

156-1-13

**INFLUENCIA DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN GIRATORIA EN
LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS Y RESISTENCIA AL
AHUELLAMIENTO DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS
INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA NAS
PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS E NA RESISTÊNCIA À
DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS BETUMINOSAS**

Dinis Gardete

Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco
Castelo Branco, Portugal
dgardete@ipcb.pt

Luís Picado Santos

DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, Portugal
picado.santos@civil.ist.utl.pt

Silvino Capitão

Instituto Politécnico de Coimbra, ISEC / CESUR, IST, UTL
Coimbra / Lisboa, Portugal
capitao@isec.pt

Resumen

En este trabajo se evalúa como la energía de compactación utilizada en la formulación de mezclas bituminosas influencia las sus propiedades. Se utilizó una mezcla densa de utilización muy corriente en Portugal, un AC 20 base 35/50 (MB), y una mezcla del tipo Stone Mastic Asphalt (SMA), un SMA 12,5. Se hizo la formulación de las mezclas utilizando las metodologías tradicionales, utilizando el método Marshall para la mistura densa y para la mezcla SMA el análisis de la porosidad en pruebas Marshall compactadas con 50 golpes por cara. Se hizo la formulación de las dos mezclas con las especificaciones usuales de la metodología SUPERPAVE. Se ha determinado el porcentaje de ligante óptimo para diferentes niveles de la energía de compactación, evaluando cuales se ajustan mejor a las mezclas utilizadas. La compactibilidad de las mezclas y los valores del *Locking Point* son igualmente introducidos en el análisis. Con los obtenidos se procura evaluar la energía de compactación, N_{design} , más adecuada a la formulación de las mezclas utilizadas. Para la mezcla AC 20 se presentan los resultados de los ensayos de desempeño ya realizados. El desempeño al ahuellamiento fue evaluado utilizando el ensayo de pista. Se procura con los resultados evaluar como la energía de compactación afecta el desempeño de las mezclas y determinar intervalos de valores adecuados a su formulación para mejorar su desempeño considerando las condiciones de servicio esperadas.

Resumo

Neste trabalho procurou avaliar-se de que modo a energia de compactação utilizada na formulação volumétrica influencia as propriedades das misturas betuminosas. As misturas utilizadas foram uma mistura densa de utilização corrente em Portugal, um AC 20 base 35/50 (MB), e uma mistura do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), um SMA 12,5. As misturas foram formuladas pelas metodologias tradicionais, utilizando respetivamente, a metodologia Marshall para a mistura densa e analisando a porosidade em provetes Marshall compactados com 50 pancadas por face para o SMA. A formulação volumétrica das duas misturas foi realizada de acordo com as especificações gerais da metodologia SUPERPAVE. Determinou-se a percentagem ótima em betume para diversos níveis de compactação, avaliando quais se ajustam às misturas estudadas. A compactabilidade e os valores do *Locking Point* são igualmente introduzidos na análise. Com base nos resultados procura avaliar-se os valores para o nível de compactação, N_{design} , adequados à formulação deste tipo de misturas. Para a mistura AC20 apresentam-se os resultados dos ensaios de desempenho já realizados. O desempenho à deformação permanente foi avaliado através de ensaios de *wheel-tracking*. Procura-se deste modo avaliar como o nível de compactação utilizado na formulação das misturas betuminosas afecta o seu desempenho e determinar intervalos de valores adequados à formulação das misturas de modo a otimizar o seu desempenho face às condições de serviço expectáveis.

INTRODUÇÃO

A seleção da percentagem ótima em betume é realizada utilizando geralmente o método de Marshall ou formulações do tipo “receita”. O método de Marshall utiliza um ensaio empírico apresentando algumas limitações na análise de misturas não tradicionais. A utilização dos ensaios de desempenho na melhoria do processo de formulação encontra-se restringida pela limitada experiência existente na sua utilização (Baptista, et al, 2011). Mesmo com a utilização de ensaios de desempenho, há vantagens na utilização de um método simples para a seleção da percentagem em betume mas que permita de um modo eficaz adequar as propriedades das misturas às suas condições de serviço. Deste modo, com uma melhor seleção da percentagem em betume, num primeiro momento, seria possível poupar tempo e recursos na fase de análise do desempenho.

