

ESTUDO DE MATERIAL FRESADO PARA INCORPORAÇÃO EM MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE COM ALTAS TAXAS DE RECICLAGEM

Paulo Fonseca¹, Carla Guimarães², Vitor Gomes², Daniela Palha¹, Hugo M.R.D. Silva³, Joel R.M. Oliveira³ e Lílíana Abreu³

¹ MonteAdriano Engenharia e Construção, SA, Rua Monte dos Burgos nº 470/492 1º, 4250-311 Porto, Portugal

e-mail: paulo.fonseca@monteadriano.pt

² iDresearch, Rua Monte dos Burgos nº 470/492 1º, 4250-311 Porto, Portugal

³ Universidade do Minho, C-TAC – Centro do Território Ambiente e Construção, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

Sumário

A problemática da reciclagem tem-se tornado cada vez mais importante no desenvolvimento dos países, pois a necessidade de tratar os resíduos gerados é essencial para a sobrevivência da Sociedade. Este trabalho visa estudar a forma como o tratamento dado ao material fresado pode condicionar as suas propriedades (granulometria e características do betume) e as condições de produção das misturas. Assim, tendo por base o funcionamento duma central betuminosa que produz misturas com altas taxas de reciclagem, simulou-se em laboratório o processo ideal de separação do fresado (desagregação e separação em duas frações), que foi comparado com o processo de separação em central.

Palavras-chave: Material fresado; condições de produção; misturas betuminosas recicladas; caracterização do betume recuperado.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável da Sociedade é cada vez mais um objetivo central na definição de novas estratégias de produção e construção. No domínio dos pavimentos rodoviários flexíveis, a reciclagem é uma das tecnologias que melhor se enquadra na necessidade de selecionar métodos mais sustentáveis na construção, sendo que esta tecnologia pode apresentar vantagens económicas desde que seja possível desenvolver misturas recicladas com um desempenho adequado a longo prazo. Segundo a EPA [1], nos Estados Unidos a reciclagem tem-se tornado essencial uma vez que, além dos benefícios ambientais, também tem sido bastante benéfica a nível económico, tendo até contribuído para a criação de novos postos de trabalho.

Especificamente neste artigo apresenta-se o estado atual dum estudo que tem como objetivo principal a produção de misturas betuminosas recicladas com elevadas taxas de incorporação de material fresado, a quente e temperadas, utilizando percentagens crescentes até 50% de material fresado. Neste trabalho pretende-se determinar as propriedades do material fresado e as condições ideais em que devem ser produzidas estas misturas por forma a possuírem um desempenho mecânico idêntico ao de uma mistura betuminosa convencional, mantendo ao mesmo tempo condições adequadas de produção em central.

Em Portugal, grande parte dos pavimentos foram construídos no âmbito do Plano Rodoviário 2000, publicado em 1998 [2], e encontram-se atualmente próximos do final da sua vida útil e a necessitar de ser intervenionados. A acrescentar a esta necessidade, a constante escalada de preços sentida nos derivados do petróleo, nomeadamente no betume utilizado nos pavimentos, faz com que a reciclagem do material fresado (MF) seja cada vez mais uma alternativa de reabilitação desejável, até a nível económico.

O facto de o MF ser incorporado em novas misturas apresenta inúmeras vantagens. A colocação de material em aterro é reduzida ou totalmente mitigada, o que reduz a necessidade de ocupação de espaço para este fim. No que

se refere às misturas betuminosas recicladas (MBR) que incorporam o MF, estas necessitam de uma menor quantidade de material novo, uma vez que o MF já tem na sua constituição parte do material necessário para a nova mistura [3]. O facto de se reduzir a necessidade de agregados novos e betume leva a que a extração desses materiais seja mais reduzida, reduzindo o impacto ambiental e implicando menores custos desta solução de reciclagem (em especial no que concerne ao betume).

As vantagens referidas têm originado um grande interesse por parte dos intervenientes do sistema rodoviário, tendo surgido uma série de estudos que dão conta das diversas técnicas de reciclagem que tem vindo a ser desenvolvidas [4-6]. De referir, no entanto, que relativamente às diversas técnicas de pavimentação é possível distingui-las tendo por base o local de produção da mistura betuminosa reciclada, a temperatura a que a reciclagem é realizada, as características dos materiais a reciclar e o tipo de ligante usado [7].

Relativamente ao local e produção da mistura betuminosa reciclada, desde logo é possível distinguir entre a reciclagem *in situ* e a reciclagem em central. Quando se comparam as misturas produzidas *in situ* e em central, as primeiras apresentam normalmente características de desempenho inferiores às misturas produzidas em central [8]. No entanto, a necessidade de levar o MF para o local da central também aumenta os custos (transporte) associados à produção da mistura betuminosa reciclada. Relativamente á reciclagem em central, e uma vez que esta tem um custo de transporte dos materiais acrescido, é necessário obter misturas com melhores características finais, sendo esta produzidas com técnicas referidas como temperadas, semi-temperadas ou a quente.

