



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES
Núcleo de Infra-estruturas

Proc. 702/1/13805

MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO MÓDULO

Aplicação na Beneficiação da EN 14, entre Chantre e Trofa

Estudo realizado para a Estradas de Portugal, EPE

Lisboa • Abril de 2007

I&D TRANSPORTES

RELATÓRIO 185/2007 – NIT

**MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO MÓDULO
APLICAÇÃO NA BENEFICIAÇÃO DA EN 14 ENTRE CHANTRE E
TROFA**

**HIGH MODULUS ASPHALT CONCRETE
APPLICATION AT THE REHABILITATION OF THE NATIONAL ROAD
EN14, BETWEEN *CHANTRE* AND *TROFA***

**ENROBÉS A MODULE ELEVÉ
APPLICATION A LA REABILITATION DE LA ROUTE EN 14, ENTRE
CHANTRE ET *TROFA***

MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO MÓDULO APLICAÇÃO NA BENEFICIAÇÃO DA EN 14 ENTRE CHANTRE E TROFA

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
2	COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE ALTO MÓDULO	3
2.1	Considerações iniciais.....	3
2.2	Agregados e filer	3
2.3	Betume.....	5
2.4	Estudo de composição da mistura de alto módulo.....	5
2.5	Temperaturas de fabrico e aplicação da mistura de alto módulo	6
2.6	Execução de trechos experimentais.....	6
3	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS APLICADAS NOS TRECHOS EXPERIMENTAIS.....	10
3.1	Considerações iniciais.....	10
3.2	Determinação da percentagem de betume contida nas misturas	10
3.3	Resistência conservada e características Marshall das misturas	12
3.4	Preparação de provetes para a determinação das características de desempenho das misturas	13
3.5	Determinação do módulo de deformabilidade.....	15
3.5.1	Procedimento de ensaio.....	15
3.5.2	Resultados obtidos para frequências de 5 e 10Hz e para temperatura de 25°C.....	16
3.5.3	Curva mestra	18
3.6	Avaliação da resistência à fadiga.....	20

3.6.1	Procedimento de ensaio.....	20
3.6.2	Resultados obtidos.....	20
3.7	Avaliação da resistência à deformação permanente.....	23
3.7.1	Procedimento de ensaio.....	23
3.7.2	Resultados obtidos.....	24
4	MISTURA DE ALTO MÓDULO APLICADA NA OBRA DE REABILITAÇÃO DA EN 14	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
6	BIBLIOGRAFIA	30

MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO MÓDULO

APLICAÇÃO NA BENEFICIAÇÃO DA EN 14 ENTRE CHANTRE E TROFA

1 INTRODUÇÃO

A utilização de misturas betuminosas de alto módulo em camadas de regularização e de base de pavimentos flexíveis constitui uma alternativa interessante para pavimentos flexíveis destinados a tráfego pesado. Este tipo de solução torna-se particularmente vantajoso em obras de reabilitação de pavimentos existentes nas quais, por condicionalismos relacionados com as infra-estruturas adjacentes, existem limitações à espessura das camadas que constituem a estrutura dos pavimentos.

No âmbito do protocolo entre a EP¹ e o LNEC realizou-se um projecto de investigação visando o estudo de misturas betuminosas de alto módulo em obras de pavimentação. Pretendeu-se com este projecto contribuir para um melhor conhecimento relativo à formulação, à aplicação em obra e ao comportamento deste tipo materiais, aproveitando a realização, em 1998, de obras de beneficiação da EN 14, entre Chantre e Trofa.

O pavimento flexível deste troço de estrada encontrava-se então em avançado estado de ruína estrutural, preconizando-se, no projecto de beneficiação da obra [1], a fresagem das camadas betuminosas existentes até uma profundidade de 0,20 m, e a posterior colocação de uma camada de base em misturas de alto módulo, seguida de uma camada de desgaste utilizando misturas betuminosas convencionais, com 0,06 m de espessura. O ligante utilizado no fabrico das misturas de alto módulo foi um betume de penetração nominal 10/20.

¹ Protocolo JAE / LNEC, à data de inicio do projecto

Os trabalhos realizados pelo LNEC compreenderam, para além do acompanhamento da obra de reabilitação da EN 14, as seguintes acções principais:

- Caracterização dos materiais empregues no fabrico da mistura de alto módulo, e da mistura aplicada, em complemento aos ensaios realizados pelo Empreiteiro e pela Fiscalização;
- Acompanhamento da execução de trechos experimentais nos quais se ensaiaram diversas soluções, do ponto de vista dos materiais aplicados, da composição das misturas e das condições de fabrico e aplicação em obra;
- Realização de ensaios para caracterização do desempenho das misturas aplicadas nos trechos experimentais, designadamente no que se refere ao seu módulo de deformabilidade e à sua resistência à fadiga e às deformações permanentes;
- Interpretação dos resultados obtidos.

No âmbito do acompanhamento da obra, contou-se com a colaboração da Universidade de Coimbra, que efectuou a análise dos resultados dos ensaios realizados pelo LNEC para a caracterização dos materiais a empregar na mistura betuminosa, realizou alguns ensaios adicionais e analisou os resultados obtidos no âmbito do controlo da qualidade da obra. Desta colaboração resultaram 4 relatórios parciais.

Os resultados alcançados no decurso da obra foram transmitidos à JAE, à medida que foram obtidos. Neste Relatório Final descrevem-se sucintamente as acções desenvolvidas e apresentam-se as principais conclusões. Em Anexo, apresentam-se os relatórios elaborados pela Universidade de Coimbra.

2 COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE ALTO MÓDULO

2.1 Considerações iniciais

Para o estudo dos materiais a aplicar no fabrico da Mistura de Alto Módulo (MAM) foram caracterizados dois tipos de agregados graníticos, de origens diferentes, designadamente das pedreiras de Fornelo e de S. João da Ribeira. Foram igualmente caracterizados dois tipos de betume, ambos pertencentes à classe 10/20, fornecidos por diferentes produtores. Com base nos resultados obtidos na caracterização dos materiais, e tendo ainda em atenção considerações de ordem prática, designadamente a localização das pedreiras relativamente à obra, seleccionou-se um dos tipos de agregados e um dos tipos de betume para o fabrico da MAM.

Posteriormente, foi estudada a composição da mistura com base nos critérios estabelecidos no Caderno de Encargos da JAE de 1998 (CEJAE 98), e tendo ainda em atenção as metodologias adoptadas noutros países. Após transposição dos resultados do estudo para a central, foi estabelecida uma composição “de referência” para a MAM.

Os resultados obtidos nos ensaios referidos constam do primeiro relatório elaborado pela Universidade de Coimbra [2], que se apresenta no Anexo I, referindo-se em seguida as principais conclusões alcançadas.

2.2 Agregados e filer

Tendo em atenção as especificações do Caderno de Encargos da obra e do CEJAE 98, os ensaios realizados sobre as diversas fracções disponíveis dos agregados grossos das duas pedreiras em estudo foram os seguintes:

- Análise granulométrica;
- Ensaio de desgaste na máquina de *Los Angeles*;
- Determinação dos índices de lamelação e alongamento;
- Determinação das massas volúmicas e absorção de água;
- Avaliação da adesividade betume-inerte.

Através dos resultados apresentados no Anexo I verifica-se que, em geral, todas as fracções dos agregados grossos cumpriam as exigências indicadas no CEJAE 98 (Anexo I: Quadro 6), com excepção das exigências relativas ao índice de alongamento, para o qual se obtiveram valores superiores ao máximo recomendado, particularmente no que se refere aos materiais provenientes de Fornelo.

Relativamente aos materiais finos, fracção 0/6 e filer comercial, foram realizados ensaios para determinação das características especificadas no CEJAE 98, bem como algumas características adicionais, que são utilizadas noutros países para avaliar o poder rigidificante dos fileres. Os ensaios efectuados sobre os agregados finos e filer foram pois os seguintes:

- Determinação da massa volúmica das partículas;
- Ensaios de *Equivalente de Areia* e de *Azul de Metileno*;
- Determinação do *Índice de Vazios Rigden* (IVR);
- Determinação do *Poder Absorvente* (PA).

Observa-se, com base nos resultados apresentados no Anexo I (Quadro 7), que qualquer um dos tipos de materiais ensaiados cumpria o estabelecido no CEJAE98 relativamente à limpeza dos materiais finos, avaliada em termos de valores de Equivalente de Areia e de Azul de Metileno.

Verifica-se ainda que os valores do IVR e do PA se situam próximos dos respectivos valores limite especificados em França e que estas características pioram com a adição de cal hidráulica. Anota-se que este resultado está de acordo com as conclusões alcançadas num estudo realizado pelo LNEC sobre o comportamento de fileres graníticos em misturas betuminosas [3].

Para o estudo da composição da mistura de agregados utilizou-se a metodologia habitual, adoptando o fuso granulométrico proposto no CEJAE98, e tomando como curva de referência a linha média daquele fuso. Verificou-se que era possível construir uma curva adequada com qualquer dos dois conjuntos de materiais. Dado que a pedreira de Fornelo estava bastante mais próxima da obra, optou-se por utilizar os agregados provenientes desta.

Depois de feitas algumas misturas experimentais com vista à afinação da central, verificou-se que a composição pré-determinada era difícil de reproduzir em obra pelo facto de incluir apenas duas fracções grossas (Anexo I: Quadro 15 e Figura 6). Por essa razão, a mistura de agregados realmente adoptada para a realização dos trechos experimentais incluiu também a fracção 10/14, embora a curva granulométrica resultante da nova mistura de

agregados não fosse significativamente diferente da inicialmente proposta. As proporções das fracções disponíveis foram as seguintes:

- Fracção 14/20: 25%;
- Fracção 10/14: 8 %;
- Fracção 6/10: 16 %;
- Fracção 0/6: 49 %;
- Filer calcário: 2 %.

2.3 Betume

Foram estudados dois tipos de betumes, ambos pertencentes à classe de penetração 10/20, correspondentes a diferentes fornecedores: *PETROGAL* e *CEPSA*. Procedeu-se à sua caracterização de acordo com as propriedades consideradas na Especificação LNEC E 80-1997. Os resultados obtidos foram os indicados no Quadro 9 do Anexo I.

A análise dos resultados apresentados no Anexo I permite verificar que o betume duro 10/20 (*PETROGAL*) não cumpria as exigências da Especificação LNEC E 80-1997, nomeadamente no que se refere à temperatura de amolecimento, à viscosidade cinemática e à temperatura de amolecimento após ensaio de envelhecimento RTFOT, sendo mais mole que o exigido na Especificação. Pelas razões apontadas, seleccionou-se o betume da *CEPSA*.

2.4 Estudo de composição da mistura de alto módulo

A percentagem de betume a adoptar na Mistura de Alto Módulo foi estimada, numa fase preliminar, adoptando dois tipos procedimentos analíticos correntes, baseados na superfície específica, designadamente a metodologia adoptada em França (fórmula de Duriez) e a preconizada pelo Centre de Recherches Routières (CRR) da Bélgica. Para a mistura de agregados que se seleccionou, chegou-se a uma percentagem ponderal de betume em relação à massa de mistura da ordem de 5,3 %, para qualquer um dos métodos (ver Anexo I: ponto 5.2).

A composição da mistura betuminosa de alto módulo foi ainda estudada experimentalmente pelo método de Marshall, conforme estabelecido no CEJAE 98. Este estudo decorreu paralelamente no Laboratório da Universidade de Coimbra (LPAV do DEC) e no LNEC.

Embora se tenham utilizado metodologias distintas, designadamente no que se refere ao número de provetes ensaiados e aos métodos adoptados para a determinação da baridade das misturas compactadas e da baridade máxima teórica, concluiu-se, em ambos os estudos, que uma percentagem de betume da ordem de 5,2 % seria adequada. No Anexo I (ponto 5.3) apresentam-se todos os resultados obtidos e comparam-se esses valores com os especificados no CEJAE98 para a percentagem óptima determinada.

Como complemento do estudo Marshall, realizaram-se, no LNEC, ensaios em pista de laboratório (*wheel tracking*) para averiguar se, para uma percentagem de betume acima do valor “óptimo” (6 %), a mistura teria um mau comportamento à deformação permanente (Anexo I: ponto 5.4). Embora dois dos provetes ensaiados tenham revelado uma boa resistência à deformação permanente, de acordo com os critérios adoptados em Espanha, a variabilidade de resultados obtidos indicia que a mistura poderá ter um comportamento inadequado, caso a percentagem de betume seja excessiva.

2.5 Temperaturas de fabrico e aplicação da mistura de alto módulo

A selecção das temperaturas de fabrico e aplicação de misturas betuminosas é efectuada em função das características do ligante empregue, designadamente da viscosidade que este apresenta a diversas temperaturas. Esta selecção deve ser feita de modo a que a mistura tenha trabalhabilidade adequada durante as diversas fases do processo construtivo, sem no entanto alterar demasiado as propriedades do betume. Tendo em atenção a experiência obtida em diversos países com este tipo de misturas, que se resume no Anexo I, foram propostos os seguintes valores de temperaturas:

- Fabrico da mistura: 160 a 180 °C;
- Espalhamento: 145 a 165 °C;
- Início da compactação: $\geq 140^{\circ}\text{C}$.

2.6 Execução de trechos experimentais

Face aos resultados apresentados nos pontos anteriores, propôs-se a realização de seis trechos experimentais, nos quais se aplicaram seis composições para a Mistura de Alto Módulo, e se testaram dois níveis de compactação diferentes. No total, realizaram-se 12

sub-trechos com 50 m de extensão e com 3,5 m de largura cada, conforme se indica na Figura 1.

As diversas composições utilizadas corresponderam às seguintes situações: mistura de agregados indicada em 2.2 (trechos A-1, A-2 e A-3) e uma variante desta, na qual se utilizou 5 % de filer comercial e 46 % da fracção 0/6 (trechos B-4, B-5 e B-6). As percentagens de betume variaram 0,5 % em torno de um valor de referência de 5,3 %, correspondendo a percentagens de betume de 4,8 %, 5,3 % e 5,8 %. Em ambos os casos, o betume foi aditivado, tendo em vista melhorar a adesividade aos agregados graníticos.

A compactação foi efectuada com recurso a dois cilindros: um cilindro de pneus de 23000 kg e um cilindro de rolos de 10000 kg. Os dois níveis de compactação aplicados correspondem a diferentes números de passagens dos cilindros. No primeiro (N1) foram aplicadas 20 passagens do cilindro de pneus e 10 passagens do cilindro de rolos e no segundo (N2) foram aplicadas 16 passagens do cilindro de pneus e 6 passagens do cilindro estático.

Formulação A		Formulação B	
- 14 / 20 mm - 25 % - 10 / 14 mm - 8 % - 6 / 10 mm - 16 % - 0 / 6 mm - 49%		- 14 / 20 mm - 25 % - 10 / 14 mm - 8 % - 6 / 10 mm - 16 % - 0 / 6 mm - 46%	
TRECHO N.º A 1		TRECHO N.º A 3	
% BET - 4,8 %		% BET - 5,8 %	
A-1-1	A-2-1	A-3-1	A-3-2
Compact. N1	Compact. N1	Compact. N1	Compact. N2
Compact. N2	Compact. N2	Compact. N2	Compact. N2
Trem A	Trem A	Trem A	Trem A
TRECHO N.º A 2		TRECHO N.º B 4	
% BET - 5,3 %		% BET - 4,8 %	
A-2-1	A-2-2	B-4-1	B-4-2
Compact. N1	Compact. N2	Compact. N1	Compact. N2
Compact. N2	Compact. N1	Compact. N1	Compact. N2
Trem A	Trem A	Trem A	Trem A
TRECHO N.º B 5		TRECHO N.º B 6	
% BET - 5,3 %		% BET - 5,8 %	
B-5-1	B-5-2	B-6-1	B-6-2
Compact. N1	Compact. N2	Compact. N1	Compact. N2
Compact. N2	Compact. N1	Compact. N1	Compact. N2
Trem A	Trem A	Trem A	Trem A

N1 - 30 passagens (20 pneus + 10 estático)

N2 - 22 passagens (16 pneus + 6 estático)

Trem A - cilindro de pneus + cilindro estático

Figura 1 - Trechos experimentais

3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS APLICADAS NOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

3.1 Considerações iniciais

As misturas de alto módulo aplicadas nos 12 trechos experimentais referidos no ponto anterior foram objecto de diversos ensaios com vista à sua caracterização.