Uma das alternativas ao método de Marshall é a metodologia de formulação volumétrica SUPERPAVE, desenvolvida no programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP). Nesta metodologia o procedimento de seleção da percentagem ótima em betume é realizado com base nas propriedades volumétricas de provetes compactados com o compactador giratório. A percentagem ótima em betume dependerá da energia de compactação utilizada. Deste modo, o nível de compactação é um parâmetro fundamental na metodologia. Os níveis de compactação para formulação de misturas utilizados variam geralmente entre os 80 e os 100 giros o que, segundo alguns autores permite obter um bom equilíbrio nas propriedades, nomeadamente na resistência à deformação permanente e à fadiga (Prozzi e Aguiar, 2007).

Neste trabalho foi realizada a formulação volumétrica de acordo com os procedimentos representativos da metodologia SUPERPAVE em duas misturas betuminosas. Um AC 20 35/50 base (MB), que é uma mistura betuminosa de grande utilização em Portugal em camadas de base, ligação e regularização. A outra mistura utilizada foi do tipo *Stone Mastic Asphalt*, uma SMA

12,5, utilizada em camadas de desgaste. Um dos objetivos foi analisar o intervalo de valores que pode ser adequado à formulação deste tipo de misturas de modo a obter propriedades volumétricas semelhantes às obtidas com os métodos de formulação correntemente utilizados e que foram tomados como referência. Foi igualmente um objetivo avaliar a trabalhabilidade das misturas com base em parâmetros obtidos a partir dos procedimentos de compactação na prensa giratória.

MISTURAS BETUMINOSAS UTILIZADAS

As misturas foram realizadas com agregado granítico. O betume utilizado foi da classe 35/50, com uma penetração a 25°C de 42,2 mm/10 e uma temperatura de amolecimento de 53,5°C. As misturas SMA possuem granulometria descontínua e uma percentagem em betume superior às misturas betuminosas tradicionais (Drüschner e Schäfer, 2000). Foram utilizadas fibras celulósicas, como aditivo para evitar a drenagem do betume, numa proporção de 0,3% (relativamente ao peso total da mistura). A mistura AC 20 (MB) é uma mistura densa e a sua granulometria foi definida de acordo com as indicações do Caderno de Encargo Tipo Obra da Estradas de Portugal, SA. Para a mistura SMA 12,5 utilizaram-se as indicações da norma EN 13108-5, da autoridade rodoviária alemã e do projeto NCHRP 9-8. As curvas granulométricas das misturas encontram-se na Figura 1.

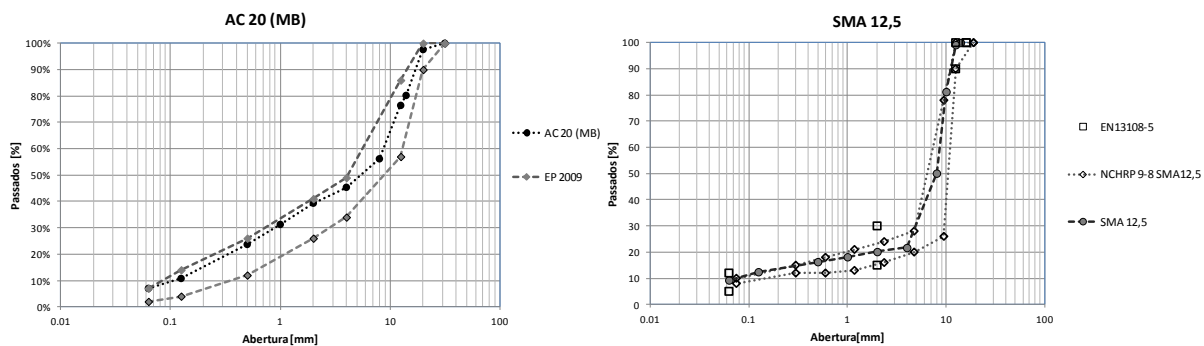


Figura 1: Curvas granulométricas das misturas AC20 e SMA 12,5

FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

Mistura AC20 (MB)

Formulação Marshall

O método de Marshall é utilizado correntemente na formulação de misturas betuminosas tradicionais, conforme indicado na NP EN 13108-1 e no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal. Para misturas do tipo AC 20 (MB) é utilizada uma energia de compactação de 75 pancadas por face. A temperatura de mistura utilizada foi de 155°C e a temperatura de compactação foi de 145°C. Foram utilizadas 5 percentagens em betume, de 3,5% a 5,5%, com

incrementos de 0,5%. Os resultados são apresentados na Figura 2. A percentagem ótima em betume obtida por este método foi de 5,0%.