No que refere ao tipo de centrais utilizadas para a produção da mistura betuminosa reciclada, estas apresentam limitações diferentes no que respeita às percentagens de incorporação possível. Quando a central não permite proceder ao aquecimento do MF a taxa de reciclagem situa-se entre os 35% e os 40%, e quando é possível fazer esse processo as taxas de reciclagem podem rondar os 65% a 70% [2]. Este tipo de limitação está normalmente relacionada com o rendimento esperado para as centrais, sendo que é esperado no máximo um decréscimo de rendimento de 20%.

Tendo todas estas técnicas disponíveis, é necessário numa primeira fase perceber de que forma é que o MF se comporta de acordo com o tipo de tratamento que lhe é dado numa fase prévia à produção em central. Assim, este estudo tem como objetivo analisar as propriedades do material fresado quando este é preparado (separado) de formas distintas, com especial enfoque numa análise comparativa entre o material separado em laboratório (com separação após desagregação) e a separação em larga escala feita em central com um classificador.

2 ENQUADRAMENTO GLOBAL DO TRABALHO REALIZADO

2.1 Projeto QREN para estudo de misturas recicladas e temperadas

A realização deste trabalho enquadra-se num projeto QREN mais abrangente, que tem a denominação “Eficiência Energética e Ambiental das Misturas Betuminosas e Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa”, e tem como um dos objetivos conseguir desenvolver misturas betuminosas recicladas com a incorporação duma elevada taxa de material fresado, até 50% da composição da mistura reciclada. Durante o projeto devem determinar-se quais as condições ideais em que devem ser produzidas estas misturas recicladas para possuírem um desempenho mecânico idêntico ao de uma mistura betuminosa convencional.

Através deste projeto QREN pretende dar-se resposta à necessidade das empresas melhorarem os processos de produção de misturas betuminosas, o que permitirá desenvolver novas capacidades e torná-las mais competitivas, nomeadamente no que respeita à produção de misturas recicladas inovadoras, mais sustentáveis em termos económicos e ambientais, sem prejudicarem a durabilidade do pavimento onde serão aplicadas. Os objetivos a atingir com as misturas estudadas neste projeto, podem ser utilizados como exemplo de empreendedorismo e inovação a nível nacional e internacional, o que permitirá aceder a novos mercados mais competitivos.

2.2 Central betuminosa para produção de misturas com altas taxas de reciclagem

A utilização de elevadas taxas de material reciclado obriga a utilizar centrais de produção com algumas alterações relativamente às que são utilizadas na produção de misturas betuminosas convencionais. No âmbito do projeto acima referido foi adquirida uma nova central (Fig. 1), que se diferencia das restantes centrais betuminosas descontínuas nas seguintes componentes:

- Anel especial para introdução de material fresado no interior do tambor secador;

- Linha de introdução de material fresado até ao misturador incluindo tolva de pesagem;
- Linha de introdução de fresados no anel do tambor secador com dosagem volumétrica;
- Sistema de betume espuma à entrada do misturador;
- Sistema automático para a introdução de fibras com dosagem ponderal;
- Sistema automático para a introdução de líquidos com dosagem volumétrica;



Fig. 1. Central de produção adquirida no âmbito do projeto QREN referido

A obtenção de taxas de reciclagem tão elevadas (50%) nesta central será conseguida com base na separação do material fresado e a sua introdução em diferentes fases do processo produtivo. Assim, surgiu a necessidade de estudar com rigor a forma de separar o fresado e as características resultantes dos materiais obtidos em cada uma das frações em que o material fresado é separado, o que deu origem ao trabalho apresentado neste artigo. Além disso também é fundamental avaliar o impacto que a introdução de quantidades de fresado tão elevadas pode ter nas condições de produção, nomeadamente o impacto do teor em humidade das duas frações de material fresado na temperatura de aquecimento dos agregados.

Para se conseguir obter misturas com elevadas taxas de reciclagem também poderá ser necessário recorrer à utilização de aditivos rejuvenescedores e de tecnologias temperadas, para garantir um envolvimento adequado dos agregados a menores temperaturas, reduzindo ao mesmo tempo o envelhecimento do betume, o consumo de energia e a produção de gases com efeitos de estufa (tecnologias possíveis de utilizar nesta central betuminosa).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Material fresado

Relativamente ao material fresado este é o resultado da fresagem da camada superficial de um pavimento de uma autoestrada, que foi armazenado no local onde está instalada a central acima referida. Ao ser unicamente fresada uma camada do pavimento pretende-se garantir uma maior homogeneidade no MF, de modo a contribuir para melhorar o controlo na produção das misturas betuminosas recicladas. O MF é composto por dois tipos de materiais: os agregados, que mantêm as suas características originais, que podem variar apenas ligeiramente as suas dimensões; o betume, relativamente ao qual é necessário realizar um estudo mais cuidadoso, dado que este foi submetido às condições ambientais durante alguns anos e alterou as suas propriedades (ficando envelhecido).