Estes ensaios compreenderam, numa primeira fase, para além da verificação da percentagem de betume contida em cada uma das seis misturas, a determinação de características “empíricas” relacionadas com o desempenho, tais como as características Marshall e a resistência conservada, determinada a partir das forças de rotura Marshall com imersão em água a 60°C durante 24h. Estes ensaios foram realizados com provetes moldados na obra, pelo método Marshall.

Numa segunda fase procedeu-se à caracterização das misturas aplicadas nos 12 trechos experimentais, através de ensaios para determinação de características de desempenho, designadamente módulo de deformabilidade, resistência à fadiga e resistência às deformações permanentes. Estes ensaios foram realizados sobre provetes produzidos a partir de lajes retiradas da obra por serragem.

Os resultados dos ensaios para determinação das características Marshall e de resistência conservada e os resultados dos ensaios para verificação da composição das misturas apresentam-se detalhadamente nos relatórios elaborados pela Universidade de Coimbra [4], [5], que constituem o Anexo II e o Anexo III a este Relatório, respectivamente.

3.2 Determinação da percentagem de betume contida nas misturas

Tendo em vista avaliar a existência de eventuais desvios da composição das misturas relativamente às composições alvo estabelecidas, foi considerado desejável determinar, no LNEC, as quantidades de betume utilizadas nas MAM aplicadas nos vários trechos realizados, em complemento aos ensaios realizados no âmbito do controlo de qualidade da obra. Utilizou-se para tal o método de “*centrifugação com correcção de cinzas*” (método A

da norma ASTM D 2172) e o “*método de incineração*”, que se descrevem sucintamente em seguida.

- Método de centrifugação

A metodologia seguida corresponde à proposta na Norma ASTM D 2172, incluindo o procedimento de determinação da quantidade de cinzas carbonatadas presentes no extracto betuminoso. O valor da percentagem de cinzas determinado é posteriormente utilizado para corrigir os resultados relativos à percentagem de betume na mistura.

As percentagens de betume foram determinadas por este método sobre séries de três provetes para cada um dos trechos. Os resultados obtidos são os apresentados nos Quadros 1 e 2 do Anexo III. Verifica-se que os valores obtidos foram geralmente um pouco inferiores aos respectivos valores-alvo. Os valores determinados para a percentagem de betume apresentam desvios de -0,03 a -0,20 % relativamente ao valor-alvo.

- Método de incineração

Para a determinação da percentagem de betume das misturas betuminosas pelo método de incineração foi utilizada uma mufla Gilson Modelo HM-378. À data da realização dos trabalhos não estava ainda estabelecida nenhuma norma de ensaio para a utilização deste tipo de equipamento. O procedimento adoptado consistiu em submeter a mistura a uma temperatura de 538°C até se chegar a massa constante, devido à incineração completa do ligante betuminoso. O valor da percentagem de betume foi corrigido para ter em consideração a perda de massa da própria mistura de agregados. Para determinar o factor de correcção, submeteu-se previamente uma amostra da mistura de agregados sem betume à temperatura de ensaio na mufla.

Os resultados obtidos para a percentagem de betume pelo método da incineração são os apresentados nos Quadros 3 e 4 do Anexo III. Os valores encontrados diferem um pouco dos valores-alvo, apresentando desvios entre +0,03 e -0,17 relativamente àqueles valores.

- Comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos utilizados

Observando os valores que constam do Quadro 5 (Anexo III), verifica-se que os desvios, relativamente aos valores-alvo, dos resultados obtidos pelo método da centrifugação são, em geral, um pouco superiores aos obtidos pelo método da incineração.

Na Figura 2 representam-se graficamente, para os vários trechos construídos, as percentagens de betume determinadas e os valores-alvo pré-estabelecidos.

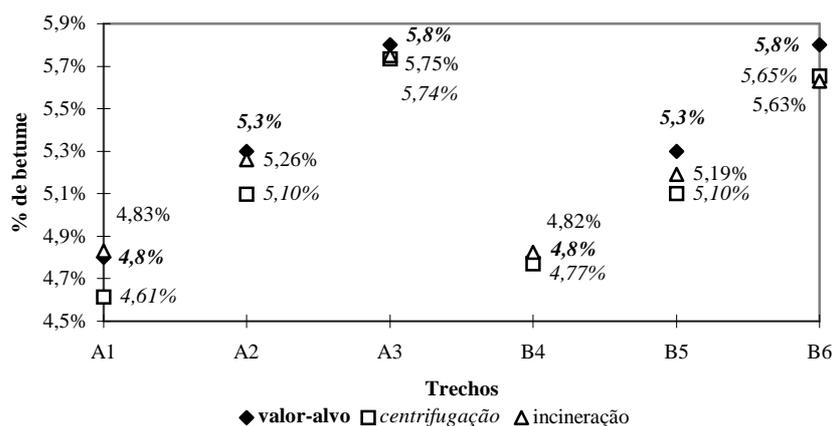


Figura 2 - Valores alvo e percentagem média de betume determinada pelos métodos de centrifugação e de incineração

Considerando que a percentagem de betume determinada por incineração apenas num caso (trecho B6) conduziu a uma diferença da ordem de 0,2 % relativamente ao valor-alvo, pode afirmar-se que os trechos experimentais foram construídos com misturas cuja quantidade de betume foi suficientemente próxima dos valores-alvo pretendidos e, por isso, adequada à avaliação do desempenho de misturas com diferentes composições.

3.3 Resistência conservada e características Marshall das misturas

Os ensaios para determinação das características Marshall e da resistência conservada das MAM aplicadas nos trechos experimentais foram efectuados sobre provetes cilíndricos moldados na obra com um compactador Marshall.

Os valores da baridade obtidos para os 36 provetes submetidos a ensaio apresentam alguma variabilidade em torno do valor médio, como se pode observar nos Quadros 1 e 2 do Anexo II. Esse facto pode indiciar falta de uniformidade no procedimento de fabrico dos provetes na obra. Em termos gerais, os provetes das misturas A e B apresentaram baridades médias da ordem de 2390 e 2350 kg/m³, respectivamente, o que significa que os provetes da mistura A são, em média, um pouco mais compactos que os da mistura B. Verifica-se que os valores obtidos para as baridades da mistura B são sistematicamente inferiores aos obtidos para a mesma mistura no estudo Marshall previamente realizado em laboratório (da ordem de 97 %).

Os resultados relativos à estabilidade Marshall, que se apresentam nos Quadros 5 e 6 do Anexo II, demonstram que, para ambos os grupos de misturas (A e B), a estabilidade Marshall diminui com o aumento da percentagem de betume. Tomando como referência o valor mínimo de estabilidade Marshall proposto no CEJAE98 para MAM (16000 N), observa-se que as misturas pertencentes ao grupo B apresentaram valores de estabilidade inferiores ao mínimo.

Assim, no caso da mistura B, parece existir diferença significativa entre os provetes produzidos na obra com aquela mistura e os previamente fabricados em laboratório, para efeitos de composição da mistura, quer em termos de baridade, quer em termos de estabilidade Marshall. Face aos resultados obtidos, e tendo em atenção que os valores da percentagem de betume empregue nas misturas foram confirmados, afigura-se plausível a hipótese de que, quando da execução dos trechos experimentais, as condições de produção dos provetes em obra não terão sido convenientemente controladas (por exemplo, em termos de temperatura de compactação ou de número de pancadas).

A determinação da resistência conservada das misturas aplicadas nos trechos experimentais foi efectuada utilizando um procedimento variante ao estabelecido na norma ASTM D 1075, segundo o qual a resistência conservada é determinada a partir da relação entre a estabilidade Marshall após 24 horas de imersão em água a 60°C e a estabilidade Marshall determinada em condições normais (imersão em água a 60°C durante 40 minutos). Os valores de resistência conservada a que se chegou para qualquer uma das misturas ensaiadas situaram-se acima dos 85%, sendo pois superiores ao valor mínimo de 70% preconizado no CEJAE 98.

3.4 Preparação de provetes para a determinação das características de desempenho das misturas

A determinação das características de desempenho (módulo de deformabilidade, resistência à fadiga e resistência às deformações permanentes) foi efectuada a partir de ensaios realizados sobre provetes extraídos de cada um dos trechos experimentais executados.

As vigas submetidas a ensaios de flexão para determinação do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga (com dimensões aproximadas de 600x1000x900 mm³), foram obtidas por serragem em laboratório de blocos extraídos do pavimento e fornecidos ao LNEC pela empresa Monte e Monte. Os provetes para ensaio de simulação em pista de

laboratório (*wheel tracking*), com 300x300x50 mm³, foram igualmente obtidos a partir de blocos fornecidos pela empresa Monte e Monte, por serragem em laboratório.

De cada diferente zona do trecho experimental obtiveram-se 12 vigotas e 4 lajetas.

No Quadro 1 e na Figura 3, apresentam-se os valores médios das baridades das vigas submetidas a ensaio de flexão e das lajetas submetidas a ensaio de simulação em pista de laboratório.

Quadro 1 - Baridades dos provetes submetidos a ensaios de flexão e a ensaios de simulação em pista de laboratório

Identificação	n	Baridade Média	Desvio Padrão
		(Mg/m ³)	σ
A-1-1	6	2,393	0,013
A-1-2	5	2,372	0,009
A-2-1	8	2,413	0,005
A-2-2	5	2,408	0,006
A-3-1	7	2,407	0,003
A-3-2	8	2,394	0,010
B-4-1	11	2,386	0,011
B-4-2	8	2,390	0,012
B-5-1	9	2,418	0,003
B-5-2	8	2,412	0,005
B-6-1	7	2,391	0,005
B-6-2	6	2,387	0,006

n - número de provetes ensaiados

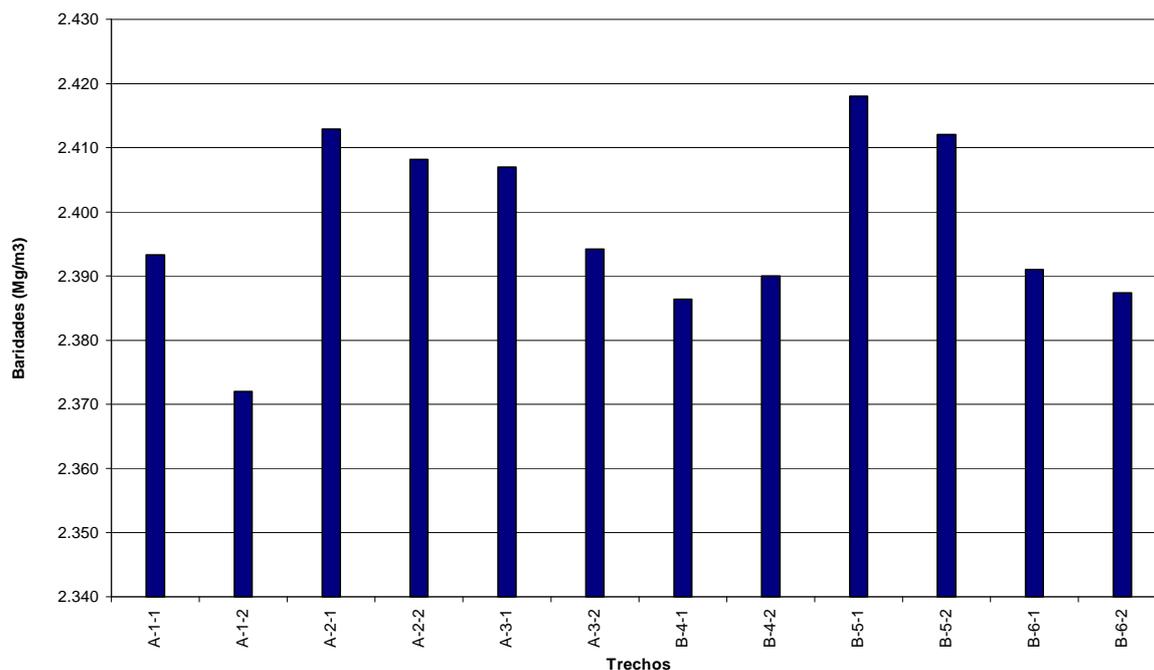


Figura 3 - Baridades das vigas e lajetas ensaiadas

Conforme se esperava, as baridades dos provetes extraídos dos trechos submetidos a compactação de nível N2, são geralmente inferiores às dos extraídos dos trechos submetidos a compactação de nível N1.

3.5 Determinação do módulo de deformabilidade

3.5.1 Procedimento de ensaio

O ensaio para determinação do módulo de deformabilidade, e posteriormente para determinação do comportamento à fadiga, das misturas betuminosas em estudo, baseou-se na norma de ensaio AASHTO TP8-94.

Sumariamente, este é um ensaio de cargas repetidas em flexão, efectuado sobre uma viga simplesmente apoiada, com aplicação da carga em dois pontos, situados em pontos equidistantes do centro da viga (*ensaio de flexão com 4 pontos*). Na Figura 4 ilustra-se o equipamento de ensaio utilizado.

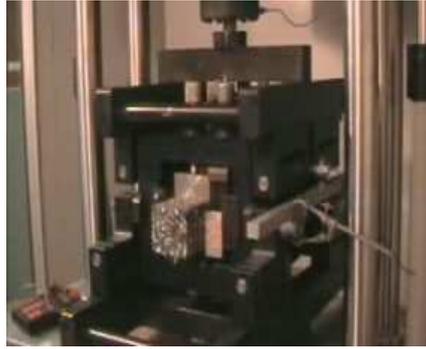


Figura 4 - Ensaio de flexão com cargas repetidas

No que se refere à determinação do módulo de deformabilidade, para o caso em estudo, foram aplicados dois níveis de carregamento, correspondentes à imposição de deslocamentos máximos em cada ciclo de 0,02 mm e de 0,04 mm, durante 100 ou 200 ciclos de carga, com quatro frequências, de: 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz e 10 Hz.

Durante a realização dos ensaios, foram registados os valores da deformação e da força aplicada. Procedeu-se ainda à leitura e registo da temperatura observada no interior da viga. O ensaio de flexão foi efectuado a três diferentes temperaturas, designadamente 15 °C, 25 °C e 35 °C.

3.5.2 Resultados obtidos para frequências de 5 e 10Hz e para temperatura de 25°C

No Quadro 2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios à flexão para determinação do módulo de deformabilidade, para as frequências de ensaio de 5 Hz e 10 Hz, e para uma temperatura de 25 °C.