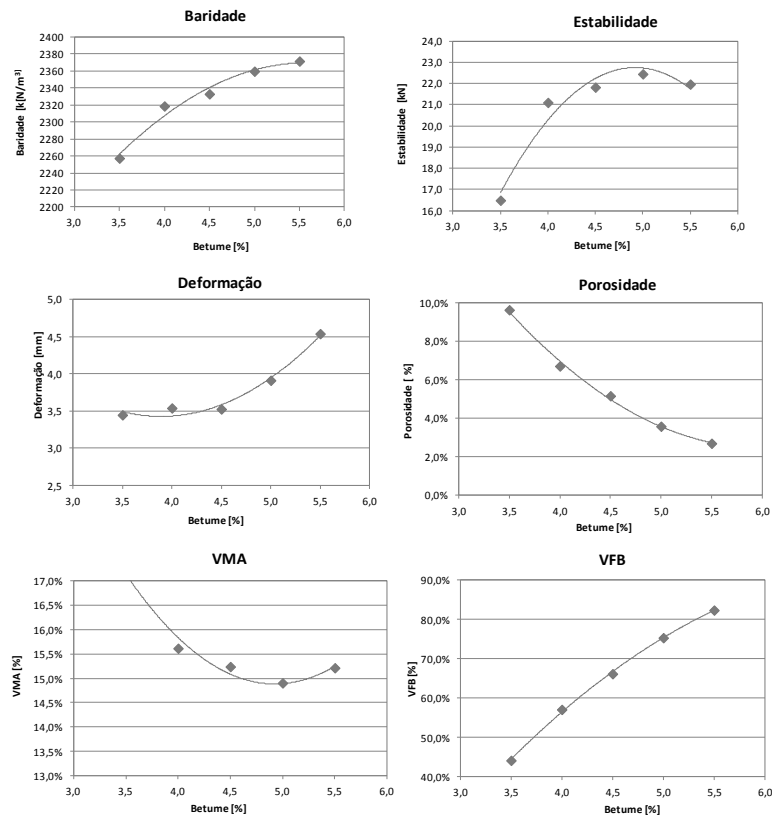


Figura 2: Resultados da formulação Marshall para a mistura AC20 (MB)

Formulação Volumétrica

Para o AC 20 foi utilizada uma energia de compactação de 125 giros. Este é o valor adotado para N_{design} em diversos Departamentos Estaduais de Transportes (DOT) dos EUA para pavimentos com tráfego pesado. Foram utilizadas 4 percentagens em betume, de 4,0% a 5,5%, com incrementos de 0,5%. A porosidade considerada para formulação da mistura foi de 4,0%. Foi analisada a variação da percentagem ótima em betume que seria obtida para diversos níveis de compactação. Os resultados são apresentados na Figura 3. Uma percentagem ótima em betume de 5,0%, igual à proveniente do método de Marshall, seria obtida para um N_{design} de 60 giros.

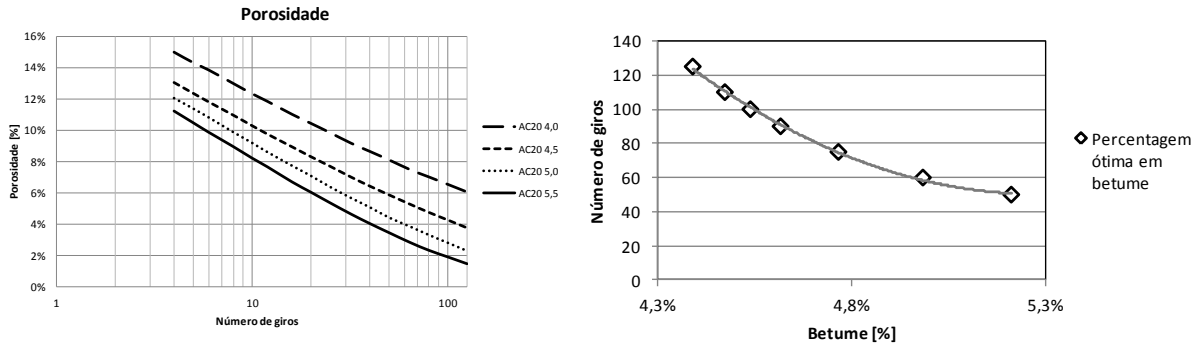


Figura 3: Evolução da porosidade e variação da percentagem ótima em betume com o número de giros para a mistura AC20 (MB)