3.1.2 Betume convencional

O betume novo utilizado neste trabalho é um betume convencional 35/50, que é um betume usual na produção de novas misturas em Portugal, e cujas propriedades são comparadas às obtidas para os betumes recuperados das frações do material fresado. No entanto, no projeto QREN serão avaliados diferentes betumes, menos viscosos,

devido à necessidade de rejuvenescer o betume presente no MF, os quais serão estudados com ou sem a incorporação de outros aditivos rejuvenescedores.

3.2 Métodos experimentais de caracterização do material fresado

3.2.1 Separação do material fresado

No presente trabalho foi realizada uma caracterização bastante detalhada do material fresado, de forma a verificar se existem diferenças resultantes de cada uma das técnicas de separação utilizada, sendo apresentados em seguida os ensaios que foram utilizados para esse efeito.

No que respeita ao tratamento prévio do material fresado, neste trabalho simulou-se em laboratório o processo ideal de separação do mesmo (desagregação e separação em duas frações), designado neste artigo por método A, o qual envolve o aquecimento do fresado em estufa até 60 °C, após o qual, se realiza um processo mecânico de desagregação do fresado na misturadora laboratorial durante dois minutos. Após o fresado atingir a temperatura ambiente, este é separado no peneiro com malha de 8 mm, cujos detalhes poderão ser consultados num trabalho publicado anteriormente [9]. Por se tratar de um método totalmente realizado em laboratório é possível obter um maior controlo do processo.

Neste trabalho foi ainda estudado um outro procedimento de separação do MF (método B), realizado em central para grandes quantidades de MF, com recurso a um classificador com uma malha com abertura de 10 mm (Fig. 2).



Fig. 2. Classificador utilizado para separação do MF em duas frações

3.2.2 Percentagem de ligante do material fresado

A determinação da percentagem de ligante do material fresado é essencial uma vez que a formulação das misturas dependerá da percentagem de betume presente no MF. Para proceder à determinação da percentagem de ligante foi utilizado o método indicado na norma EN 12697-39, que tem por base a incineração do ligante. Este ensaio foi realizado em várias amostras de modo ter em consideração a variabilidade espectável da percentagem de ligante em diferentes amostras de MF.

De modo a perceber de que forma o método de separação condiciona a percentagem de betume presente em cada fração do fresado, este parâmetro foi determinado para cada fração obtida em cada método de separação estudado.

3.2.3 Análise granulométrica dos agregados do material fresado

No que respeita á análise granulométrica dos agregados, esta será feita numa primeira fase para a totalidade do fresado, e em seguida para as diferentes frações (fina e grossa, respetivamente para o material passado e retido no crivo de separação) obtidas com o recurso a cada método de separação atrás descrito (método A, em laboratório, e método B, em central). A análise granulométrica do MF e das várias frações em que foi separado foram realizadas de acordo com a norma EN 12697-2.

De referir que o estudo granulométrico foi realizado após determinação da percentagem de betume, para que as granulometrias digam respeito apenas às reais dimensões dos agregados do material fresado. Assim, é de esperar que na fração grossa sejam encontradas partículas com dimensões inferiores às do crivo utilizado para separação.

3.2.4 Recuperação e caracterização do ligante do material fresado

Para caracterização do betume existente no material fresado, primeiramente é necessário recorrer ao processo de recuperação do betume do material fresado. O processo de recuperação de betume compreende três fases:

- a primeira fase, na qual se separa o betume da fração mais grosseira da mistura, com o recurso à filtragem após adição de um solvente (tolueno);
- a segunda fase, na qual se separa (por centrifugação) as restantes partículas de sólidas mais finas que não foram filtradas e que se encontram em suspensão na parte líquida da mistura de tolueno com betume;
- a última fase que consiste na separação entre o betume e o solvente utilizado com recurso a um evaporador rotativo, segundo a norma EN 12697-3.

A caracterização do betume recuperado de cada fração em que o MF foi separado foi realizada com recurso a ensaios de penetração (EN 1426), ponto de amolecimento “anel e bola” (EN 1427) e viscosidade dinâmica (EN 13302). Esta última característica foi determinada para uma gama de temperaturas entre os 110 e os 180 °C, utilizando um viscosímetro rotacional, de acordo com um procedimento definido por Silva *et al.* [10]. Também se procedeu à caracterização do betume convencional 35/50 como referência de desempenho conhecida. Além destes ensaios também foram realizados ensaios reológicos para determinação do comportamento dos betumes (convencional e recuperado do MF separado em central) numa gama de temperaturas de serviço elevadas.

