volumétricas, determinadas em provetes Marshall para a percentagem ótima de betume de 4,5%. No caso das misturas com *MBR*, parte desta percentagem (cerca de 1,5%) era constituída pelo betume residual existente. Nas misturas M20 e M21 os quocientes S/F obtidos eram ligeiramente inferiores ao limite inferior (2kN/mm), devido às maiores porosidades dos provetes moldados.

Figura 4: Composição e propriedades volumétricas das misturas estudadas



MATERIAIS \ MISTURAS		MBT			MBQ
		20	21	24	26
BETUME	35/50	•	•	•	•
AGREGADOS NATURAIS	Brita 2: Calcário	•	•	•	•
	Brita 1: Calcário	•	•	•	•
	PÓ: Calcário	•	•	•	•
"RESÍDUO"	0/20 Mist. Bet. Recup.			•	
ADITIVOS	Químico	•			
	Misto: Orgânico + Fibras		•	•	

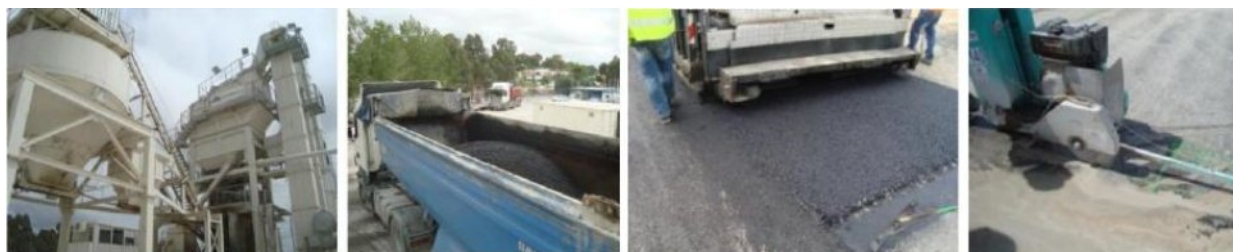
Propriedades	MBQ ¹
Porosidade (%)	3 / 6
VMA (%)	> 14
Estabilidade (kN)	7,5 / 15
Deformação (mm)	2 / 4
Estab./Def. (kN/mm)	> 2

¹ Especificação "Estradas de Portugal"

DESEMPENHO DAS MISTURAS TEMPERADAS COM FIBRAS

Tendo em conta os resultados obtidos em laboratório, selecionaram-se as melhores fórmulas de trabalho e foram realizados vários trechos experimentais Figura 5.

Figura 5: Trechos experimentais - fabrico, transporte, aplicação e recolha de amostras de MBT



Foi possível verificar no fabrico, transporte, espalhamento e compactação que podem ser seguidas as mesmas regras e utilizados os mesmos equipamentos das misturas fabricadas a quente. Posteriormente, foram realizados os diversos ensaios de desempenho, Figura 6.

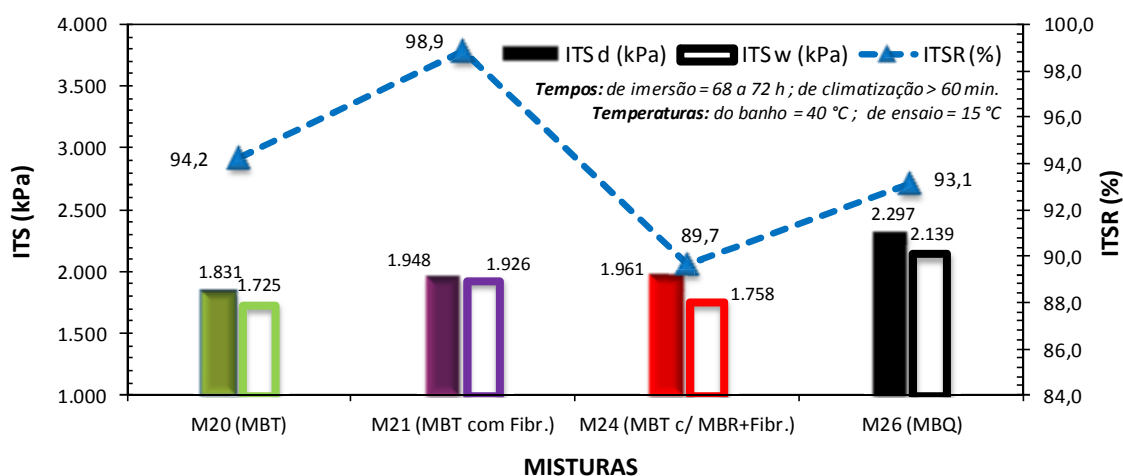
Figura 6: Ensaios de sensibilidade à água, deformação permanente e resistência à fadiga



Sensibilidade à água

Os resultados da avaliação da sensibilidade à água das misturas aplicadas nos trechos experimentais, segundo a norma europeia EN 12697-12, estão expostos na Figura 7. Verifica-se que a mistura com fibras M21 apresenta um *Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR)* francamente bom (98,9%).