Quadro 2 - Módulos de deformabilidade obtidos em ensaios de flexão

Módulo de Deformabilidade (MPa), para:									
Identificação		f = 5 Hz				f = 10 Hz			
		d = 0,02 mm		d = 0,04 mm		d = 0,02 mm		d = 0,04 mm	
A-1-1(3)	viga 2	11900	25	10200	25	13100	25	11300	25
	viga 3	13400	24	11500	24	14200	24	13300	24
A-1-1(4)	viga 1	14900	24	12600	24	17000	24	14100	24
A-1-2(3)	viga 2	16400	25	13000	25	18700	25	15000	25
	viga 3	15700	24	13300	24	17200	24	14800	24
A-2-1(3)	viga 1	9800	24	8850	24	11050	24	10450	24
	viga 2	11500	25	9750	25	13800	25	11450	25
A-2-2(4)	viga 1	10300	25	9200	25	11200	25	10000	25
	viga 2	12800	25	9150	25	13000	25	10300	25
	viga 3	9900	24	9075	24	11400	24	9800	24
A-3-1(3)	viga 1	10100	24	7950	24	11400	24	9350	24
	viga 2	10400	24	8350	24	11800	24	9900	24
	viga 3	9500	25	8100	25	10800	25	9350	25
A-3-2(3)	viga 1	12200	24	9975	24	14000	24	11200	24
	viga 2	12500	24	9650	24	14200	24	10700	24
B-4-1(4)	viga 2	13400	24	10200	24	15000	24	11800	24
B-4-2(4)	viga 2	14000	24	12200	24	15500	24	13700	24
	viga 3	12600	25	9400	25	12500	25	8800	25
B-5-1(4)	viga 1	12700	25	9000	25	14300	25	10000	25
	viga 2	11700	24	9700	24	13400	24	11400	24
	viga 3	11100	25	9150	25	12700	25	10300	25
B-5-2(3)	viga 2	10500	25	9200	25	11900	25	10700	25
B-5-2(4)	viga 1	9850	24	9150	24	11700	24	10750	24
	viga 2	9250	26	7900	26	10900	26	9200	26
B-6-1(3)	viga 1	8350	24	6475	24	9800	24	7200	24
	viga 2	9300	24	6325	24	10500	24	7200	24
	viga 3	8200	25	6400	25	9500	25	7175	25
B-6-2(3)	viga 1	9900	26	7200	26	12400	26	8400	26

f - frequência d - deformação imposta

Da análise dos valores dos módulos de deformabilidade obtidos para as seis misturas betuminosas em estudo, e para os dois níveis de compactação aplicados, podem tecer-se as seguintes considerações:

- Como é de esperar, os módulos de deformabilidade das MAM aumentam quando aumenta a frequência de ensaio.
- Para a mesma frequência de ensaio, os módulos de deformabilidade obtidos nos ensaios realizados com maiores deformações impostas (0,04 mm) são geralmente inferiores aos obtidos para menores deformações (0,02 mm).
- Para a frequência de 10 Hz e para a deformação imposta de 0,04 mm, os módulos de deformabilidade das misturas do grupo A variam entre 9 300 MPa e 18 700 MPa e os módulos de deformabilidade das misturas do grupo B variam entre 7 200 e 15 500 MPa. Constata-se, pois, que as misturas do grupo B apresentam tendência para ter módulos de deformabilidade ligeiramente inferiores às do grupo A.

- d) Não é possível, com base nos resultados obtidos, retirar conclusões acerca da eventual influência dos dois tipos de compactação nos módulos de deformabilidade das misturas.
- e) Quer para as misturas do grupo A, quer para as misturas do grupo B, constata-se que os módulos de deformabilidade maiores correspondem a percentagens de betume menores e vice-versa. Para as misturas com percentagem de betume igual ao valor de referência (5,3%) obtêm-se módulos da ordem de 10 000 MPa ou superiores. Anota-se que os valores indicados no manual de dimensionamento de pavimentos francês [6] para o módulo das misturas de alto módulo a 10 Hz são de 11 000 MPa para 20°C e de 6 000 MPa para 30°C. Assim, para uma temperatura de 25°C será de esperar um módulo da ordem de 9 000 MPa, pelo que os valores obtidos se consideram adequados.

3.5.3 Curva mestra

A variação do módulo de deformabilidade em função da temperatura e da frequência do carregamento ou do tempo de carga, pode ser representada graficamente através de curvas isotérmicas. É usual utilizar uma “curva mestra”, a partir dos resultados obtidos a diferentes temperaturas e frequências de carregamento utilizando um factor de escala, $\log(\alpha T)$, conforme se exemplifica na Figura 5 [7].

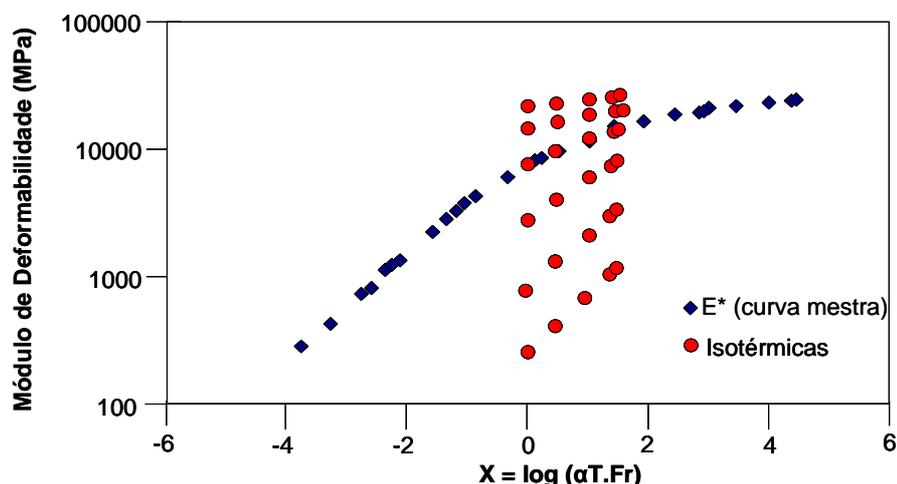


Figura 5 – Variação do módulo de deformabilidade (E^*) das misturas betuminosas com a temperatura (T) e a frequência do carregamento (Fr) (curva mestra)

A partir de resultados provenientes de ensaios realizados a diferentes temperaturas (15°C, 25°C e 35°C) e frequências (1 Hz, 3 Hz, 5Hz e 10 Hz), obtiveram-se as curvas mestras para as diferentes MAM ensaiadas. As curvas mestras correspondentes ao deslocamento imposto de 0,04 mm apresentam-se na Figura 6. A partir destas mesmas curvas é possível obter módulos para diferentes valores de temperatura ou de frequência, sem ter de recorrer a ensaios adicionais.

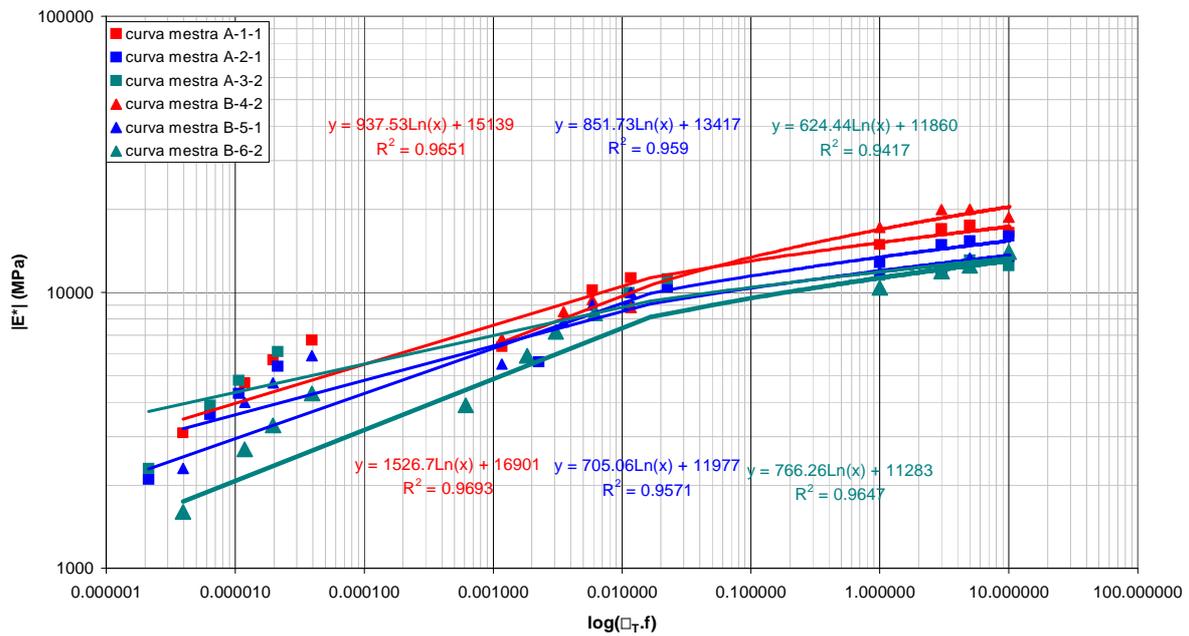


Figura 6 - Curvas mestras obtidas nos ensaios com deslocamento imposto de 0,04 mm

3.6 Avaliação da resistência à fadiga

3.6.1 Procedimento de ensaio

Os ensaios para avaliação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas, realizaram-se de acordo com a norma de ensaio AASHTO TP8-94, após a realização dos ensaios para determinação do módulo de deformabilidade.

Os ensaios foram realizados com a aplicação de deslocamentos impostos de: 0,035 mm, 0,07 mm, 0,10 mm e 0,12 mm, com uma frequência de 10 Hz e a uma temperatura de 25°C.

Durante a realização do ensaio para avaliação do comportamento à fadiga, foram registados os valores da deformação imposta e da força aplicada. Dado que os ensaios foram efectuados com deformação imposta, considerou-se, como é habitual, que o provete em ensaio atinge a rotura quando o módulo de deformabilidade é cerca de 50% do módulo inicial, tendo-se considerado como valor inicial do módulo o obtido após a aplicação de 100 ciclos de carregamento.

3.6.2 Resultados obtidos

A realização dos ensaios de fadiga sobre as misturas de alto módulo revestiu-se de algumas dificuldades, possivelmente relacionadas com os elevados módulos de deformabilidade das misturas. Assim, não foi possível obter resultados para todos os tipos de misturas em estudo.

Nas Figuras 7 e 8, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio à flexão para determinação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas em estudo, respectivamente para as misturas dos grupos A e B. Nessas Figuras indica-se ainda a recta correspondente à lei de fadiga da Shell [8], dada pela expressão:

$$\varepsilon = (0,856V_b + 1,08)E^{-0,36}N^{-0,2}$$

tomando uma percentagem volumétrica de betume $V_b = 12\%$ (de acordo com os resultados dos ensaios para determinação da composição da mistura de referência) e um módulo de deformabilidade $E = 1 \times 10^{10}$ Pa.

No Quadro 3 apresentam-se os valores das extensões de tracção correspondentes a 1 milhão de ciclos, obtidos por extrapolação dos resultados experimentais, uma vez que não foi possível efectuar ensaios com a aplicação de extensões dessa ordem de grandeza.

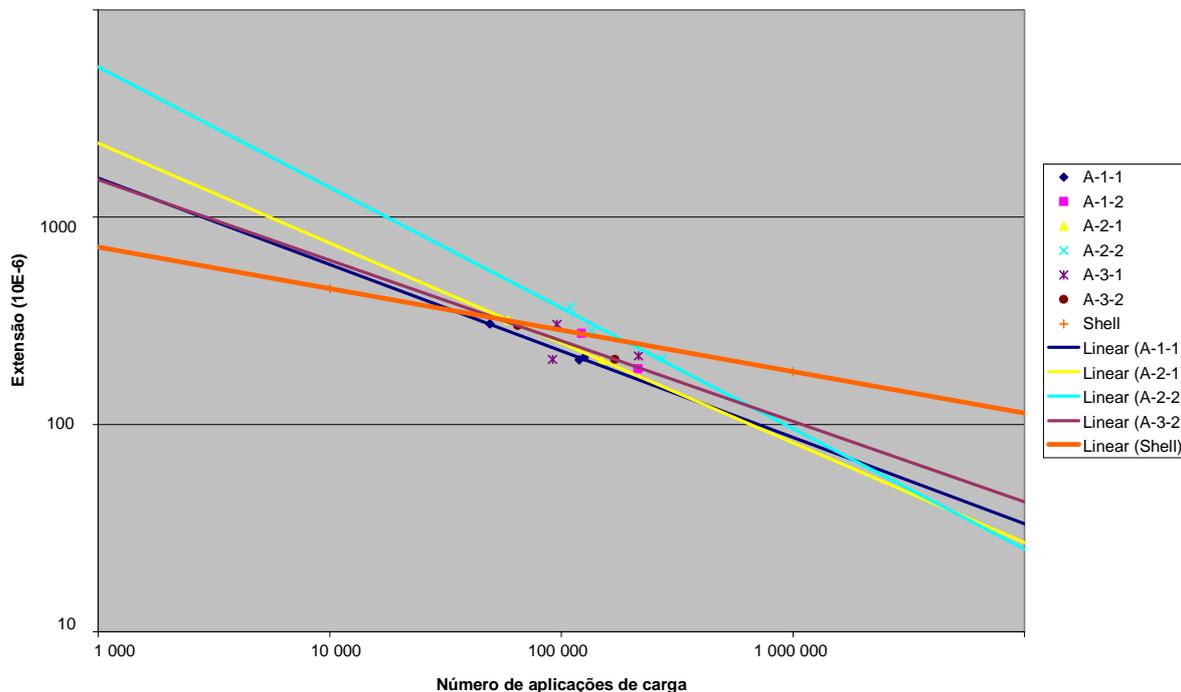


Figura 7 - Resultados dos ensaios de fadiga realizados sobre as amostras de MAM do grupo A

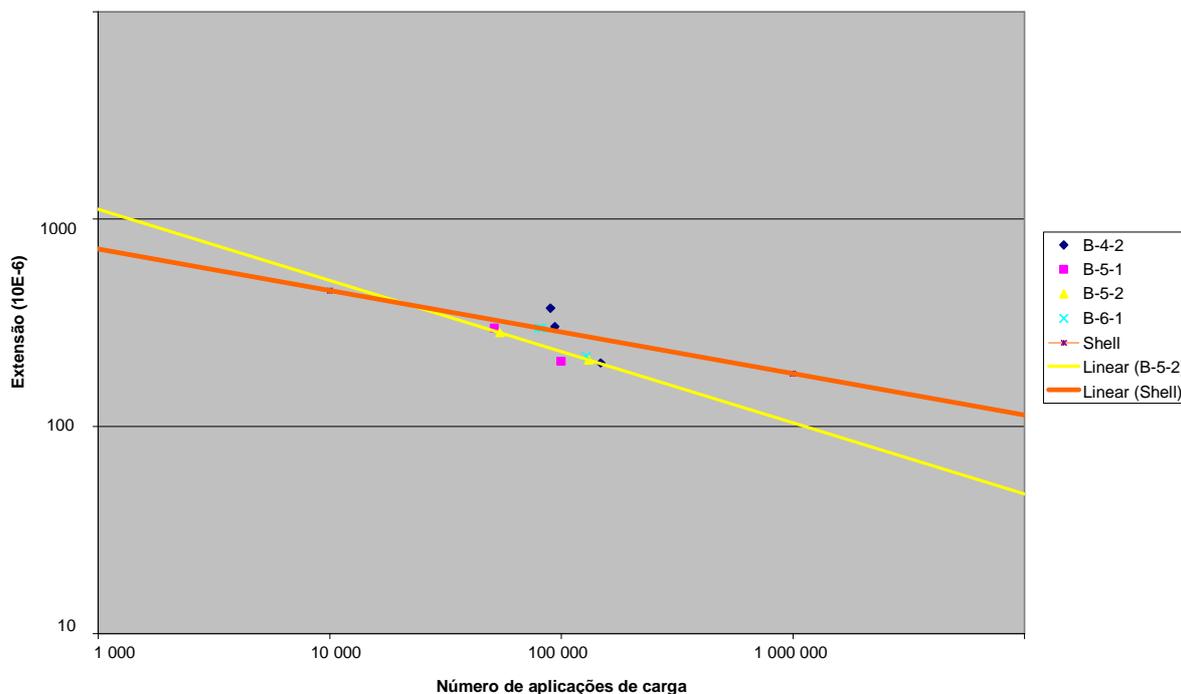


Figura 8 - Resultados dos ensaios de fadiga realizados sobre as amostras de MAM do grupo B

Quadro 3 - Extensões correspondentes a 1×10^6 ciclos obtidas nos ensaios de fadiga

Ensaio de fadiga realizados a 10 Hz, à temperatura de 25°C	
Identificação	Extensão correspondente a 1×10^6 ciclos (ϵ_6 , $\mu\text{m/m}$)
A-1-1	87,7
A-2-1	78,9
A-2-2	95,6
A-3-2	103,8
B-5-2	104,1

A comparação entre as rectas de fadiga obtidas nos ensaios e a recta correspondente à lei de fadiga da Shell permite constatar que as rectas obtidas experimentalmente possuem inclinação maior que a que corresponde àquela lei de fadiga. No entanto, salienta-se que as leis de fadiga adoptadas para efeitos de dimensionamento têm em conta os efeitos dos tempos de repouso e da dispersão lateral do tráfego, pelo que não se podem comparar directamente com os resultados dos ensaios em laboratório.