Na Figura 4 e na Figura 5 são apresentadas as variações da porosidade, do VMA (vazios no esqueleto sólido do agregado) e do VFB (vazios preenchidos por betume) com a percentagem em betume e a energia de compactação durante a compactação giratória e no método de Marshall. Pode observar-se que as propriedades volumétricas das misturas obtidas pelos dois métodos são similares para uma energia de compactação entre os 50 e os 75 giros. Para percentagens em betume mais baixas esta similaridade ocorre para uma energia de compactação de 75 giros. Com o aumento da percentagem em betume a correspondência ocorre para níveis de compactação mais próximos dos 50 giros.

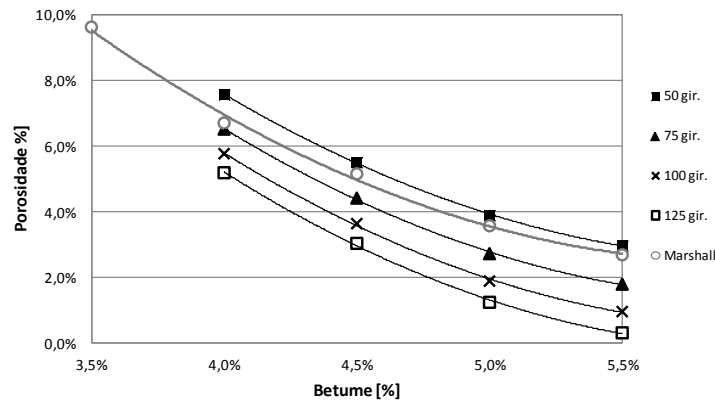


Figura 4: Evolução da porosidade com a percentagem em betume para a mistura AC20 (MB)

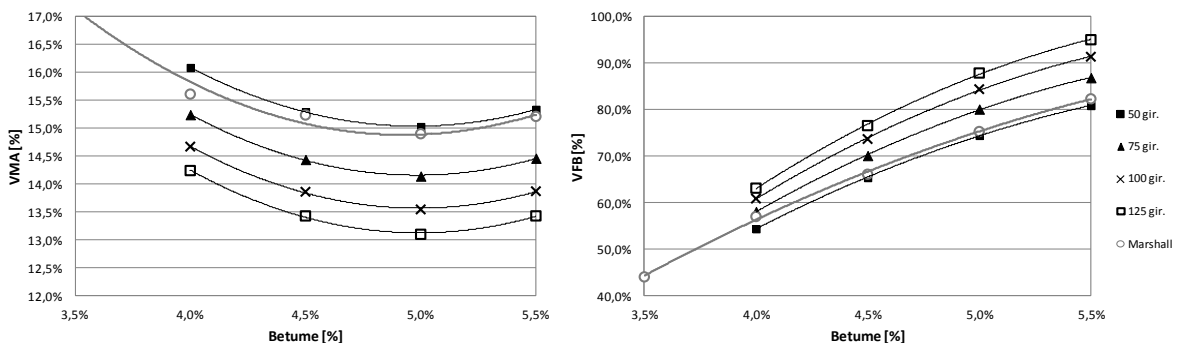


Figura 5: Evolução do VMA e do VFB com a percentagem em betume para a mistura AC20 (MB)

Mistura SMA 12,5

Formulação Tradicional

O método tradicional de formulação de misturas SMA tem por base a análise da porosidade em provetes Marshall (Drüschner e Schäfer, 2000). Neste trabalho utilizou-se uma energia de compactação de 50 pancadas por face. Foram utilizadas 5 percentagens em betume de 5,5% até 7,5%, com incrementos de 0,5%. Os provetes da mistura SMA foram selados por imersão em parafina fundida de acordo com a EN 12697-6. A Figura 6 apresenta a variação com a percentagem em betume de algumas das propriedades da mistura SMA 12,5, nomeadamente, a porosidade, a baridade, o VMA e o VFB.