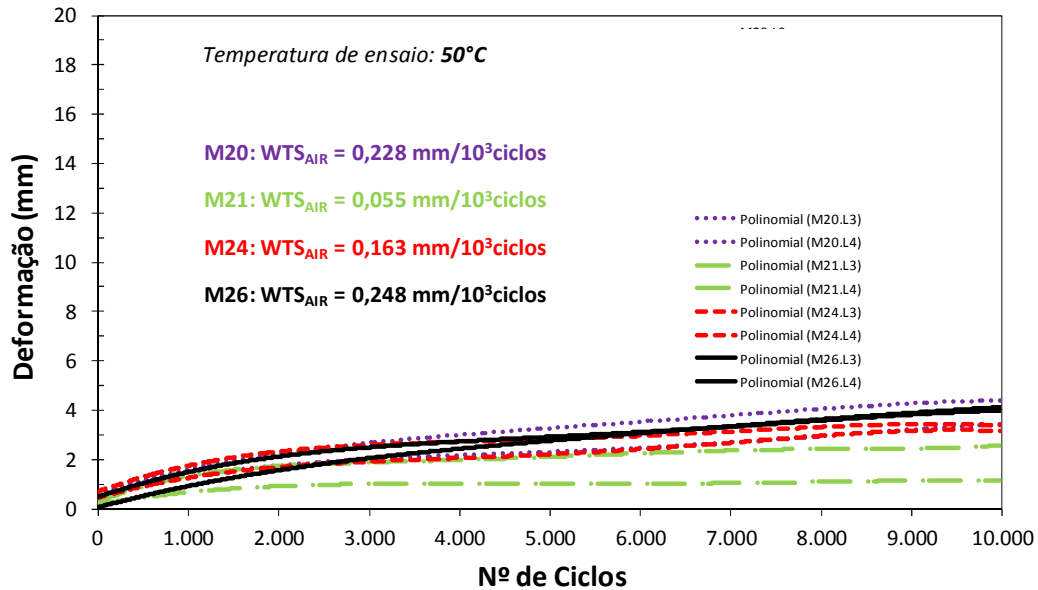
Figura 7: Resultado da avaliação da sensibilidade à água, ITSr



Resistência à deformação permanente

Os resultados de avaliação da resistência à deformação permanente, pelo ensaio de simulador de tráfego de laboratório (*Wheel-tracking*), segundo a EN 12697-22, são apresentados na Figuras 8. Pode-se verificar que as misturas que incluíram a adição de fibras (M21 e M24) apresentam uma *Taxa de Deformação Média a 50°C*, WTS_{AIR} , mais baixa (ou seja, melhor).

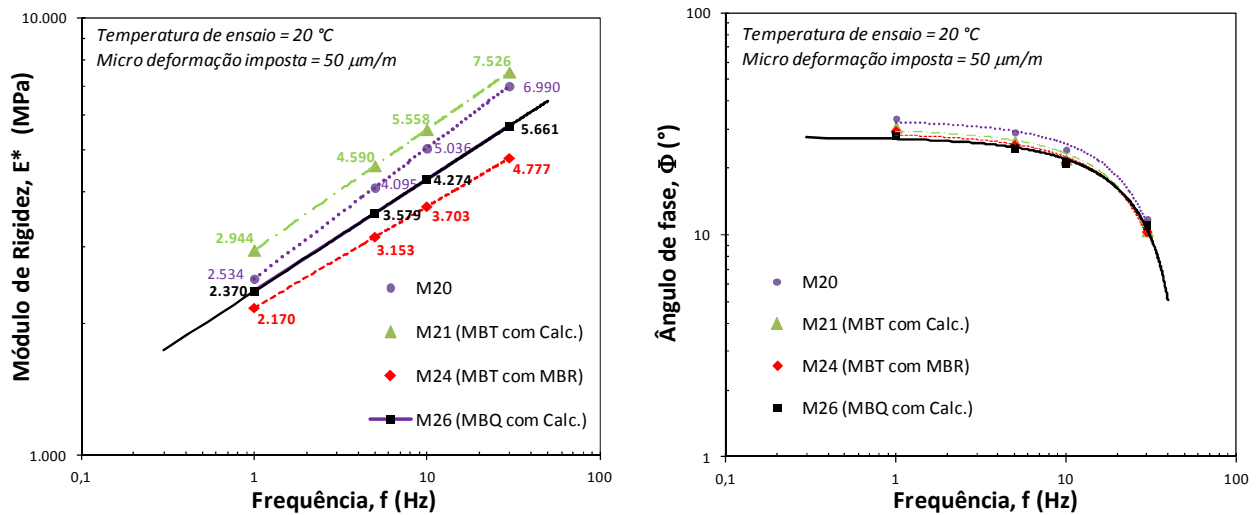
Figura 8: Resultados dos ensaios de *Wheel Tracking*