Embora se disponha de um conjunto limitado de resultados, pode-se verificar uma tendência para a melhoria do comportamento à fadiga com o aumento do teor em betume, tendo em atenção os resultados obtidos para as misturas do grupo A. Para as misturas do grupo B apenas foi possível obter uma recta de fadiga, que corresponde à mistura com percentagem de betume igual ao valor de referência. Esta mistura revelou um comportamento à fadiga melhor do que as misturas pertencentes ao grupo A que possuem a mesma percentagem de betume.

3.7 Avaliação da resistência à deformação permanente

3.7.1 Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio adoptado para avaliar a resistência à deformação permanente das misturas de alto módulo foi o ensaio de simulação em pista (*wheel tracking*) preconizado da norma de ensaio Espanhola NLT-173/84 - *Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio*.

Este ensaio é realizado sobre provetes prismáticos com 300x300x50 mm³. Neste estudo, conforme já referido, os provetes foram obtidos por serragem em laboratório de lajetas recolhidas no pavimento.

O ensaio inicia-se após o condicionamento da câmara e do provete, durante 4 horas a 60°C.

Procede-se à aplicação do carregamento através de um movimento de vaivém de uma roda (Figura 9), sendo a velocidade constante na zona central do provete, e à medição do valor do cavado de rodeira após 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 90, 105, e 120 minutos.



Figura 9 - Ensaio de simulação em pista

Os resultados obtidos são geralmente expressos através da velocidade média de deformação verificada entre os 105 e os 120 ($v_{105/120}$) minutos para um conjunto de 3 provetes.

Os valores limites propostos pela D.G. Carreteras (Espanha), para análise dos resultados do ensaio de simulação de tráfego, dependem da intensidade do tráfego e da zona climática. Para as condições mais desfavoráveis, correspondentes a classes de tráfego T0 ou T1 e zona climática quente, o valor limite considerado para $v_{105/120}$ é de 15×10^{-3} mm/min.

3.7.2 Resultados obtidos

Na Figura 10 apresenta-se o andamento das deformações medidas nos ensaios de simulação em pista de laboratório realizados sobre cada um dos provetes ensaiados. No Quadro 4, apresentam-se os resultados obtidos em termos de velocidade de deformação entre os 105 e os 120 minutos ($V_{105/120}$) obtida para cada provete e os respectivos valores médios por conjunto de provetes correspondente a cada trecho experimental.

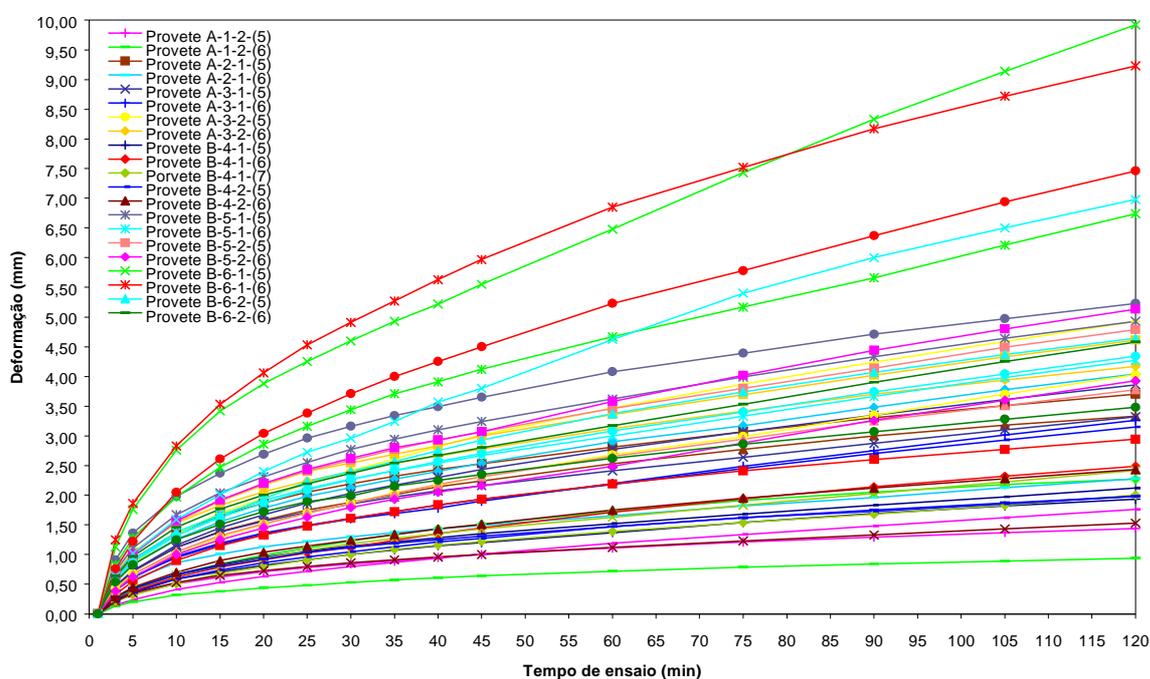


Figura 10 - Resultados dos ensaios de simulação em pista de laboratório

Quadro 4 - Velocidades de deformação obtidas nos ensaios de simulação em pista de laboratório

Identificação das Amostras			Resultados Obtidos	Valores Médios
			$v_{105/120}$ ($\times 10^{-3}$ mm/min)	
Mistura betuminosa A	A-1-2(5)	lajeta 1	5	6
	A-1-2(5)	lajeta 2	9	
	A-1-2(6)	lajeta 1	3	
	A-1-2(6)	lajeta 2	6	
	A-2-1-(5)	lajeta 1	13	13
	A-2-1-(5)	lajeta 2	10	
	A-2-1-(6)	lajeta 1	10	
	A-2-1-(6)	lajeta 2	17	
	A-3-1-(5)	lajeta 1	15	16
	A-3-1-(5)	lajeta 2	17	
	A-3-1-(6)	lajeta 1	17	
	A-3-1-(6)	lajeta 2	15	
	A-3-2-(5)	lajeta 1	22	20
	A-3-2-(5)	lajeta 2	23	
	A-3-2-(6)	lajeta 1	15	
	A-3-2-(6)	lajeta 2	19	
Mistura betuminosa B	B-4-1-(5)	lajeta 1	7	10
	B-4-1-(5)	lajeta 2	10	
	B-4-1(6)	lajeta 1	11	
	B-4-1(6)	lajeta 2	11	
	B-4-1(7)	lajeta 1	11	
	B-4-1(7)	lajeta 2	11	
	B-4-2-(5)	lajeta 1	9	8
	B-4-2-(5)	lajeta 2	7	
	B-4-2-(6)	lajeta 1	10	
	B-4-2-(6)	lajeta 2	7	
	B-5-1-(5)	lajeta 1	19	19
	B-5-1-(5)	lajeta 2	17	
	B-5-1(6)	lajeta 1	19	
	B-5-1(6)	lajeta 2	20	
	B-5-2-(5)	lajeta 1	20	21
	B-5-2-(5)	lajeta 2	18	
	B-5-2-(6)	lajeta 1	22	
	B-5-2-(6)	lajeta 2	22	
	B-6-1-(5)	lajeta 1	52	39
	B-6-1-(5)	lajeta 2	35	
	B-6-1-(6)	lajeta 1	34	
	B-6-1-(6)	lajeta 2	35	
	B-6-2-(5)	lajeta 1	18	21
	B-6-2-(5)	lajeta 2	32	
B-6-2-(6)	lajeta 1	22		
B-6-2-(6)	lajeta 2	13		

Na Figura 11 comparam-se os resultados das velocidades de deformação obtidas para cada uma das composições estudadas. Estes resultados permitem concluir que, para um mesmo teor em betume, a mistura B tem geralmente um pior comportamento à deformação permanente que a mistura A.

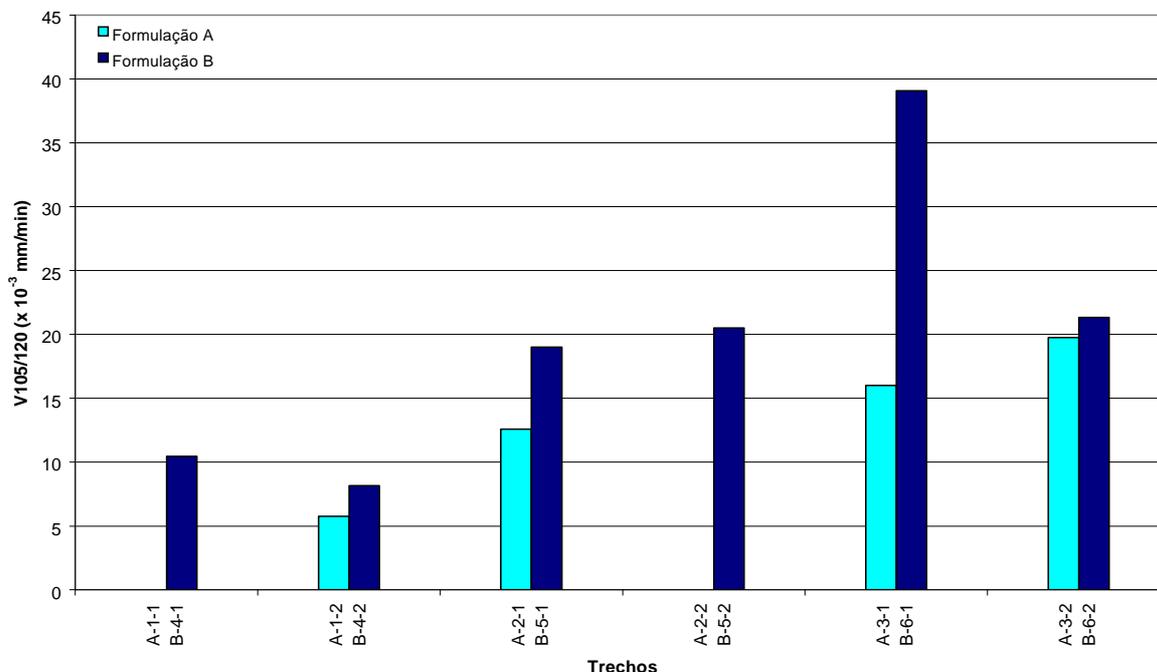


Figura 11 - Valores médios das velocidades de deformação para cada um dos trechos

Os resultados obtidos para o ensaio de simulação em pista de laboratório, permitem tecer as seguintes considerações:

- a) Os valores médios de velocidade de deformação obtidos para as misturas betuminosas do grupo A, variam entre 6 e 20 x 10⁻³ mm/min; os valores médios da velocidade de deformação obtidos para as misturas betuminosas do grupo B, variam entre 8 e 39 x 10⁻³ mm/min. Em geral, observa-se uma tendência para uma melhor resistência à deformação permanente nas misturas do grupo A.
- b) Para ambos os tipos de misturas, observa-se que a velocidade de deformação aumenta com o aumento da percentagem de betume. Pode ainda constatar-se que, para uma mesma composição, esta velocidade é superior nos provetes com menor baridade (ver Quadro 1).
- c) As misturas com percentagem de betume superior ao valor de referência não cumprem o valor limite da velocidade de deformação adoptado em Espanha.

4 MISTURA DE ALTO MÓDULO APLICADA NA OBRA DE REABILITAÇÃO DA EN 14

Na sequência dos resultados obtidos nos estudos de composição da mistura betuminosas de alto módulo e nos trechos experimentais, que se apresentaram nos Capítulos anteriores, e da transposição dos resultados do estudo para a central, optou-se por aplicar, na obra de reabilitação da EN 14, uma mistura de alto módulo com a seguinte composição:

Mistura de agregados:

- Agregado granítico proveniente da pedreira de Fornelo:
 - Fracção 14/20 mm: 25%
 - Fracção 10/14 mm: 8%
 - Fracção 6/10 mm: 16%
 - “Pó” 0/6 mm: 48%
- Filer comercial calcário: 3%

Ligante betuminoso:

- Betume 10/20 da CEPESA, aditivado com 2‰ de POLYRAM 200: 5,3%, relativamente à massa total da mistura betuminosa.

O controlo da qualidade da MAM aplicada na obra foi efectuado tomando como base as exigências que constam do CEJAE 98. A execução da obra foi acompanhada pelo LNEC e pela Universidade de Coimbra, tendo esta entidade efectuado um relatório que resume e analisa os resultados obtidos. Este relatório [9] apresenta-se em Anexo (Anexo IV).

De uma forma geral, pode concluir-se que os resultados obtidos no decurso da obra são aceitáveis, face às especificações do CEJAE 98. No entanto, obtiveram-se alguns desvios relativamente às tolerâncias de fabrico da mistura, desvios esses que ocorreram predominantemente na fase inicial da obra, o que se explica pelo processo de afinação da central e do processo construtivo estar ainda em curso.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório apresentam-se os resultados obtidos no decurso do acompanhamento da obra de reabilitação da EN 14 entre Chantre e Trofa, na qual foi aplicada uma mistura betuminosa de alto módulo, após fresagem do pavimento existente.

Foram estudados materiais provenientes de duas pedreiras da região e betumes de penetração 10/20 produzidos por duas empresas distintas, tendo-se seleccionado os materiais para a mistura a aplicar na obra, e estudado a composição da mistura pelos métodos empíricos tradicionalmente usados.

Uma vez escolhida a composição de referência da mistura, foram realizados 12 trechos experimentais nos quais se efectuaram algumas variantes a esta composição, e se aplicaram duas metodologias distintas de compactação. As variantes adoptadas para a composição da mistura correspondem a percentagens de betume acima e abaixo do valor de referência, e à utilização de uma quantidade adicional de filer calcário, relativamente à mistura de referência, em substituição de igual quantidade da fracção 0/6 mm do agregado granítico.

Foram extraídos blocos de mistura de alto módulo aplicada em cada um dos trechos a partir dos quais se prepararam, por serragem em laboratório, provetes prismáticos para a realização de ensaios para determinação de características de desempenho, nomeadamente módulo de deformabilidade, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente.

Os resultados dos ensaios realizados permitem concluir que, para as misturas com percentagem de betume igual ao valor de referência, se obtêm módulos de deformabilidade a 25°C da ordem de 10 000 MPa ou superiores. Estes valores consideram-se adequados, tendo em atenção os valores indicados no manual de dimensionamento de pavimentos francês para módulos de misturas de alto módulo. Em regra, observa-se uma diminuição dos módulos de deformabilidade com o aumento das percentagens de betume na mistura. Constata-se também que, para a mesma percentagem de betume e para as mesmas condições de ensaio, as misturas com maior percentagem de filer calcário têm tendência a possuir módulos de deformabilidade um pouco inferiores às misturas com maior quantidade de material fino de origem granítica.

Os resultados dos ensaios de fadiga permitem constatar que, à medida que aumenta a percentagem de betume na mistura, melhora o comportamento à fadiga. Para a percentagem de betume de referência, obteve-se um melhor comportamento à fadiga para a mistura com maior percentagem de filler calcário.

Relativamente à resistência à deformação permanente, verificou-se que esta resistência em geral diminui com o aumento da percentagem de betume, observando-se que as misturas com percentagem de betume superior ao valor de referência não cumpriam o limite máximo especificado em Espanha para a velocidade de deformação. Pode ainda constatar-se que, para uma mesma composição, a resistência à deformação permanente é menor nas misturas com maior porosidade.