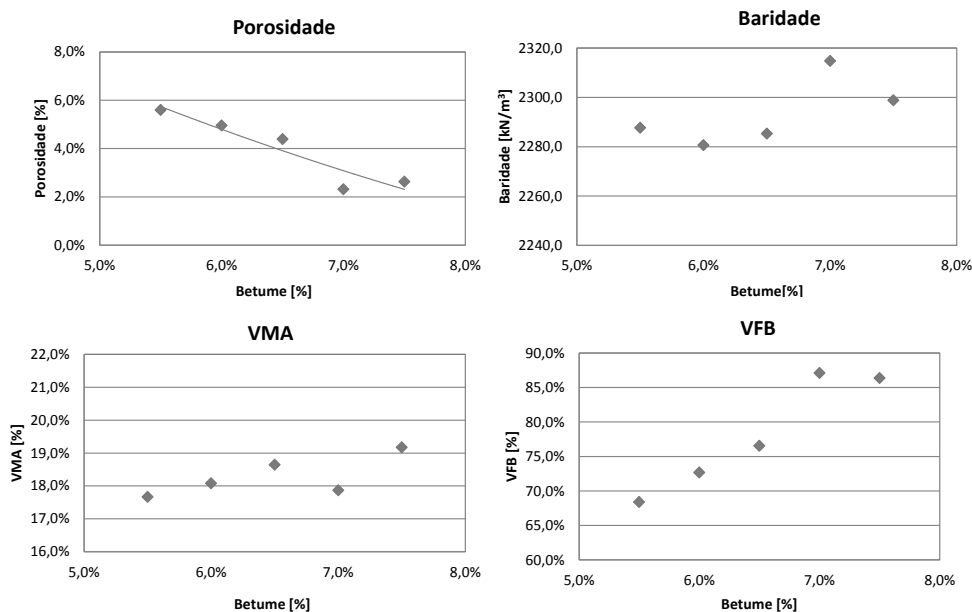


Figura 6: Resultados da formulação tradicional para a mistura SMA12,5

A percentagem ótima em betume é selecionada de modo a obter porosidades nos provetes Marshall entre 3,0% e 4,0% (Gardete et al, 2009). Para a mistura SMA 12,5, considerando este intervalo de variação da porosidade, seriam obtidas percentagens ótimas em betume entre 6,5% e 7,0%. Como valor de referência utilizou-se uma porosidade de formulação de 4%, obtendo-se deste modo uma percentagem ótima de betume de 6,5%.

Formulação Volumétrica

Os níveis de compactação utilizados para a formulação do SMA apresentam algumas variações cujos valores podem variar geralmente entre 50 e 100 giros. Neste trabalho utilizou-se um nível de compactação de 50 giros na compactação. Foram utilizadas 4 percentagens em betume, de 6,0% a 7,5% com incrementos de 0,5%. Foi utilizada uma porosidade alvo de 4% para selecionar a percentagem ótima em betume. A determinação da porosidade foi realizada com os provetes

selados com parafina. A variação da porosidade, VMA e VFB com a percentagem em betume para ambos os métodos de formulação são apresentados nas Figuras 7 e 8.

Pode observar-se que para um nível de 50 giros a percentagem ótima em betume seria de 6,6%. Esta percentagem ótima em betume é semelhante ao valor de 6,5% obtido pela metodologia tradicional. Deste modo, para esta mistura e nas condições utilizadas, um N_{design} de 50 giros é adequado para a formulação, obtendo-se resultados similares aos da metodologia tradicional.

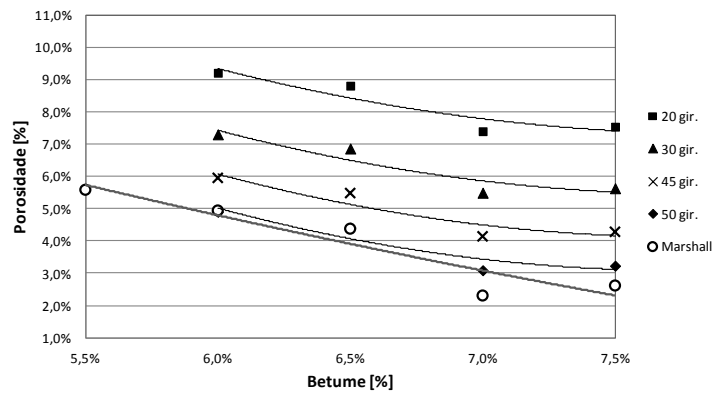


Figura 7: Evolução da porosidade com a percentagem em betume para a mistura SMA 12,5