Módulo de rigidez e ângulo de fase

Determinaram-se também os módulos de rigidez e os ângulos de fase, segundo a norma europeia EN 12697-26, para todas as misturas aplicadas. Os resultados foram obtidos em ensaios de flexão em 4 pontos (com extensão controlada) e estão apresentados na Figura 9.

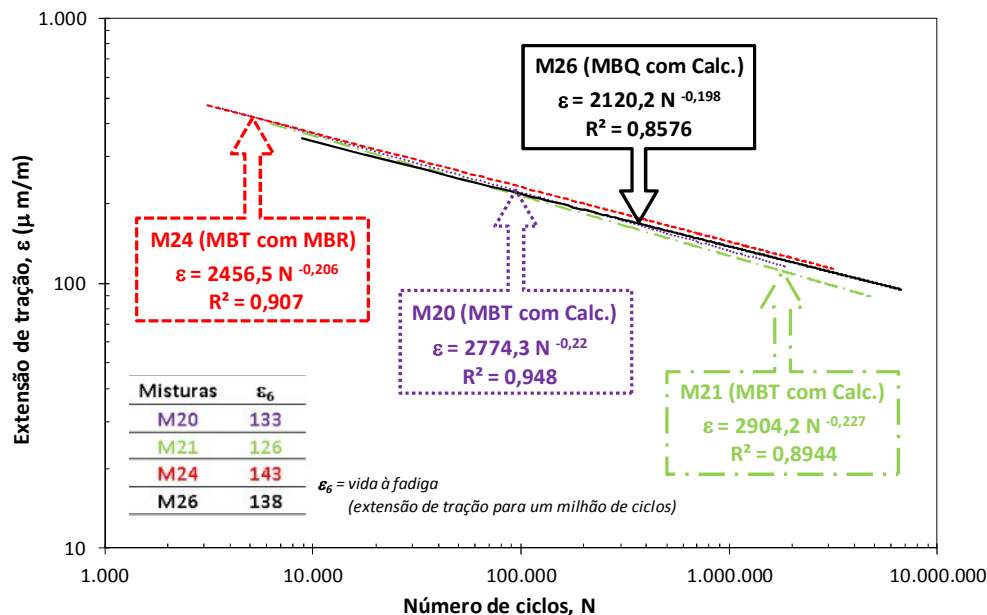
Figura 9: Módulos de rigidez e ângulos de fase obtidos nos ensaios de flexo-tração em 4 pontos



Resistência à fadiga

Finalmente foi determinada, experimentalmente, a resistência à fadiga de cada uma das misturas estudadas (EN 12697-24). As correspondentes leis de fadiga estão identificadas na Figura 10. É notória a elevada vida à fadiga apresentada pela mistura M24 (*MBT* com fibras e *MBR*).

Figura 10: Leis de fadiga das misturas estudadas



CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

As Misturas Betuminosas Temperadas (*MBT*) podem ser produzidas com agregados naturais, ou reciclados e podem ser espalhadas e compactadas usando as tecnologias tradicionais. A redução de temperatura necessária pode ser conseguida através do uso de vários tipos de aditivos (por exemplo ceras sintéticas, aditivos químicos, ou mistos), ou técnicas de formação de betume-espuma. Com o estudo em desenvolvimento prova-se que em algumas *MBT*, não obstante incluírem a reutilização de alguns subprodutos industriais devidamente processados, juntamente com os aditivos adequados, o desempenho obtido pode ser de molde a considerar a sua utilização no lugar de *MBQ*, pois é do mesmo nível do exibido por estas.