3.2.5 Caracterização reológica do ligante recuperado do material fresado

Para determinar as propriedades reológicas dos betumes em serviço numa gama de temperaturas médias e elevadas (40 a 90 °C), utilizou-se o reómetro dinâmico de corte (em terminologia anglo-saxónica *dynamic shear rheometer* ou DSR), de acordo com as normas AASHTO TP5, ASTM D7175 e EN 14770. Este equipamento permite caracterizar o comportamento viscoelástico do betume, quantificando o módulo de corte complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ) do betume a diversas temperaturas, para uma frequência de 10 rad/s (1,60 Hz). Este equipamento também permite determinar a viscosidade dinâmica nas condições de ensaio referidas.

O ensaio com o equipamento DSR é realizado numa amostra de betume (com 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura) entre dois pratos paralelos do equipamento, sendo o inferior fixo e o superior com capacidade de rodar em torno do seu eixo vertical. O prato superior, ao submeter a amostra de betume a um esforço de corte, através de um movimento oscilatório e com extensão controlada (que deve ser definida de forma a garantir o comportamento linear do betume), permite a determinação do módulo complexo do betume.

3.2.6 Teor em água do material fresado e temperaturas de produção

Um dos fatores que tem uma influência significativa nas condições de produção de misturas betuminosas com elevadas taxas de reciclagem é o teor em água do MF. Assim, neste trabalho foi avaliado o teor em água das duas frações de MF em diferentes alturas do ano. De modo a aferir a influência deste parâmetro na temperatura de aquecimento dos agregados virgens foram produzidas diferentes amassaduras na central betuminosa, para diferentes percentagens de MF incorporado a frio (diretamente no misturador).

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Separação do material fresado

Como referido anteriormente, neste trabalho pretendeu-se analisar a influência que um processo de desagregação do material fresado anterior à sua separação em duas frações poderia ter nas características de cada fração. Este aspeto poderá ser importante na medida em que a fração grossa do MF será introduzida no tambor secador e, por isso, é desejável que esta tenha a menor percentagem de betume (normalmente associada às partículas mais finas dos agregados). Deste modo, a desagregação prévia do MF permite reduzir o tamanho das suas partículas aglomeradas, amentando a percentagem de material que passa no peneiro onde se separa o MF em duas frações.

Os resultados da análise granulométrica do MF (como um todo) realizada antes da extração do betume podem ser observados na Fig. 3. Esses resultados demonstram a eficácia do processo de desagregação utilizado em

laboratório. Tomando como exemplo a percentagem de material passado no peneiro de 6,3 mm o valor obtido para o MF sem qualquer tipo de desagregação é de cerca de 40%, aumentando para um valor próximo de 70 % quando o material é sujeito ao processo de desagregação.

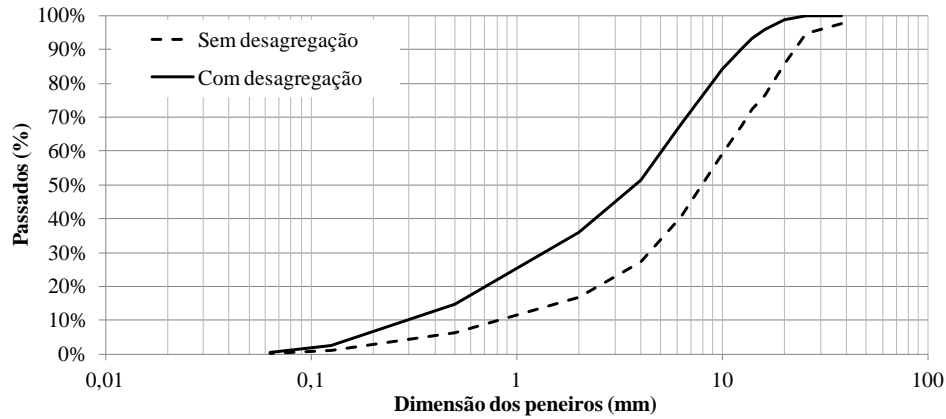


Fig. 3. Curva granulométrica do MF com desagregação e sem desagregação

4.2 Percentagem de ligante do material fresado

Um dos parâmetros que maior influência pode ter na formulação de uma mistura reciclada é a percentagem de ligante presente no material fresado. Uma correta determinação da quantidade de betume existente no MF permite também aferir de forma mais rigorosa a quantidade de betume novo a adicionar, o qual é a componente mais onerosa de uma mistura. Deste modo, os resultados obtidos para a percentagem de betume das diversas frações estudadas são apresentados na Fig. 4, na qual é possível verificar que a fração fina (de ambos os métodos de separação) detém uma maior percentagem de ligante. Isto pode ser explicado pela maior superfície específica dos agregados dessa fração, o que obriga a que a concentração de betume seja superior. Realça-se a proximidade entre os valores obtidos pelos dois métodos de separação, o que pode ser considerado como uma mais-valia, tendo em consideração a importância que este parâmetro tem na correta formulação deste tipo de misturas.