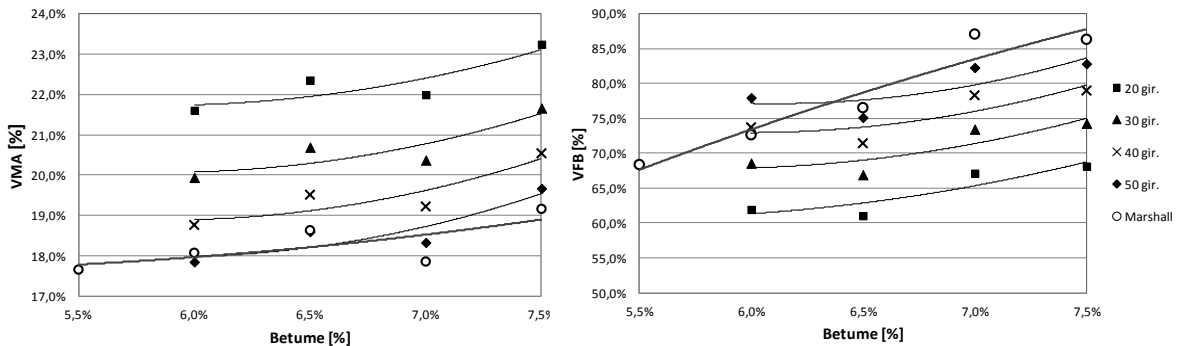


Figura 8: Evolução do VMA e do VFB com a percentagem em betume para a mistura SMA 12,5

TRABALHABILIDADE E COMPACTABILIDADE

Locking Point

O *Locking Point* pode ser definido como a energia de compactação para a qual a altura do provete diminui menos de 0,1 mm em três giros consecutivos. Para a mistura AC 20 (MB) os valores do *Locking Point* encontram-se entre os 74 e os 81 giros (Gardete et al, 2009). Observa-se que existe um ligeiro aumento do valor do *Locking Point* com o incremento da percentagem em betume ao mesmo tempo que este ocorre para porosidades mais baixas (Figura 9). No caso da mistura SMA 12,5 não se alcançou o *Locking Point* em nenhum dos provetes para a energia de compactação utilizada, 50 giros.

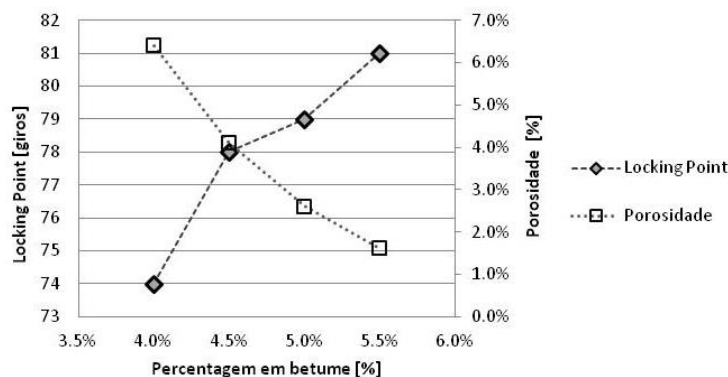


Figura 9: Variação do Locking Point e da porosidade em que é atingido para a mistura AC20 (MB)

Trabalhabilidade das Misturas

Com a evolução da compactação dos provetes é possível avaliar a trabalhabilidade das misturas, o que influencia a sua compactabilidade. Com base nas curvas de compactação obtidas no compactador giratório foi determinado o CEI (Compaction Energy Index). O CEI traduz os resultados da compactação entre o giro número 8 e aquele em que se obtém 92% da baridade máxima teórica (Figura 10).