COLABORAÇÕES

Para a realização dos trabalhos a que se refere este relatório, o LNEC contou com a colaboração do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. A equipa do LNEC responsável pela coordenação e acompanhamento dos trabalhos realizados foi constituída pelos Eng^{os} Luís Quaresma e Teresa Alves, que participaram também na elaboração do relatório.

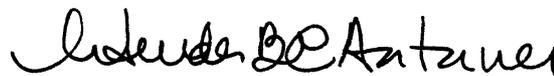
Lisboa, LNEC, Abril de 2007

VISTOS

AUTORIAS



António Lemonde de Macedo
Investigador Coordenador
Director do Departamento de Transportes



Maria de Lurdes Antunes
Investigadora Principal com Habilitação
Chefe de Núcleo de Infra-estruturas

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] **JAE / DSREN**– *Beneficiação da EN 14 entre o Nó de Chantre (km 4,585) e o Limite de Distrito de Braga (km 20,028), da EN 104 entre Azurara (km 0,0) e Trofa (km 16,334) e da EN 105 entre Travagem (km 5,718) e Santo Tirso (km 22,500). Memória Descritiva e Justificativa*, Porto, 1995.
- [2] **Capitão S., Picado-Santos, L.** - *Empreitada de Beneficiação das EENN 14, 104 e 105: Formulação da Mistura Betuminosa de Alto Módulo*”, 1º Relatório Interno, Laboratório de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes, Coimbra, 1999.
- [3] **LNEC** – *Filer Granítico em Misturas Betuminosas*. LNEC, Relº Procº 092/01/12647, Janeiro de 2002.
- [4] **Capitão S., Picado-Santos, L.** - *Empreitada de Beneficiação das EENN 14, 104 e 105: Características Marshall e Resistência Conservada da Mistura Betuminosa de Alto Módulo*, 2º Relatório Interno, Laboratório de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes, Coimbra, 1999.
- [5] **Capitão S., Picado-Santos, L.** - *Empreitada de Beneficiação das EENN 14, 104 e 105: Determinação das Percentagens de Betume Usadas nas Misturas Betuminosas de Alto Módulo Aplicadas nos Trechos Experimentais*, 3º Relatório Interno, Laboratório de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes, Coimbra, 1999.
- [6] **LCPC / SETRA** – *French Design Manual for Pavement Structures*, Paris, 1997.
- [7] **Antunes, M.L., et al** – *Development of New Bituminous Pavement Design Method*, COST 333, Final Report of the Action, Luxembourg, 1999
- [8] **SHELL** – *Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and Overlays for Roads Traffic* - London
- [9] **Capitão S., Picado-Santos, L.** - *Empreitada de Beneficiação das EENN 14, 104 e 105: Apreciação dos Resultados do Controlo de Qualidade da Mistura*

Betuminosa de Alto Módulo, 4^o Relatório Interno, Laboratório de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes, Coimbra, 2000.

Anexos



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**LABORATÓRIO DE URBANISMO, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO
E TRANSPORTES**

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105

- Formulação da Mistura Betuminosa de Alto Módulo -

1º RELATÓRIO INTERNO

SILVINO DIAS CAPITÃO

LUÍS PICADO-SANTOS

COIMBRA, Abril de 1999

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105

1º RELATÓRIO INTERNO

- FORMULAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA DE ALTO MÓDULO -

Sumário

Este relatório apresenta, de uma forma sintética, os principais estudos realizados no âmbito da formulação de uma mistura betuminosa de alto módulo a aplicar na Estrada Nacional nº 14, entre o Nó de Chantre (Km 4,585) e o Limite do Distrito de Braga (Km 20,028). Numa primeira fase, caracterizaram-se os materiais granulares e os ligantes disponíveis de modo a seleccionar aqueles que vão ser usados na construção da camada de base de alto módulo. Além disso, estudaram-se várias composições de agregados que cumprissem bandas granulométricas de referência, quer as indicadas no Caderno de Encargos da Obra, quer em outros documentos. Numa segunda fase, procedeu-se à formulação laboratorial de uma mistura betuminosa, a qual vai servir como composição base a testar nos trechos experimentais que irão ser construídos. Finalmente, propõem-se as temperaturas de mistura, espalhamento e compactação previsivelmente mais adequadas para o tipo de mistura que se formulou.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS GRANULARES	2
2.1- Nota Introdutória	2
2.2- Resultados dos Ensaio Laboratoriais	2
2.3- Crítica dos Resultados Obtidos Face aos Valores de Referência	4
2.3.1- Generalidades	4
2.3.2- Comparação com o Caderno de Encargos-Tipo da JAE 1998 (CEJAE98).....	4
3. CARACTERÍSTICAS DOS BETUMES	8
4. ESTUDO DA MISTURA DE AGREGADOS.....	9
4.1- Nota Introdutória	9
4.2- Cálculo das Proporções das Fracções de Agregados Disponíveis.....	9
4.2.1- Generalidades	9
4.2.2- Pedreira de S. João da Ribeira	10
4.2.3- Pedreira de Fornelo.....	12
4.2.4- Selecção da Pedreira	12
4.2.5- Mistura de Agregados a Usar no Trecho Pré-Experimental.....	13
4.2.6- Cálculo das proporções adoptando o CEJAE98	14
5. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA DE ALTO MÓDULO.....	17
5.1- Nota Introdutória	17
5.2- Estimativa da Percentagem Óptima de Betume	17
5.3- Estudo Marshall	19
5.3.1- Estudo realizado no LPAV do DEC da FCTUC	19
5.3.2- Estudo realizado no NPR do LNEC.....	21
5.4- Ensaio com Wheel Tracking	23
6. TEMPERATURAS DE MISTURA E COMPACTAÇÃO A ADOPTAR.....	24
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	25

Índice de Quadros

QUADRO 1 - FRACÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS FORNECIDOS PELO EMPREITEIRO.....	3
QUADRO 2 - GRANULOMETRIAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE FORNELO	3
QUADRO 3 - GRANULOMETRIAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE S. JOÃO DA RIBEIRA	3
QUADRO 4 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS GROSSOS	3
QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS FINOS	4
QUADRO 6 - AGREGADOS GROSSOS: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM AS EXIGÊNCIAS DO CEJAE98	6
QUADRO 7 - MATERIAIS FINOS: COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES COM AS EXIGÊNCIAS DO CEJAE98	6
QUADRO 8 - MATERIAIS FINOS: COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES COM AS EXIGÊNCIAS DA NF P 98-140	7
QUADRO 9 - BETUMES: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM AS EXIGÊNCIAS DA LNEC E 80-1997	8
QUADRO 10 - FUSO GRANULOMÉTRICO DEFINIDO NO CADERNO DE ENCARGOS DA OBRA.....	9
QUADRO 11 - MISTURAS DE AGREGADOS ENSALADAS COM PRENSA GIRATÓRIA DE CORTE	10
QUADRO 12 - RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM PRENSA GIRATÓRIA DE CORTE.....	11
QUADRO 13 - GRANULOMETRIAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE FORNELO (MÉDIA DE 3 MESES)	13
QUADRO 14 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE AGREGADOS ADOPTADA.....	14
QUADRO 15 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE AGREGADOS OBTIDA PARA O FUSO INDICADO NO CEJAE98	15
QUADRO 16 - MAM PARA CAMADA DE BASE - RESULTADOS DO ESTUDO MARSHALL (LPAV).....	19
QUADRO 17- ESTUDO MARSHALL: COMPARAÇÃO COM O CEJAE98 PARA UMA POROSIDADE DE 3%	20
QUADRO 18- ESTUDO MARSHALL: COMPARAÇÃO COM O CEJAE98 PARA UMA POROSIDADE DE 2%	21
QUADRO 19 - MAM PARA CAMADA DE BASE - RESULTADOS DO ESTUDO MARSHALL (LNEC)	21
QUADRO 20- ESTUDO MARSHALL: COMPARAÇÃO DOS ESTUDOS LPAV E LNEC PARA $p_b=5,2\%$	22
QUADRO 21- VALORES MÁXIMOS DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO, 10^{-3} mm/min (D.G. CARRETERAS)	23
QUADRO 22- <i>WHEEL TRACKING</i> : VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA	24

Índice de Figuras

FIGURA 1 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE FORNELO	5
FIGURA 2 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE S. JOÃO DA RIBEIRA	5
FIGURA 3 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MISTURAS SJR3 E SJR4.....	11
FIGURA 4 - CURVA DA MISTURA E FUSO GRANULOMÉTRICO INDICADO NO C.E. DA OBRA	14
FIGURA 5 - CURVA DA MISTURA ADOPTADA E FUSO GRANULOMÉTRICO INDICADO NO CEJAE98.....	15
FIGURA 6 - CURVA DA MISTURA OBTIDA COM BASE NO FUSO GRANULOMÉTRICO INDICADO NO CEJAE98.....	16
FIGURA 7 - CURVA DA MISTURA ADOPTADA E FUSO GRANULOMÉTRICO INDICADO NO CEJAE98.....	16
FIGURA 8 - MAM PARA CAMADA DE BASE - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ESTUDO MARSHALL (LPAV).....	20
FIGURA 9 - MAM PARA CAMADA DE BASE - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ESTUDO MARSHALL (LNEC).....	22
FIGURA 10 - COMPARAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ESTUDOS MARSHALL LPAV E LNEC	22

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105
1º RELATÓRIO INTERNO

- FORMULAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA DE ALTO MÓDULO -

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do protocolo JAE/LNEC, e na sequência da empreitada de beneficiação das Estradas Nacionais nºs 14, 104 e 105, foram realizados vários estudos no âmbito da formulação de uma mistura betuminosa de alto módulo de deformabilidade (MAM) cujos resultados e principais conclusões são indicados no presente relatório.

Aquela mistura destina-se a ser aplicada em camada de base e constitui a solução de projecto para alguns trechos da Estrada Nacional nº 14, entre o Nó de Chantre (Km 4,585) e o Limite do Distrito de Braga (Km 20,028).

O empreiteiro Monte & Monte forneceu dois conjuntos de agregados graníticos britados com proveniência distinta. Um deles provém de uma pedreira situada nas proximidades da obra, designada por Pedreira de Fornelo. O outro tem origem numa pedreira mais distante (Ponte de Lima), designada por Pedreira de S. João da Ribeira.

Foram também verificadas as características de dois betumes duros, um *CEPSA* e outro *PETROGAL*, com o objectivo de seleccionar aqueles ligantes para a realização de trechos experimentais.

A metodologia seguida consistiu na realização de um conjunto de ensaios laboratoriais destinados a caracterizar adequadamente os materiais fornecidos (agregados e ligantes), visando, por um lado, verificar se as propriedades daqueles cumpriam o especificado no caderno de encargos da obra e/ou exigências especificadas na bibliografia especializada e, por outro lado, determinar as características daqueles materiais necessárias para os estudos de formulação das misturas betuminosas.

Numa segunda fase, realizaram-se alguns estudos laboratoriais de formulação com o objectivo de seleccionar a(s) mistura(s) de alto módulo a testar nos trechos experimentais. Apresentam-se os resultados dos ensaios realizados e discutem-se as conclusões a que se chegou.

2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS GRANULARES

2.1- Nota Introdutória

A determinação das características físicas dos materiais granulares fornecidos foi feita de acordo com as Normas Portuguesas (NP), Especificações do LNEC (LNEC E) e outros documentos normativos nacionais ou estrangeiros indicados entre parêntesis e consistiu na realização dos ensaios abaixo mencionados:

Materiais Grossos

- Análises granulométricas (LNEC E 233-1969; LNEC E 235-1969);
- Ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles - granulometria B (LNEC E 237-1970);
- Determinação de índices de lamelação e alongamento (British Standard BS 812-1985);
- Determinação de massas volúmicas e absorções de água (NP 581-1969; NP 954-1973);
- Determinação da adesividade betume - inerte (JAE P.9-53).

Materiais Finos

- Determinação de densidades das partículas (NP 83-1965).
- Ensaio de equivalente de areia (LNEC E 199-1967);
- Ensaio do azul de metileno - método da mancha (AFNOR P 18-592-1990);
- Determinação do índice de vazios Rigden (AFNOR P 18-565-1990);
- Determinação do poder absorvente (AFNOR P 98-256-1)

2.2- Resultados dos Ensaios Laboratoriais

Como se referiu, o empreiteiro forneceu materiais granulares provenientes das pedreiras de Fornelo e de S. João da Ribeira. As fracções granulométricas que constituem cada um deles são as apresentadas no QUADRO 1.

QUADRO 1 - FRACÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS FORNECIDOS PELO EMPREITEIRO

Origem do Material	Fracções Granulométricas			
Pedreira de Furnelo	Fracção 14/20	Fracção 10/14	Fracção 6/10	Fracção 0/6
Pedreira de S. João do Campo	Fracção 18/25	Fracção 12/18	Fracção 6/12	Fracção 0/6

Nos QUADROS 2 a 5 apresentam-se as características físicas obtidas nos diversos ensaios laboratoriais realizados para cada uma das fracções fornecidas.

QUADRO 2 - GRANULOMETRIAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE FORNELO

Peneiro ASTM abertura das malhas	1"	3/4"	1/2"	3/8"	nº4	nº10	nº40	nº80	nº200
	25,4 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,50 mm	4,75 mm	2,00 mm	0,425 mm	0,18 mm	0,075 mm
Fracção 14/20	100	96,8	22,7	4,1	1,1	0,9	0,86	0,80	0,65
Fracção 10/14	---	100	93	35,5	2,12	1,27	1,04	0,91	0,70
Fracção 6/10	---	---	100	93,5	10,6	2,6	1,6	1,4	1,1
Fracção 0/6	---	---	---	100	92,8	61,9	27,1	15,7	7,9

QUADRO 3 - GRANULOMETRIAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE S. JOÃO DA RIBEIRA

Peneiro ASTM abertura das malhas	1"	3/4"	1/2"	3/8"	nº4	nº10	nº40	nº80	nº200
	25,4 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,50 mm	4,75 mm	2,00 mm	0,425 mm	0,18 mm	0,075 mm
Fracção 18/25	100	72,8	3,7	1,9	1,4	1,4	1,3	1,0	0,6
Fracção 12/18	---	100	56,8	6,7	2,9	2,6	2,0	1,5	0,9
Fracção 6/12	---	100	99,8	73,1	6,0	2,6	2,1	1,6	1,0
Fracção 0/6	---	---	---	100	97,4	67,4	33,7	20,1	10,9

QUADRO 4 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS GROSSOS

Características Físicas	Massa volúmica (g/cm ³)			Absorção água (%)	Desgaste Los Angeles (%)	Índices de forma		Adesividade Inerte-betume
	M. Imp.	P. Sat.	P. Secas			Lam. (%)	Along. (%)	
Fracção	FORNELO							
14/20	2,66	2,63	2,62	0,6	24	17	29	Frac
10/14	2,65	2,62	2,60	0,7		14	48	
6/10	2,64	2,61	2,59	0,8		23	39	
Fracção	S. JOÃO DA RIBEIRA							
18/25	2,71	2,68	2,67	0,5	28	22	31	Aceitável
12/18	2,71	2,66	2,63	1,2		26	28	
6/12	2,69	2,56	2,63	1,0		13	22	

QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS FINOS

Características Físicas	Densidade das partículas	Equivalente de areia (%)	Valor do azul de metileno (g/100 g)	Índice de vazios Rigden (%)	Absorção de betume (g)
Fracção	FORNELO				
0/6	2,72	68	0,3	39,5	37,6
0/6 + Cal Hidráulica	---	---	---	52,7	25,5
Fracção	S. JOÃO DA RIBEIRA				
0/6	2,70	71	0,6	42,3	36,9
0/6 + Cal hidráulica	---	---	0,3	53,6	26,2

2.3- Crítica dos Resultados Obtidos Face aos Valores de Referência

2.3.1- Generalidades

Os ensaios realizados têm como objectivo central a selecção dos materiais granulares a aplicar no fabrico da(s) mistura(s) betuminosa(s) de alto módulo a formular com vista à sua aplicação, em camada de base, na EN 14.