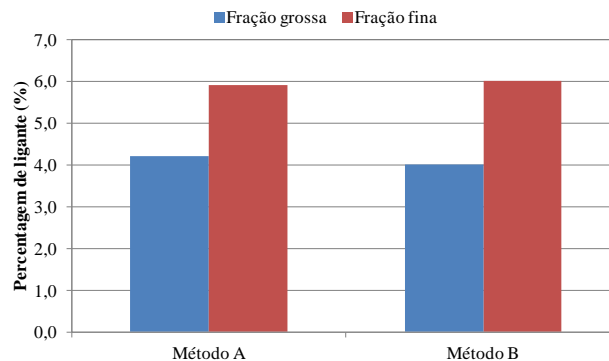


Fig. 4. Percentagem de ligante presente nas diferentes frações

4.3 Análise granulométrica do material fresado

Após a determinação da percentagem de ligante, procedeu-se a análise granulométrica das diferentes frações (fina e grosseira) obtidas pelos diferentes métodos de separação (método A – laboratório; método B - central), cujos resultados são apresentados na Fig. 5.

Analisando os resultados obtidos é possível verificar que no caso da fração grosseira, o método que nos permite obter maior percentagem de material com dimensão superior ou igual a 8 mm (valor de referência para separação entre material fino e grosso [11]) é o método A. Este resultado confirma a eficácia do método A desenvolvido em laboratório, que é uma boa referência para resultados futuros de separação a realizar em central. O método B apresenta uma maior percentagem de material fino na fração grosseira, embora as diferenças não sejam muito

significativas (em comparação com o método A) para um procedimento realizado em larga escala. A minimização da quantidade de material fino na fração grossa do MF (e da quantidade de betume existente nessa fração) é um aspeto fulcral no sucesso da reciclagem com elevadas percentagens de MF, visto que a fração grossa vai estar muito mais tempo em contacto com temperaturas elevadas que podem danificar esse betume.

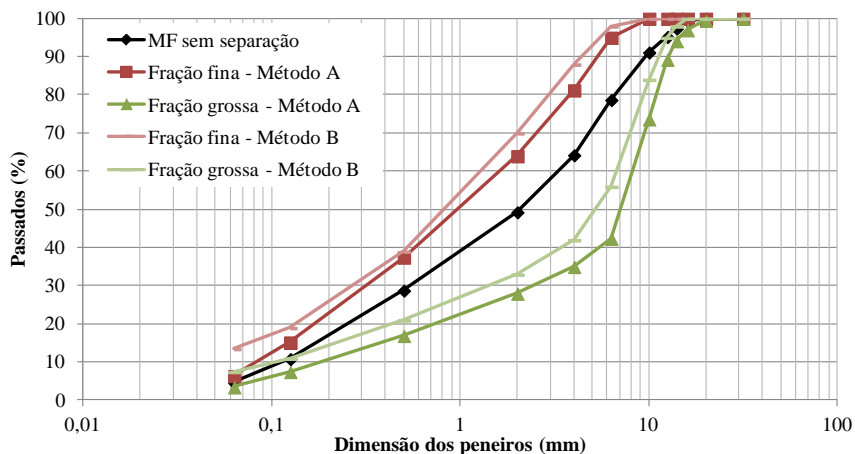


Fig. 5. Análise granulométrica das frações de acordo com o método de separação

A maior percentagem de agregados finos obtidos no método B (quer na fração fina, quer na fração grossa), após a separação com o classificador em central, demonstra a existência de alguma variabilidade que é expectável ocorrer em diferentes amostras de MF. Além disso, foi possível verificar que a quantidade de material fresado das frações finas (60 a 70%), em ambos os métodos de separação, é claramente superior à obtida nas frações grossas (30 a 40%).

No entanto, este facto pode trazer alguns problemas no que se refere à produção de misturas recicladas, uma vez que a quantidade da fração fina de MF a introduzir a frio no misturador será tendencialmente mais elevada. Isto aumenta o aquecimento a que os agregados novos e a fração grossa do MF são sujeitos (provocando um maior envelhecimento do betume) para se conseguir a temperatura de produção desejada. Este aspeto será apresentado mais em pormenor aquando da indicação da influência do teor em água do MF nas temperaturas de produção.

4.4 Recuperação e caracterização do ligante do material fresado

Depois de proceder à recuperação de betume das diferentes frações (fina e grossa) do MF separado pelos métodos A e B, procedeu-se à caracterização básica desses betumes recuperados. Ao mesmo tempo procedeu-se à caracterização dum betume convencional 35/50 com os mesmos ensaios. Os resultados referentes à penetração e à temperatura de amolecimento encontram-se sintetizados na Fig. 6.