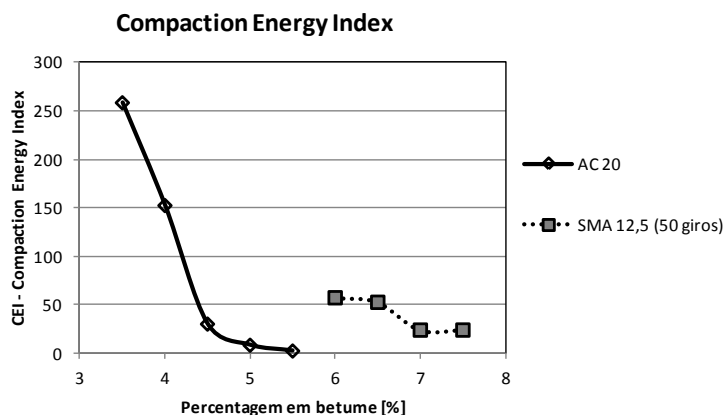


Figura 10: Variação do CEI com a porcentagem em betume

A compactabilidade das misturas melhora com a diminuição do CEI. Deste modo, a trabalhabilidade melhora com o aumento da porcentagem em betume em ambas as misturas. Esta variação é mais acentuada para a mistura densa AC 20. Para a mistura SMA a variação é mais ligeira e os valores mínimos obtidos são superiores aos da mistura AC 20. Deste modo o CEI apresenta-se mais adequado à caracterização de misturas densas e a comparação entre resultados obtidos para diferentes tipos de misturas deve ser analisado com cuidado. Para a mistura AC 20 os resultados indicam que com percentagens em betume de 3,5% e 4,0% esta mistura é pouco compactável. Para o SMA as percentagens em betume de 6,0% e 6,5% apresentam uma trabalhabilidade ligeiramente inferior.

DESEMPENHO DA MISTURA AC20

À data deste trabalho tinham-se iniciado os ensaios de desempenho na mistura AC 20. Apresentam-se em seguida os resultados obtidos nos ensaios já realizados.

Wheel Tracking

O equipamento de *Wheel-Tracking* utilizado foi um equipamento de pequena dimensão, *Small size device model A*, de acordo com a norma EN 12697-22, (CEN, 2007). Nestes equipamentos o provete é condicionado e ensaiado à temperatura desejada através do aquecimento do ar na câmara de ensaio. Os provetes ensaiados foram lajes com 340x300x60 mm de acordo com a EN 12697-22. Os provetes foram condicionados durante 4 horas à temperatura de ensaio. Para cada temperatura ensaiaram-se 3 séries, com percentagens em betume de 4,5%, 5,0% e 5,5%. Para cada série foram ensaiados 2 provetes. Com base neste ensaio pode determinar-se a taxa de deformação, WTS_{AIR} , e a percentagem de formação de rodeira, PRD_{AIR} , Figura 11. Os resultados obtidos indicam uma redução da resistência à deformação permanente com o aumento da percentagem em betume. Esta redução é mais sensível quando a temperatura aumenta de 50°C para 60°C.