Por se tratar de uma tecnologia pouco experimentada no nosso país, vai seguir-se uma metodologia em que os resultados obtidos serão comparados com os valores propostos em distintas referências bibliográficas, pretendendo-se com isso verificar a adequabilidade dos materiais granulares disponíveis ao uso previsto.

2.3.2- Comparação com o Caderno de Encargos-Tipo da JAE 1998 (CEJAE98)

Recentemente a Junta Autónoma de Estradas (JAE) procedeu à revisão e actualização do Caderno de Encargos-Tipo aplicável à rede rodoviária nacional. Nele foram introduzidos critérios a cumprir relativos às misturas de alto módulo de deformabilidade a usar em Portugal. As características a que devem obedecer os agregados são as abaixo indicadas:

- Perda por desgaste na máquina de Los Angeles (granulometria B) ... ≤ 35%
- Índices de lamelação e alongamento ≤ 30%
- Equivalente de areia da mistura de agregados sem filer ≥ 50%
- Valor de azul de metileno (material de dimensão inferior a 75 µm).. ≤ 0,8
- Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes..... ≤ 3%

O caderno de encargos propõe que as MAM para camada de base sejam fabricadas com as fracções granulométricas 0/4, 4/10 e 10/20, tratando-se portanto de uma mistura de granulometria contínua cuja dimensão máxima do agregado é 20 mm. Como se pode verificar por consulta das QUADROS 1, 2 e 3, nenhum dos conjuntos de agregados fornecidos pelo empreiteiro cumpre as recomendações relativas às fracções granulométricas. Além disso, verifica-se que algumas das fracções têm uma designação incorrecta face às granulometrias obtidas se tomarmos o conceito de dimensão nominal (d/D) para a sua classificação.

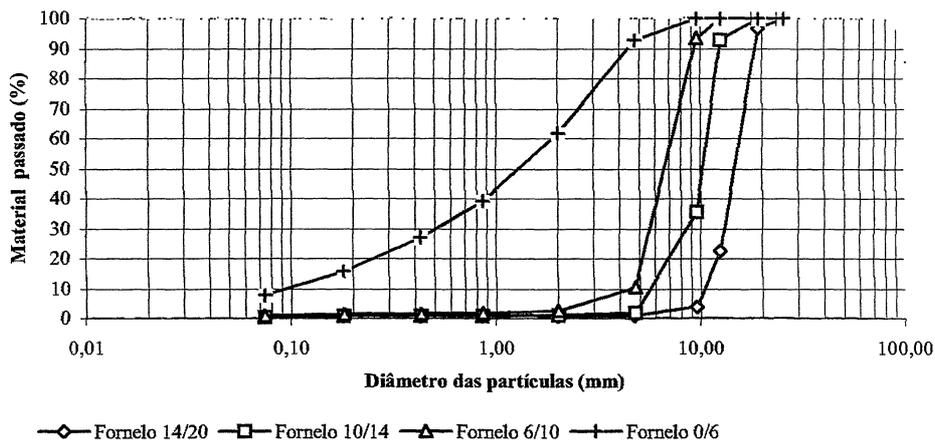


FIGURA 1 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE FORNELO

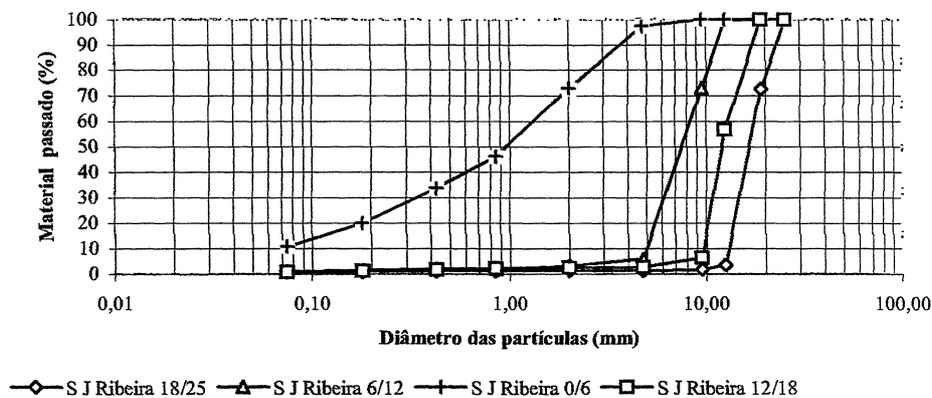


FIGURA 2 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE S. JOÃO DA RIBEIRA

Aquele conceito pressupõe que o material possa conter 10% de partículas retidas no peneiro de maior dimensão (D) e que 10% das partículas possa passar no peneiro de menor dimensão (d). Contudo, a soma daquelas duas percentagens não deverá ultrapassar 15%. Ora, isso não se verifica para os materiais fornecidos como, aliás, se pode verificar observando as FIGURAS 1 e 2. Contudo,

isso não parece traduzir-se em perda de qualidade da(s) mistura(s) a formular, porquanto o objectivo final é o de construir uma mistura de agregados cuja curva granulométrica tenha o traçado especificado.

No QUADRO 6 comparam-se os valores especificados pela JAE e os obtidos para os materiais granulares grossos em análise. Verifica-se que, em geral, todas as fracções cumprem as exigências indicadas no Caderno de Encargos-Tipo. Contudo, os agregados provenientes de Fornelo têm um índice de alongamento substancialmente acima dos valores limites. A utilização destes materiais apresenta o inconveniente de produzir camadas em que, após a compactação, os agregados tendem a posicionar-se segundo uma orientação preferencial, resultando num material mais heterogéneo. Além disso, as partículas alongadas são mais frágeis que as de forma predominantemente cúbica.

QUADRO 6
AGREGADOS GROSSOS: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM AS EXIGÊNCIAS DO CEJAE98

Características Físicas	Absorção água (%)	Desgaste Los Angeles (%)	Índices de forma	
			Lam. (%)	Along. (%)
Fracção	FORNELO			
14/20	0,6	24	17	29
10/14	0,7		14	48
6/10	0,8		23	39
Fracção	S. JOÃO DA RIBEIRA			
18/25	0,5	28	22	31
12/18	1,2		26	28
6/12	1,0		13	22
Limite	CADERNO DE ENCARGOS-TIPO DA JAE			
	máx. 3	máx. 35	máx. 30	máx. 30

Relativamente aos materiais granulares mais finos, areia e filer, o CEJAE98 faz algumas recomendações relativas à limpeza dos materiais, sugerindo ainda uma granulometria para o filer a utilizar no fabrico de misturas betuminosas deverá ser pó de calcário (com $IP < 4$), cimento Portland, cal hidráulica devidamente apagada ou cinzas volantes. Além disso, aqueles materiais deverão ter 100% de passados no peneiro nº40 (0,425 mm), de 95% a 100% de passados no peneiro nº80 (0,18 mm) e entre 75% e 100% de material passado no peneiro nº200 (0,075 mm).

No QUADRO 7 comparam-se os valores especificados no CEJAE98 com os determinados para as areias. Qualquer dos materiais cumpre as exigências.

QUADRO 7 - MATERIAIS FINOS: COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES COM AS EXIGÊNCIAS DO CEJAE98

Características Físicas	Valor do azul de metileno (g/100 g)	Equivalente de Areia (%)
Fornelo 0/6	0,3	68
S. João da Ribeira 0/6	0,6	71
CEJAE98	Limite	
	máx. 0,8	min. 50

Pelo que se referiu, os materiais grossos provenientes da Pedreira de Fornelo não cumprem as prescrições do CEJAE98. No entanto, dada a proximidade daquela pedreira relativamente à obra há algum interesse em incluir nos estudos de formulação preliminares aqueles materiais, de modo a poder tirar conclusões mais fundamentadas numa fase mais avançada dos trabalhos.

Podem ainda comparar-se algumas características dos materiais finos com os indicados na Norma Francesa NF P 98-140 - Couches d'assises: Enrobés à module élevé.

QUADRO 8 - MATERIAIS FINOS: COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES COM AS EXIGÊNCIAS DA NF P 98-140

Características Físicas	Valor do azul de metileno (g/100 g)	Índice de vazios Rigden (%)	Poder Absorvente (g)
Material	FORNELO		
0/6	0,3	39,5	37,6
0/6 + Cal Hidráulica	---	52,7	25,5
Material	S. JOÃO DA RIBEIRA		
0/6	0,6	42,3	36,9
0/6 + Cal hidráulica	0,3	53,6	26,2
Limite	NF P 98-140		
	máx. 1,0	máx. 40	min. 40

Analisando o QUADRO 8 podem tirar-se algumas conclusões. Verifica-se que as areias, de natureza granítica, provenientes de qualquer das duas pedreiras apresentam valores de azul de metileno adequados, isto é, têm uma limpeza adequada para serem aplicadas no fabrico de misturas betuminosas. Quando se misturam em partes iguais com cal hidráulica, como seria de esperar, continuam a apresentar boas características relativamente àquele parâmetro.

Em relação ao Índice de vazios Rigden (IVR), apenas a areia proveniente da pedreira de Fornelo respeita o limite indicado na norma francesa. Estranhamente, a incorporação de cal hidráulica prejudica os resultados face a este parâmetro. Não é evidente porque razão isso acontece.

A capacidade dos materiais finos disponíveis para “absorver” 15 g de betume 50/70 não é a adequada face ao limite fixado. Dada a natureza granítica dos materiais, seria previsível um mau desempenho dos materiais face ao parâmetro “poder absorvente” (PA), conhecida que é a “falta de afinidade” entre o betume e os materiais graníticos. A adição de cal hidráulica aos materiais finos disponíveis mostrou-se também prejudicial neste caso.

A averiguação da qualidade das areias feita acima é um pouco abusiva porquanto a norma francesa referida aplica-se a fileres e não a areias. Assim, especialmente no caso de IVR e de PA, os ensaios são realizados sobre a fracção fina dos materiais, pelo que não caracterizam todo o material. Todavia, a análise feita não é totalmente desprovida de sentido, uma vez que as misturas incorporam uma parte muito significativa de areia, a qual contribui de sobremaneira para a quantidade de finos que compõem a mistura.

3. CARACTERÍSTICAS DOS BETUMES

Os dois betumes, de proveniência diferente (*PETROGAL* e *CEPSA*), fornecidos pelo empreiteiro foram caracterizados de acordo com a Especificação LNEC E 80-1997. Os resultados obtidos são os indicados no QUADRO 9.

QUADRO 9
BETUMES: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM AS EXIGÊNCIAS DA LNEC E 80-1997

Propriedade		Betume 10/20 CEPSA	Betume 10/20 PETROGAL	Exigências de acordo com a Especificação E 80
Penetração (25°C, 100g, 5s), 10 ⁻¹ mm		13	16	10 – 20
Temperatura de amolecimento, °C		63,1	60,1	63 – 76
Viscosidade cinemática, mm ² /s		1281	833	≥ 1000
Solubilidade no tolueno, %		99,98	99,89	≥ 99,0
Temperatura de inflamação, °C		339	339	≥ 250
RESISTÊNCIA AO ENDURECIMENTO (método do RTFOT)	Varição de massa, %	+ 0,04	+ 0,13	≤ 0,5
	Penetração (25°C, 100g, 5s), % penetração original	69	81	≥ 60
	Temperatura de amolecimento, °C	67,6	61,2	≥ 65
	Aumento da temperatura de amolecimento, °C	4,5	1,1	≤ 8

Uma análise dos resultados permite verificar que o betume duro 10/20 *PETROGAL* não cumpre as exigências da Especificação LNEC E 80-1997, nomeadamente no que se refere à temperatura de amolecimento, à viscosidade cinemática e à temperatura de amolecimento após ensaio de

envelhecimento RTFOT. Com base naqueles resultados, pode afirmar-se que aquele betume é mais mole que o exigido na especificação.

Pelas razões apontadas, rejeitou-se o betume *PETROGAL* e adoptou-se o betume *CEPSA* para a realização dos estudos subsequentes.

4. ESTUDO DA MISTURA DE AGREGADOS

4.1- Nota Introdutória

Para o estudo da composição da mistura de agregados utilizou-se a metodologia habitualmente usada em Portugal. Definiu-se, *à priori*, o fuso granulométrico que deveria ser cumprido pela mistura de agregados, sendo a determinação das proporções de cada uma das fracções função da curva granulométrica de referência (em geral com o andamento do fuso médio). A curva que resulta da combinação das fracções disponíveis deve ter um traçado tanto quanto possível próximo do apresentado pela curva de referência.

4.2- Cálculo das Proporções das Fracções de Agregados Disponíveis

4.2.1- Generalidades

Como se referiu, dispunha-se de materiais granulares com duas proveniências diferentes, pelo que se procurou construir a curva granulométrica de referência com cada um dos dois conjuntos de materiais (Fornelo e S. João da Ribeira).

Com as fracções de materiais granulares disponíveis (QUADROS 2 e 3) não foi possível construir uma curva granulométrica de acordo com o fuso indicado no Caderno de Encargos da obra (QUADRO 10).

QUADRO 10 - FUSO GRANULOMÉTRICO DEFINIDO NO CADERNO DE ENCARGOS DA OBRA

Peneiro ASTM	1"	3/4"	3/8"	nº4	nº10	nº40	nº200
abertura das malhas	25,4 mm	19,0 mm	9,50 mm	4,75 mm	2,0 mm	0,43 mm	0,075 mm
C.E.	100	89-100	64-76	44-56	28-37	17-23	8-9

Por essa razão, utilizou-se cal hidráulica como filer de modo a adicionar à mistura a quantidade de partículas finas necessárias à construção de uma mistura que cumprisse o fuso especificado.

4.2.2- Pedreira de S. João da Ribeira

As percentagens, em massa, determinadas pelo método dos mínimos quadrados, tomando como referência a curva definida pelo fuso médio, para cada uma das fracções disponíveis foram as abaixo indicadas:

Mistura: SJR1

Fracção 18/25 mm	19,5 %
Fracção 12/18 mm	2,9 %
Fracção 6/12 mm	29,8 %
Fracção 0/6 mm	44,1 %
Filer (cal hidráulica)	3,7 %

Verificou-se que a fracção 12/18 entrava numa reduzida percentagem na composição da mistura. Por essa razão, optou-se por não a utilizar. Uma nova simulação realizada resultou nas seguintes percentagens:

Mistura: SJR2

Fracção 18/25 mm	21,2 %
Fracção 6/12 mm	31,2 %
Fracção 0/6 mm	43,8 %
Filer (cal hidráulica)	3,8 %

Por se pretender, nesta fase dos trabalhos, avaliar melhor a qualidade da mistura de agregados a adoptar para o fabrico da(s) mistura(s) betuminosa(s) a formular, realizaram-se ensaios de compactação com prensa giratória de corte (PGC). Para o efeito, testaram-se duas combinações diferentes de agregados provenientes de S. João da Ribeira. Uma delas (SJR3) seguiu de perto os valores obtidos anteriormente, sendo a outra (SJR4) de esqueleto mais arenoso que a primeira (QUADRO 11). Na FIGURA 3 representam-se graficamente as curvas granulométricas das duas misturas. Nos ensaios com PGC utilizou-se uma percentagem ponderal fixa de 5% de betume.