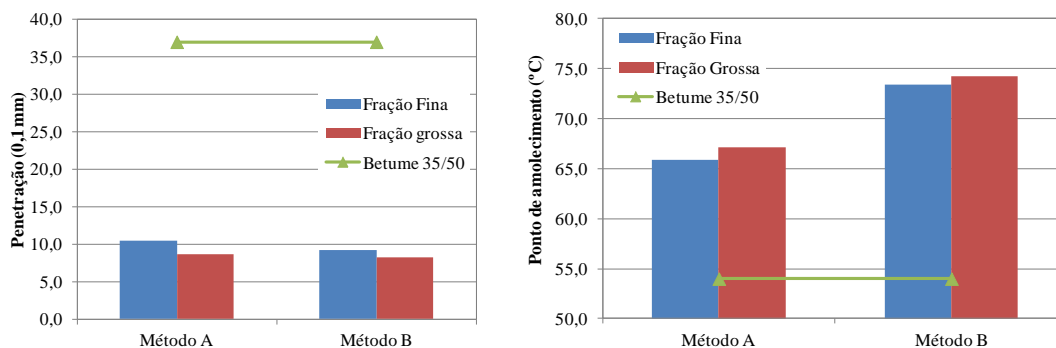


Fig. 6. Resultados de penetração e anel e bola dos betumes recuperados

A gama de valores de penetração dos diferentes betumes recuperados não é muito diferente, variando entre 8 e 10 décimas de milímetro, o que corresponde a betumes muito envelhecidos e claramente mais duros que o

betume convencional 35/50. Além disso verifica-se que o betume recuperado das frações finas está ligeiramente menos envelhecido, o que é bastante positivo quando esta fração tem maior quantidade de betume que é sujeito a um envelhecimento muito menor do que a fração grossa (que é introduzida no secador). Também se verifica que o betume recuperado do MF separado na central (método B) tem valores de penetração ligeiramente mais baixos do que os obtidos no método A, o que pode ser consequência de alguma variabilidade do MF.

Os resultados do ponto de amolecimento dos betumes recuperados do MF confirmam em grande parte a análise realizada sobre os resultados de penetração (os betumes com menor penetração têm temperaturas de amolecimento mais altas), embora seja possível verificar diferenças mais significativas entre os resultados obtidos no método de separação A e B. Além disso, volta a verificar-se que o ponto de amolecimento dos betumes recuperados é muito superior ao do betume convencional 35/50.

Relativamente à viscosidade dinâmica, e como se pode ver pela Fig. 7, é visível que pelo método B os valores obtidos são superiores aos obtidos pelo método A, como já foi observado nos resultados de anel e bola. Mais uma vez o betume recuperado das frações finas do MF apresentou uma menor viscosidade relativamente às frações grossas obtidas pelo mesmo método de separação, o que é positivo para conseguir melhores misturas recicladas quando o MF fino for colocado diretamente no misturador. Apesar disso, e como esperado, todos os materiais recuperados estão envelhecidos e têm uma viscosidade muito superior ao betume 35/50.

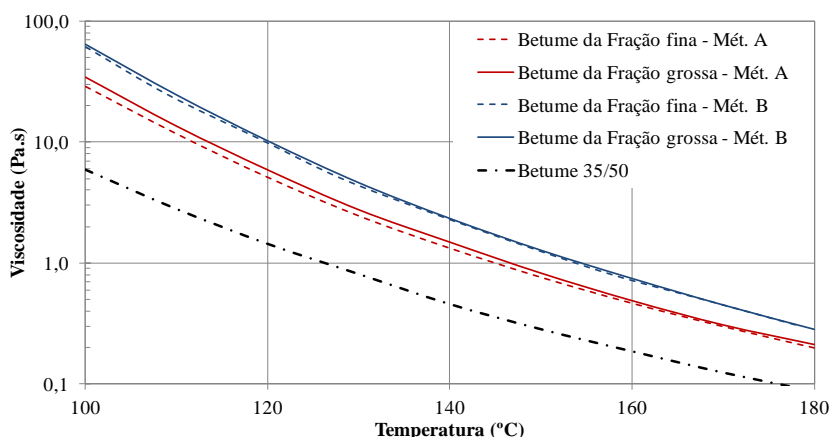


Fig. 7. Viscosidade dinâmica dos betumes de acordo com a fração e o método de separação

4.5 Caracterização reológica do ligante recuperado do material fresado

A caracterização reológica dos ligantes recuperados do MF foi realizada apenas para o material obtido em central, pelo método de separação B, e para o betume convencional 35/50 de referência. Os resultados dessa caracterização reológica são apresentados na Fig. 8, nomeadamente no que diz respeito ao módulo de corte complexo (G^*), ângulo de fase (δ) e $G^*/\text{sen}\delta$ (valor utilizado para definir o grau PG dos betumes).