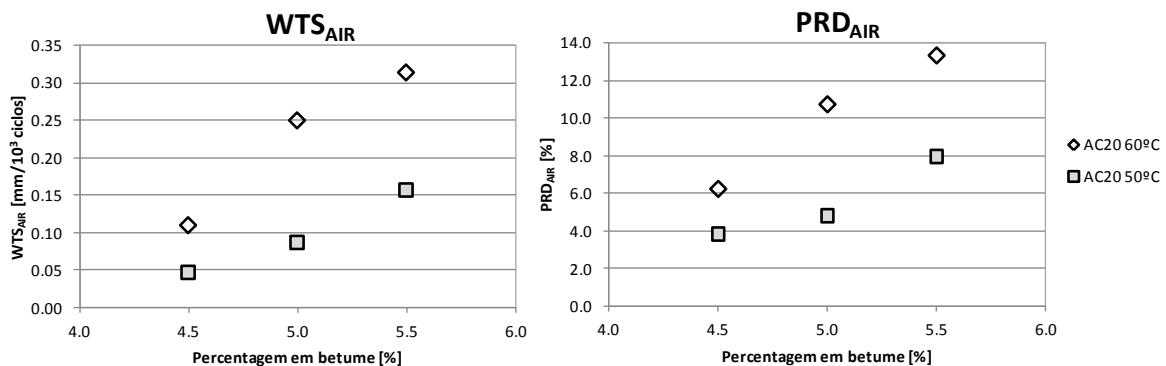


Figura 11: Valores do WTS_{AIR} e do PRD_{AIR} para a mistura AC 20

ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados indicam que para a mistura AC 20 (MB) estudada um N_{design} de 60 giros fornecerá na metodologia de formulação volumétrica uma percentagem ótima em betume semelhante à obtida no método de Marshall. Valores de N_{design} entre 50 e 75 giros conduzem a propriedades volumétricas da mistura formulada similares às obtidas no método de Marshall. Para a mistura SMA 12,5 um N_{design} de 50 giros permitiu obter uma mistura com propriedades semelhantes às que se obtiveram na metodologia tradicional com provetes Marshall compactados com 50 pancadas por face. Os valores do *Locking Point* para a mistura AC 20 (MB) encontram-se entre os 74 e os 81 giros. Observa-se um incremento do *Locking Point* com o aumento da percentagem em betume sendo este atingido para valores da porosidade inferiores. Deste modo, serão expectáveis valores máximos para o N_{design} para esta mistura na ordem de 80 giros. Para a mistura SMA 12,5 o *Locking Point* não foi atingido em nenhum provete para a energia de compactação

utilizada, 50 giros. A trabalhabilidade das misturas aumentou com a percentagem em betume. No caso da mistura AC 20 essa variação foi claramente superior à observada na mistura SMA 12,5. As misturas AC 20 com 4,0 e 4,5% de betume apresentam baixa trabalhabilidade. Para o SMA 12,5 as misturas com 6,0% e 6,5% de betume apresentam uma trabalhabilidade um pouco inferior às misturas com 7,0% e 7,5% de betume. O ensaio de resistência à deformação permanente foi realizado para a mistura AC20. A resistência diminuiu com o aumento da percentagem em betume e o aumento da temperatura. O AC 20 mostrou um bom comportamento à deformação permanente mesmo para a percentagem em betume mais elevada, não tendo nenhum provete chegado à rotura durante o ensaio.

CONCLUSÕES

Atendendo aos resultados obtidos, a gama de valores de N_{design} apropriados à mistura AC20 situar-se-á entre 50 e 80 giros, os quais permitiriam obter percentagens em betume entre os 5,3% e os 4,7%. Embora não aparente ser significativa essa variação da percentagem em betume influencia fortemente as propriedades da mistura. Para os ensaios realizados os resultados obtidos indicam que a mistura AC 20 com 4,7% de betume tem uma resistência à deformação permanente cerca de duas vezes superior à mistura com 5,3% (WTS_{AIR} a 60°C de 0,16 e 0,29 mm/10³ciclos). Em termos de trabalhabilidade a mistura com 4,7% em betume tem um CEI 8 vezes superior indicando uma trabalhabilidade muito inferior à mistura com 5,7 % em betume (CEI de 19,1 e de 2,4 respetivamente). A escolha de um N_{design} adequado permite otimizar o comportamento das misturas betuminosas maximizando-se as propriedades consideradas mais importantes face às condições de serviço esperadas.

Para a mistura SMA um N_{design} de 50 giros permitiu obter uma mistura com propriedades semelhantes às que se obtiveram na metodologia tradicional com provetes Marshall compactados com 50 pancadas por face. No entanto, a avaliação das propriedades desta mistura requer a realização de mais ensaios. No futuro serão realizados mais ensaios de desempenho de modo a permitir aprofundar o conhecimento sobre a relação entre os parâmetros de formulação, as propriedades das misturas formuladas e o seu previsível desempenho face às condições de serviço esperadas.

REFERÊNCIAS

- Baptista, A., Picado-Santos, L., Capitão, S. (2011). Design of Hot Mix Recycled Asphalt Concrete Produced in Plant without Preheating the Reclaimed Material. *IJPE – International Journal of Pavement Engineering*, iFirst.
- Drüschner, L., Schäfer, V. (2000). Stone Mastic Asphalt, German Asphalt Association, Bonn
- Gardete, D., Picado-Santos, L., Capitão, S. Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas Tradicionais Portuguesas – Análise de Procedimentos Implementados Noutros Países. Actas do XV Congresso Ibero-LatinoAmericano del Asfalto, 22-27 de Novembro, Lisboa, 2009
- Prozzi, J., Aguiar, J. (2007) Método de Optimización del Número de Giros de Diseño Mediante Desempeno Relativo. *Revista Infraestructura Vial*, N.º 17 35-45