QUADRO 11 - MISTURAS DE AGREGADOS ENSAIADAS COM PRENSA GIRATÓRIA DE CORTE

MISTURA	Fracção 18/25 mm	Fracção 6/12 mm	Fracção 0/6 mm	Cal Hidráulica
SJR3	21 %	32 %	43 %	4 %
SJR4	13,5 %	28 %	57 %	1,5 %

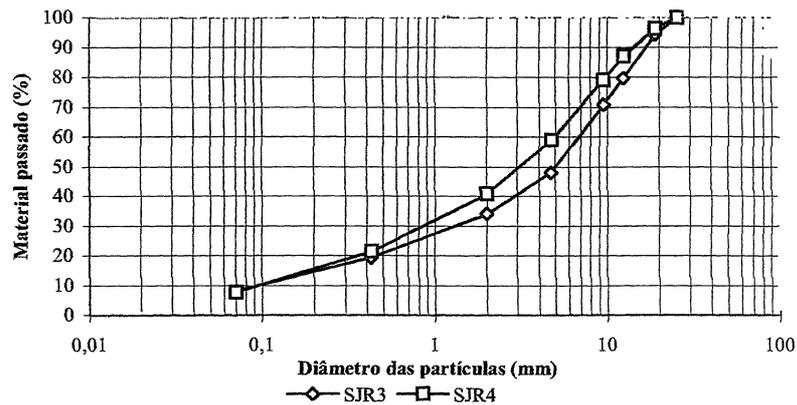


FIGURA 3 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MISTURAS SJR3 E SJR4

Os ensaios com prensa giratória consistiram na moldagem de provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro, aplicando-se uma pressão vertical de 600 kPa e um ângulo de inclinação dos moldes relativamente à vertical de 1,5°. Para cada um dos espécimes moldados foram usadas 120 rotações, medindo-se a variação da sua altura com o aumento do número de rotações. Para cada uma das misturas de agregados em estudo foram fabricados 3 provetes.

No QUADRO 12 apresentam-se os valores das dimensões dos provetes no início e no final dos ensaios, bem como as baridades e as porosidades obtidas.

QUADRO 12 - RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM PRENSA GIRATÓRIA DE CORTE

MISTURA	Nº provete	Alturas (mm)		Baridade (g/cm³)	Baridade média (g/cm³)	Porosidade (%)	Porosidade média (%)
		Inicial	Final				
SJR3 * $\gamma_{m\acute{a}x.} = 2,481$ (g/cm³)	1	115,2	99,4	2,432	2,432	1,975	1,975
	2	115,2	98,7	2,433		1,935	
	3	114,8	98,9	2,431		2,015	
SJR4 * $\gamma_{m\acute{a}x.} = 2,487$ (g/cm³)	4	117,7	101,2	2,395	2,392	3,699	3,820
	5	114,4	100,3	2,385		4,101	
	6	112,7	99,3	2,396		3,659	

* - baridade máxima teórica calculada analiticamente

Verifica-se que a mistura SJR3 conduziu a uma mistura mais fechada, isto é, com uma menor porosidade e uma maior baridade. As diferenças obtidas não são significativas, pelo que não é possível inferir com segurança a qualidade relativa das duas misturas de agregados testadas.

4.2.3- Pedreira de Fornelo

As percentagens, em massa, determinadas pelo método dos mínimos quadrados para cada uma das fracções disponíveis foram as abaixo indicadas:

Mistura: FRN1

Fracção 14/20 mm	25,6 %
Fracção 10/14 mm	6,4 %
Fracção 6/10 mm	18,1 %
Fracção 0/6 mm	43,4 %
Filer (cal hidráulica)	6,5 %

Verificou-se que a fracção 10/14 entrava numa reduzida percentagem na composição da mistura. Por essa razão, optou-se por não a utilizar. Uma nova simulação realizada resultou nas seguintes percentagens:

Mistura: FRN2

Fracção 14/20 mm	28,2 %
Fracção 6/10 mm	22,2 %
Fracção 0/6 mm	42,9 %
Filer (cal hidráulica)	6,7 %

4.2.4- Selecção da Pedreira

Com base nos estudos desenvolvidos nesta fase do trabalho, verificou-se que os materiais granulares provenientes da pedreira de S. João da Ribeira tinham melhores características físicas que os obtidos na pedreira de Fornelo. Apesar disso, não foi possível obter conclusões que apontassem para claras vantagens ao adoptar os agregados da primeira pedreira em vez dos da segunda. Assim, dado que a pedreira de Fornelo está localizada nas proximidades da obra, optou-se por utilizar os agregados provenientes desta.

4.2.5- Mistura de Agregados a Usar no Trecho Pré-Experimental

As proporções de cada uma das fracções a usar na mistura de agregados foi determinada como se referiu acima. Contudo, por se dispor de um controlo da granulometria da pedreira realizada ao longo de 5 meses, optou-se por utilizar como curvas granulométricas das várias fracções o valor médio dos últimos 3 meses. Pretende-se assim que os cálculos venham a traduzir melhor a realidade da obra. Há, no entanto, que referir a necessidade de controlar as granulometrias ao longo da obra, de modo a evitar desvios indesejáveis no andamento da curva granulométrica da mistura realmente aplicada.

No QUADRO 13 apresentam-se as granulometrias das várias fracções disponíveis obtidas do modo acima referido.

QUADRO 13 - GRANULOMETRIAS DOS MATERIAIS DA PEDREIRA DE FORNELO (MÉDIA DE 3 MESES)

Peneiro ASTM abertura das malhas	1"	3/4"	1/2"	3/8"	nº4	nº10	nº40	nº200
Fracção 14/20	100	96,1	26,5	5,7	2,6	1,8	1,3	0,8
Fracção 6/10	---	---	100	93	8,8	3,5	2,4	1,5
Fracção 0/6	---	---	---	100	92	57,5	24,5	10

As percentagens, em massa, determinadas pelo método dos mínimos quadrados para cada uma das fracções disponíveis foram as abaixo indicadas:

Mistura: FRN3

Fracção 14/20 mm 29,2 %

Fracção 6/10 mm 20 %

Fracção 0/6 mm 44,3 %

Filer (cal hidráulica) 6,5 %

Como se verifica, as proporções de cada uma das fracções praticamente não se alterou quando se consideram as granulometrias obtidas no controlo de pedreira em vez das determinadas em laboratório (comparar com FRN2). Pelo facto da solução obtida incluir uma percentagem relativamente elevada de filer, a qual tornaria a mistura mais cara, numa segunda aproximação procurou-se uma outra solução, ainda próxima da calculada, na qual se reduziu um pouco a quantidade de filer. A solução finalmente encontrada permitiu, mesmo assim, respeitar o fuso

granulométrico especificado para a obra. O QUADRO 14 e a FIGURA 4 traduzem a mistura de trabalho encontrada da forma que se referiu.

QUADRO 14 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE AGREGADOS ADOPTADA (FRN4)

Peneiro ASTM abertura das malhas	1" 25,4 mm	3/4" 19,0 mm	1/2" 12,5 mm	3/8" 9,50 mm	nº4 4,75 mm	nº10 2,0 mm	nº40 0,43 mm	nº200 0,075 mm
14/20 (30 %)	30,0	28,8	8,0	1,7	0,8	0,5	0,4	0,2
6/10 (20 %)	20,0	20,0	20,0	18,6	1,8	0,7	0,5	0,3
0/6 (45 %)	45,0	45,0	45,0	45,0	41,4	25,9	11,0	4,5
Filer (5 %)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,9
Resultado	100,0	98,8	78,0	70,3	48,9	32,1	16,9	8,9
Fuso do C.E.	100	89-100	---	64-76	44-56	28-37	17-23	8-9

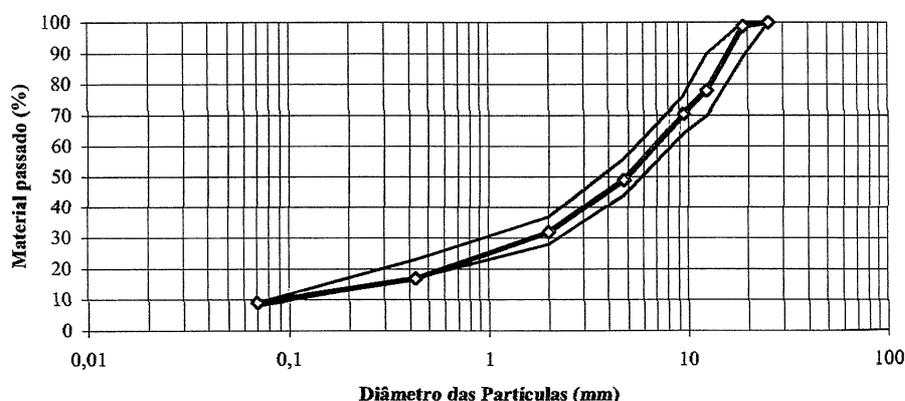


FIGURA 4 - CURVA DA MISTURA FRN4 E FUSO GRANULOMÉTRICO INDICADO NO C.E. DA OBRA

Verifica-se que a composição de agregados proposta permite construir uma curva granulométrica que apresenta um andamento geral semelhante ao do fuso especificado. Além disso, encaixa-se dentro dos limites da banda granulométrica indicada no C.E. da obra.

4.2.6- Cálculo das proporções adoptando o CEJAE98

Quando foi lançado o concurso para a empreitada o Caderno de Encargos-Tipo da JAE ainda não tinha sido publicado. Por essa razão, o fuso granulométrico que veio a ser proposto por aquele C.E. difere um pouco do que tinha sido indicado para a obra. Assim, para tornar mais evidentes as diferenças existentes entre os dois C.E., representam-se na FIGURA 5 a curva granulométrica da mistura obtida e o fuso granulométrico indicado no CEJAE98 para MAM em camadas de base.

Comparando as FIGURAS 4 e 5 pode verificar-se que as bandas granulométricas propostas no C.E. da obra e no CEJAE98 não diferem muito na zona dos grossos. Já na zona dos médios e finos, a segunda apresenta um intervalo de variação maior, sendo, por isso, menos restritiva que a primeira. Este aspecto particular faz com que, adoptando o fuso indicado no CEJAE98, possam ser usadas misturas de agregados com menor quantidade de finos que no primeiro caso. Isso é, aliás, notório quando se sobrepõe a curva da mistura adoptada à banda granulométrica proposta pelo CEJAE98 (FIGURA 5).

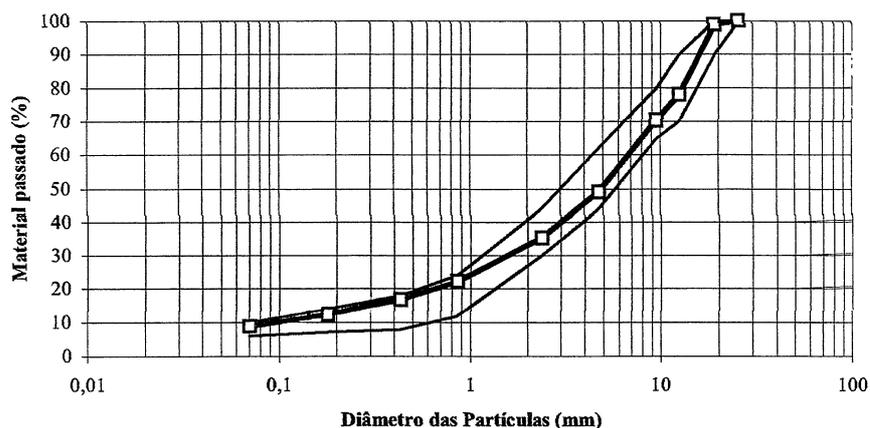


FIGURA 5 - CURVA DA MISTURA ADOPTADA E FUSO GRANULOMÉTRICO INDICADO NO CEJAE98

Adoptando a banda granulométrica proposta pelo CEJAE98, e tomando como curva de referência a linha média daquela banda, obtiveram-se para as proporções das fracções granulares da pedra de Fornelo os resultados indicados no QUADRO 15. Tal como era previsível, a quantidade de filer a utilizar na mistura de agregados diminuiu significativamente.

QUADRO 15 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE AGREGADOS OBTIDA PARA O FUSO INDICADO NO CEJAE98

Peneiro ASTM abertura das malhas	1"	3/4"	1/2"	3/8"	nº4	nº8	nº20	nº40	nº80	nº200
	25,4 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,50 mm	4,75 mm	2,36 mm	0,85 mm	0,43 mm	0,18 mm	0,075 mm
14/20 (29,4 %)	29,4	28,3	7,8	1,7	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2
6/10 (15,7 %)	15,7	15,7	15,7	14,6	1,4	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2
0/6 (52,6 %)	52,6	52,6	52,6	52,6	48,4	33,7	19,0	12,9	8,1	5,3
Filer (2,3 %)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	1,8
Resultado	100,0	98,9	78,4	71,2	52,9	37,3	22,1	16,0	10,9	7,5
C.E. JAE 1998	100	90-100	70-90	60-80	44-62	30-44	16-30	10-21	7-14	6-10

Na FIGURA 6 mostra-se a curva granulométrica que resultou da combinação das várias fracções disponíveis (FRN5) e a banda granulométrica proposta no CEJAE98.

Observando a FIGURA 7 verifica-se que a mistura determinada com base em CEJAE98, FRN5, descrita no QUADRO 15 e na FIGURA 6, embora respeite os limites da banda granulométrica, não tem um andamento particularmente adequado face às indicações do CE da obra. No entanto, admitindo que a JAE tem interesse em testar a banda granulométrica proposta no seu recente documento normativo, haverá todo o interesse em testar a mistura de agregados indicada no QUADRO 15 (FRN5). Todavia, apenas com base em estudos decorrentes do trecho experimental poderão tirar-se conclusões a esse respeito.

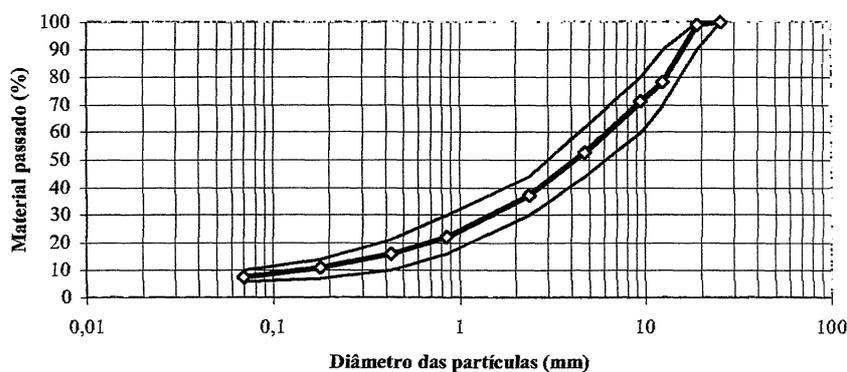


FIGURA 6 - CURVA DA MISTURA FRN5 E FUSO GRANULOMÉTRICO INDICADO NO CEJAE98

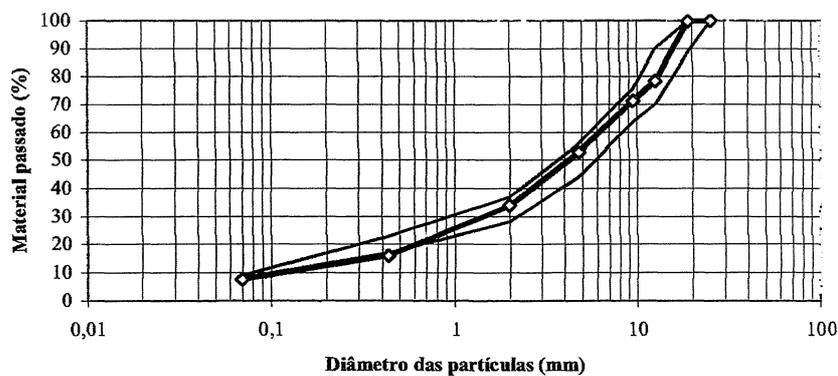


FIGURA 7 - CURVA DA MISTURA FRN5 E FUSO GRANULOMÉTRICO INDICADO NO CE DA OBRA

5. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA DE ALTO MÓDULO

5.1- Nota Introdutória

Tradicionalmente em Portugal, formular uma mistura betuminosa consiste em fixar a percentagem de betume e outras variáveis volumétricas da mistura, uma vez que se determina previamente uma mistura de agregados, a qual deve obedecer a uma banda granulométrica estabelecida. Além disso, as propriedades dos componentes são também verificadas face a certos requisitos. Assim, as variáveis em que se pode intervir no processo de formulação são poucas. Sem discutir as vantagens ou os inconvenientes deste procedimento, verifica-se que um processo de formulação deste tipo poderá consistir apenas em “optimizar” as variáveis ainda não fixadas com o objectivo de obter misturas tão adequadas quanto possível face aos mecanismos de degradação conhecidos.