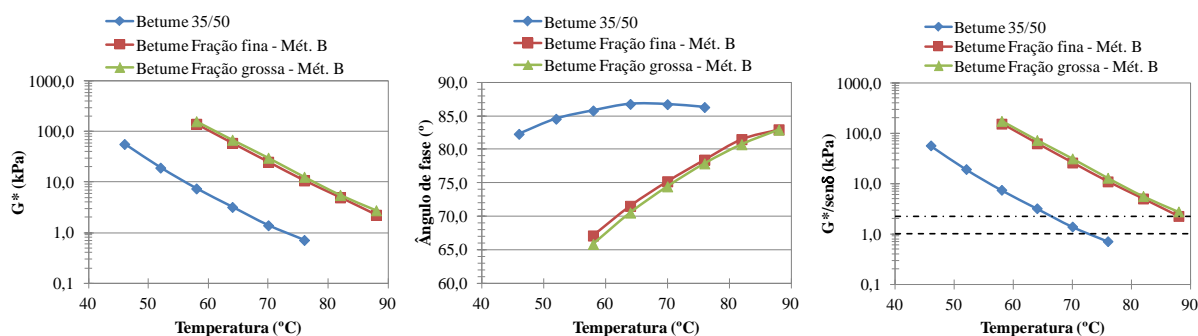


Fig. 8. Reologia dos betumes recuperados do MF (método B) e do betume convencional

Os resultados da caracterização reológica confirmam as observações já realizadas na caracterização básica dos ligantes, ou seja, os betumes recuperados das frações do MF estão muito envelhecidos e são claramente mais

rígidos do que o betume convencional 35/50 (a relação dos módulos é superior a 10). Além disso verifica-se que o ângulo de fase do betume 35/50 (próximo do valor máximo de 90°) é muito superior ao dos betumes recuperados para temperaturas de serviço elevadas em que é expectável que comece a ocorrer uma transição de comportamento (amolecimento do betume). Também se volta a verificar que o betume recuperado da fração fina está ligeiramente menos envelhecido, visto que apresenta valores de G^* ligeiramente mais baixos.

Procurou fazer-se uma classificação simplificada do grau PG para temperaturas de serviço elevadas dos betumes ensaiados. Nesse sentido utilizou-se como referência os valores de $G^*/\text{sen}\delta$ de 1,0 kPa (para o betume não envelhecido) e de 2,2 kPa (para os betumes envelhecidos, embora este valor seja uma referência apenas para o envelhecimento a curto prazo, inferior ao sofrido pelos betumes recuperados). Estes valores são apresentados a traço interrompido e traço ponto para ajudar a fazer a leitura do gráfico. Assim, o betume 35/50 será classificado como PG70, enquanto os betumes recuperados podem ser classificados de forma simplificada como PG88.

4.6 Teor em água do material fresado e temperaturas de produção

A produção de misturas betuminosas recicladas a quente com elevadas taxas de incorporação de MF tem implicações significativas no rendimento da central e no consumo energético associado ao sobreaquecimento dos agregados virgens. Este aspeto torna-se ainda mais importante quando o MF apresenta um teor em água mais elevado, nomeadamente nas épocas do ano com maior precipitação. Neste trabalho foram realizados ensaios para a determinação do teor em água em duas alturas distintas (julho e novembro) tendo-se verificado que o teor em água do material fresado variou de forma significativa, conforme se apresenta no Quadro 1.

Quadro 1. Teor em água do material fresado (%)

| Mês | Fração fina | Fração grossa |
|----------|-------------|---------------|
| julho | 4,6 | 2,6 |
| novembro | 8,8 | 5,4 |

Como se pode verificar pela análise do Quadro 1, o MF apresenta um teor em água muito superior em novembro, devido à ocorrência de precipitação nos meses que antecederam a realização dos ensaios, mesmo tendo sido tomadas medidas para cobrir o MF, impedindo-o de entrar em contacto direto com a chuva.

De forma a avaliar a influência que a produção de misturas betuminosas recicladas em diferentes alturas do ano (com diferentes teores em água do MF) poderá ter na temperatura de aquecimento dos agregados virgens foram realizadas diferentes amassaduras em central, cujos valores de temperatura são apresentados na Fig. 9.