As vantagens que se conseguem são muito diversas e vão desde a redução do consumo e do custo das matérias-primas naturais (em mais de 25%), passando pela redução do volume de resíduos transportados para depósito e por uma redução na energia utilizada na produção e no aquecimento dos agregados (cerca de 2 kg de fuel por tonelada de mistura produzida), até à redução da poluição e do passivo ambiental. Além destes, é possível ainda enumerar outros benefícios colaterais, tais como: a maior facilidade de mistura e de compactação, a possibilidade de realizar pavimentações com maior demora ou em locais difíceis, o trabalho em tempo frio, o alargamento do período de trabalho, o aumento do tempo de armazenagem das misturas nos silos em quente das centrais e do tempo de transporte (podendo assim ser transportadas a maiores distâncias).

No projeto aqui divulgado foi possível obter, para algumas *MBT*, resultados equivalentes aos determinados para as *MBQ* utilizadas como referência (quando é usada uma percentagem de 35% de *MBR* com calcário).

Verificou-se também que, à exceção da sensibilidade à água, as *MBT* com fibras celulósicas e apresentaram um comportamento semelhante e, nalguns casos (M24) até melhor que a *MBQ* (M26). Destaca-se também o melhor comportamento das *MBT* à deformação permanente (WTS_{AIR} inferiores em mais de 30%), o qual estará provavelmente relacionado com a existência de uma parcela significativa de betume endurecido, proveniente das *MBR*.

Os resultados obtidos na avaliação de desempenho de algumas das misturas (especialmente nas misturas que incorporam *MBR*) podem ser considerados promissores. No entanto, a granulometria destas misturas e a avaliação da percentagem de betume residual presente nas misturas antigas tem de ser bem efetuada, devido à possibilidade de existir alguma segregação no armazenamento. Este facto pode conduzir a uma maior densidade das partículas finas (com mais betume) as quais podem alterar significativamente a composição final.

Os estudos, ainda em curso, mostraram já que é possível produzir *MBT* incorporando apenas uma quantidade reduzida de agregados virgens, com custos energéticos de produção inferiores e com características equivalentes às misturas tradicionais fabricadas a quente, podendo constituir uma boa alternativa, muito eficiente, às *MBQ* na construção e reabilitação de pavimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todo o apoio que tem sido dispensado a este projeto pelas várias entidades, empresas e colaboradores. De entre todos os que têm contribuído para a prossecução dos objetivos definidos, destaca-se a cooperação dos seguintes:

Instituições de ensino / laboratórios: *IST, ISEC e ACIV*;

Concessionária Rodoviária: *AEBT – Autoestradas do Baixo Tejo, SA*;

Empresas: *Alves Ribeiro, Ambilei, Ambisider, Campi y Jové, Cepsa, Harsco, JRS, Odebrecht, Perta, Produtiva, Rettenmaier Ibérica, Sasol, Siderurgia Nacional, TGA*;

Colaboradores: *António Cavalheiro, Bernd Abele, Brito Cardoso, Carlos Marques, Celestino Marques, Cristina Canas, Fábio Barbosa, Filipe Lopes, Gonçalo Matos, João Crucho, João Paulo Cruz, Joaquim Carvalho, Luís Valente, Luís Vieira, Maria da Graça Martinho, Pedro Costa, Rui Garcia, Ruy Nunez, Santiago Lanchas, Tiago Botelho*.

REFERÊNCIAS

Akzonobel Website: <http://www.akzonobel.com/...> (aditivo Rediset) [consultado em Julho de 2013].

Baptista, A. e Picado-Santos, L. (2007). Método de Preparação de Misturas Betuminosas Recicladas. Atas do *XIV Congreso Ibero-Latino Americano del Asfalto*, La Habana, Cuba, 18 - 23 Novembro, Edição em CD-Rom.

Capitão, S., Picado-Santos, L. e Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt, *Construction and Building Materials Journal* 36, pp. 1016-1024.

EAPA (2010). The use of warm mix asphalt – EAPA position paper. *European Asphalt Pavement Association*, Brussels..

JRS Website: http://www.jrs.de/SMAviatop_engl/index.shtml (aditivo Viatop) [consultado em Julho de 2013].

Martinho, F., Capitão, S. e Picado-Santos, L., (2012). Sustainable Pavements: Warm Asphalt Mixtures Made with Recycled Aggregates from Different Industrial by-Products. Atas do EPAM4 - 4th European Pavement and Asset Management Conference, Malmö, Sweden.

Olard F, Noan C., (2008). Low energy asphalts. Routes roads 336/337. *PIARC - World Road Association*. p. 131–45.

Prowell B, Hurley G, Frank B. (2011). Warm-mix asphalt: best practices. *NAPA - National Asphalt Pavement Association*, Lanham, Maryland.

Sasol Wax Website: <http://www.sasolwax.us.com/sasobit.html> (aditivo Sasobit) [Consultado em Julho de 2013].