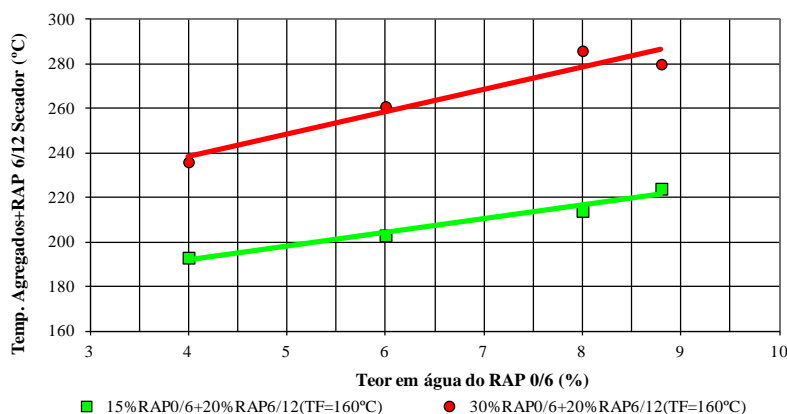


Fig. 9. Evolução da temperatura de aquecimento dos agregados virgens com o teor em água da fração fina do MF

Como se pode verificar pelos resultados apresentados na Fig. 9, a temperatura à qual é necessário aquecer os agregados virgens para se conseguir produzir uma mistura com 50% de MF poderá tornar a produção deste tipo de misturas a quente inviável do ponto de vista económico, quer pelo consumo energético associado, quer pelo rendimento da central, uma vez que o tempo de mistura associado a cada amassadura é significativamente maior para se permitir a transmissão da temperatura dos agregados virgens para a fração fina do MF e a consequente

evaporação da água. Deste modo, é possível concluir que este tipo de misturas deverá ser realizado com recurso a outro tipo de tecnologia, nomeadamente, a produção de misturas betuminosas temperadas e/ou semi-temperadas, por exemplo, com recurso a betume-espuma. Esta avaliação faz parte do projeto referido anteriormente e será realizado num futuro próximo.

5 CONCLUSÕES

Com este trabalho verificou-se a importância de realizar uma caracterização adequada do MF a utilizar em misturas betuminosas recicladas a quente, em especial quando se pretende utilizar elevadas taxas de incorporação de MF (o que será cada vez mais necessário).

Verificou-se que o processo de separação do MF tem uma influência significativa nas propriedades de cada fração (fina e grossa), em especial na quantidade de finos e betume da fração grossa, o que pode ter consequências na qualidade final da mistura. O betume da MF encontra-se muito envelhecido, sendo fundamental o seu rejuvenescimento para reduzir a sua rigidez e melhorar a sua flexibilidade. Verificou-se ainda que a fração fina do MF, a introduzir a frio no misturador, tem uma quantidade de betume superior que se encontra ligeiramente menos envelhecido do que o betume da fração grossa (introduzida no secador).

Por último concluiu-se que as temperaturas de produção das misturas recicladas são muito influenciadas pelo teor em água do MF, podendo inviabilizar a produção de misturas a quente com a utilização de 50% de MF. A solução poderá passar pelas condições de armazenamento do fresado (em especial da fração fina), mas a principal alternativa será a utilização de tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas e/ou semi-temperadas, por exemplo, com recurso a betume-espuma.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do QREN e do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE, projeto n.7603 SI Inovação e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto estratégico UI 4047 – 2011-2012 do Centro do Território Ambiente e Construção.

7 REFERÊNCIAS

1. EPA, *Wastes - Resource Conservation - Reduce, Reuse, Recycle*, United States Environmental Protection Agency; <http://www.epa.gov/epawaste/conservation/rrr/recycle.htm>; Acedido em 18 de junho de 2012.
2. F. Branco, P. Pereira, L.P. Santos, *Pavimentos Rodoviários*, Edições Almedina, SA, Coimbra, 2005.
3. K. Aravind, A. Das, Pavement design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (5), pp. 928-936, 2007.
4. AIPCR, *Pavement Recycling*, World Road Association, Paris, 2003.
5. EAPA, *Environmental Guidelines on Best Available Techniques for the Production of Asphalt Paving Mixes*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, 2007.
6. INIR, *Construção e Reabilitação de Pavimentos - Reciclagem de Pavimentos*, Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, Lisboa, 2011.
7. P. Fonseca, *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários*, RECIPAV - Engenharia e Pavimentos, Lda.; <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>; Acedido em 17 de outubro de 2012.
8. F.C.G. Martinho, *Reciclagem de Pavimentos - Estado da Arte, Situação Portuguesa e Seleção do Processo Construtivo*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.
9. J.R.M. Oliveira, H.M.R.D. Silva, L.P.F. Abreu, P.A.A. Pereira, Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 53, pp. 266-275, 2012.

10. H.M.R.D. Silva, J.R.M. Oliveira, E.J. Peralta, C.I.G. Ferreira, Evaluation of the rheological behaviour of Warm Mix Asphalt (WMA) modified binders, *7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials*, Rhodes, Greece, pp. 661-673, 2009.
11. H.M.R.D. Silva, J.R.M. Oliveira, C.M.G. Jesus, Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 60, pp. 38-48, 2012.