Outra estratégia que tem sido seguida é a de fixar parâmetros de desempenho limites, os quais devem ser cumpridos pela mistura formulada, não havendo nestes casos “prescrição prévia de receitas”. Trata-se pois de um caminho bem diferente do que é corrente em Portugal. Obviamente, neste caso as variáveis susceptíveis de intervenção são muitas mais. A metodologia francesa é um caso típico de utilização deste tipo de abordagem.

Neste estudo de formulação prévio seguiu-se a primeira metodologia. Assim, realizaram-se formulações do tipo Marshall e também um conjunto de ensaios com wheel tracking, cujos resultados conduziram à formula que será aplicada no trecho pré-experimental.

5.2- Estimativa da Percentagem Ótima de Betume

Existem várias metodologias analíticas destinadas a estimar o teor em betume, t_b , mais adequada para o fabrico de uma mistura betuminosa. Em França é habitual utilizar-se a expressão (1) proposta na NF P 98-140 de 1992 - Couches d'assises: Enrobés à module élevé, a qual utiliza o conceito de superfície específica:

$$t_b = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[3]{\Sigma} \quad (1)$$

onde,

K - módulo de riqueza, o qual toma o valor mínimo de 3,4 para misturas de alto módulo da classe 2 francesas.

$$\alpha = \frac{2,65}{\rho_a} \quad (2)$$

ρ_a - massa volúmica da mistura de agregados, em g/cm^3 ,

$$\Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f - \text{superfície específica do agregado, em } \text{m}^2/\text{kg}, \quad (3)$$

com as proporções ponderais:

G dos materiais superiores a 6,3 mm,

S dos materiais compreendidos entre 6,3 mm e 0,315 mm,

s dos materiais compreendidos entre 0,315 mm e 0,08 mm,

f dos materiais inferiores a 0,074 mm.

Para a mistura de agregados que se seleccionou, as variáveis referidas tomam os valores abaixo indicados:

$$\rho_a = P_{14/20} \times \gamma_{14/20} + P_{6/10} \times \gamma_{6/10} + P_{0/6} \times \gamma_{0/6} + P_{\text{filer}} \times \gamma_{\text{filer}}$$

$$\rho_a = 0,30 \times 2,62 + 0,20 \times 2,59 + 0,45 \times 2,72 + 0,05 \times 2,7 = 2,663 \text{ g/cm}^3$$

$$\alpha = 0,995$$

$$\Sigma = 0,25 \times 0,6 + 2,3 \times 0,45 + 12 \times 0,07 + 135 \times 0,08 = 12,825$$

Assim, o teor em betume a adoptar terá, previsivelmente o seguinte valor:

$$t_b = 3,4 \times 0,995 \times \sqrt[5]{12,825} = 5,6 \%$$

o que corresponde a uma percentagem ponderal de betume de 5,3 %.

Uma outra metodologia analítica, proposta pelo C.R.R., é aquela que inclui o método de formulação de misturas betuminosas densas utilizado na Bélgica. A percentagem óptima estimada com base naquele procedimento foi de 5,3 %, para uma porosidade da mistura de 2 %.

Considerando a mistura de agregados FRN5, isto é, adoptando a banda granulométrica proposta no CEJAE98 em vez da proposta pelo C.E. da obra, a percentagem “óptima” de betume estimada pelo método analítico do C.R.R. foi de 5,5 % para uma porosidade da mistura betuminosa de 2 %. Para uma porosidade de 3 % obteve-se o valor de 5,3 % para a percentagem de betume.

Em termos gerais, a percentagem “óptima” de betume não variará significativamente, quer se use a mistura de agregados FRN4 (com base no C.E. da obra), quer se adopte a mistura FRN5 obtida com base no CEJAE98.

5.3- Estudo Marshall

5.3.1- Estudo realizado no LPAV do DEC da FCTUC

Foram fabricados 6 provetes para cada uma das seguintes percentagens (em massa) de betume: 4,0; 4,5; 5,0; 5,5 e 6,0, compactados com 75 pancadas em cada topo, usando o betume e a mistura de agregados adoptada (FRN4). Os valores dos resultados que permitiram traçar as curvas para a determinação da percentagem óptima de betume são os indicados no QUADRO 16, encontrando-se as referidas curvas na FIGURA 8.

Note-se que, a baridade dos provetes foi determinada de acordo com a Especificação LNEC E-267 (1973) “Misturas betuminosas: determinação da densidade aparente” e a baridade máxima teórica foi determinada analiticamente com base no conhecimento das proporções da mistura e das massas volúmicas dos componentes, admitindo porosidade nula.

QUADRO 16 - MAM PARA CAMADA DE BASE - RESULTADOS DO ESTUDO MARSHALL (LPAV)

Mistura nº	Pb %	Bt g/cm ³	Bm g/cm ³	n %	VMA %	Sb %	Fr kgf	Def mm	Fr/Def kgf/mm
1	4,0	2,50	2,35	5,88	14,93	60,6	3165	2,9	1102,8
2	4,5	2,48	2,39	3,83	14,15	72,9	3812	4,4	872,3
3	5,0	2,46	2,40	2,52	14,05	82,1	2911	4,1	704,8
4	5,5	2,45	2,41	1,84	14,56	87,4	2254	4,3	524,2
5	6,0	2,43	2,40	1,23	15,08	91,8	2097	5,2	407,2

A percentagem “óptima” de ligante a adoptar será, com base nos valores representados na FIGURA 8 e nas considerações anteriores, a que resulta dos seguintes valores:

Baridade máxima (2,41 g/cm ³)	5,5 %;
Força de rotura máxima (3812 kgf).....	4,5 %;
Porosidade (3%).....	4,75 %.

Assim, a percentagem de betume, em massa, a considerar será de 4,9 % (média dos valores obtidos).

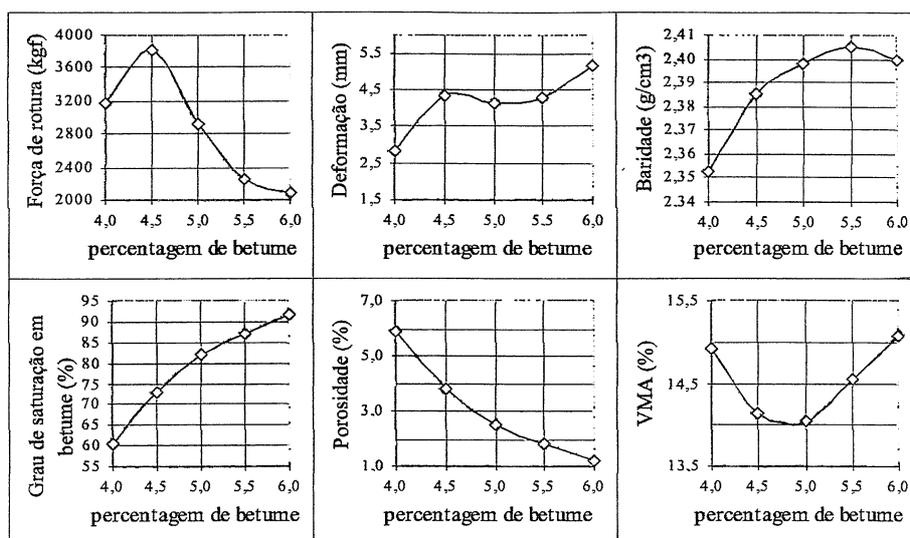


FIGURA 8 - MAM PARA CAMADA DE BASE - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ESTUDO MARSHALL (LPAV)

No C.E. da obra não é feita qualquer exigência relativamente a grandezas Marshall. Todavia, no CEJAE98 indicam-se limites para aqueles parâmetros, embora com a ressalva de que os valores devam ser ajustados em função do que venha a ser concluído na execução dum trecho experimental. Assim, no QUADRO 17 comparam-se os valores obtidos em laboratório com os especificados naquele documento da JAE para a percentagem óptima determinada.

QUADRO 17- ESTUDO MARSHALL: COMPARAÇÃO COM O CEJAE98 PARA UMA POROSIDADE DE 3%

Característica	Força de rotura (kN)	Deformação (mm)	Porosidade (%)	Grau de saturação em betume (%)	VMA (%)	Força/Deformação (kN/mm)
CAEJAE98	min. 16	máx. 4	2 a 6	---	---	---
Marshall	29	4,1	2,5	82	14	7,1

Refira-se que as misturas de alto módulo apresentam normalmente porosidades bastante baixas, por vezes muito próximas do limite inferior (2%) do intervalo especificado. Assim, julga-se que o valor da percentagem de betume determinado no gráfico da porosidade poderá ser um pouco superior, resultando assim num valor “óptimo” maior que o determinado. Considerando uma porosidade desta ordem de grandeza, a percentagem de betume correspondente é de 5,5%. Isso resulta numa percentagem “óptima” de ligante de 5,2% (QUADRO 18).

O CEJAE98 propõe ainda um valor entre 1,3 e 1,5 para a relação ponderal filer/betume. Neste caso particular obteve-se o valor de 1,46, o qual respeita o intervalo especificado.

QUADRO 18- ESTUDO MARSHALL: COMPARAÇÃO COM O CEJAE98 PARA UMA POROSIDADE DE 2%

Característica	Força de rotura (kN)	Deformação (mm)	Porosidade (%)	Grau de saturação em betume (%)	VMA (%)	Força/Deformação (kN/mm)
CAEJAE98	min. 16	máx. 4	2 a 6	---	---	---
Marshall	23	4,1	2	86	14,3	5,6

Dado que nesta mistura se utiliza um betume cuja temperatura de amolecimento (63,1 °C) está acima da temperatura do ensaio de compressão Marshall (60 °C), as conclusões que é possível tirar da aplicação daquele método devem ser consideradas com precaução. No entanto, pensa-se que para controlo de obra se poderão tomar como referência os valores da força de rotura, da baridade e da porosidade, quando determinadas para as mesmas condições.

5.3.2- Estudo realizado no NPR do LNEC

Foi aplicada a metodologia descrita em 5.3.1, embora utilizando séries de três provetes, e adoptando valores determinados experimentalmente para a baridade máxima teórica das misturas. No QUADRO 19 e na FIGURA 9 mostram-se os resultados obtidos neste estudo Marshall.

QUADRO 19 - MAM PARA CAMADA DE BASE - RESULTADOS DO ESTUDO MARSHALL (LNEC)

Mistura n°	Pb %	Bt g/cm3	Bm g/cm3	n %	VMA %	Sb %	Fr kgf	Def mm	Fr/Def kgf/mm
1	4,0	2,50	2,33	6,61	15,59	57,6	4132	2,1	2012,5
2	4,5	2,48	2,34	5,81	15,91	63,5	3539	2,6	1377,2
3	5,0	2,46	2,34	4,74	16,01	70,4	2868	3,5	811,0
4	5,5	2,45	2,35	4,08	16,51	75,3	2750	3,3	833,3
5	6,0	2,43	2,35	3,29	16,85	80,5	2550	6,1	418,0

Verifica-se que o andamento das curvas não é o que habitualmente acontece para as misturas tradicionais. Todavia, fazendo um raciocínio inverso, isto é, lendo os valores obtidos para as várias grandezas Marshall em função da percentagem de betume determinada anteriormente (5,2 %), verifica-se que embora existam diferenças estas não são muito significativas (QUADRO 20 e FIGURA 10).

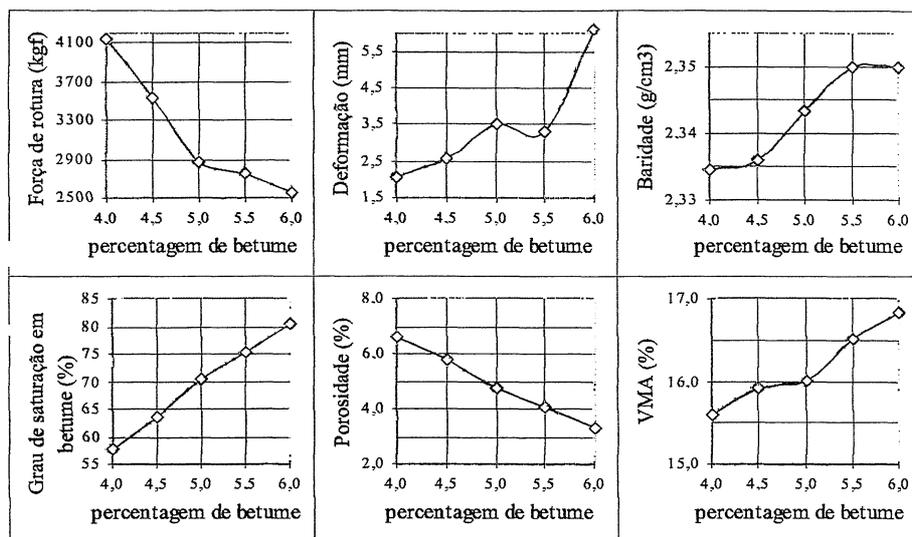


FIGURA 9 - MAM PARA CAMADA DE BASE - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ESTUDO MARSHALL (LNEC)

QUADRO 20- ESTUDO MARSHALL: COMPARAÇÃO DOS ESTUDOS LPAV E LNEC PARA $p_b=5,2\%$

Característica	Força de rotura (kN)	Deformação (mm)	Porosidade (%)	Grau de saturação em betume (%)	VMA (%)	Força/Deformação (kN/mm)
LPAV	23	4,1	2,0	86	14,3	5,6
LNEC	28	3,3	4,5	72	16,2	8,5

As diferenças mais significativas são referentes a grandezas volumétricas, podendo ser explicadas pelo facto de o método utilizado na medição da baridade das misturas não ser exactamente o mesmo.

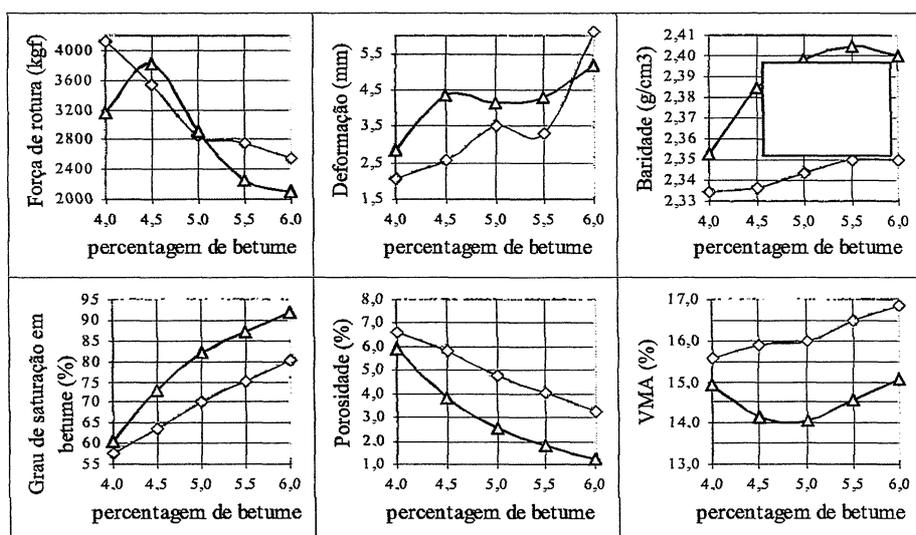


FIGURA 10 - COMPARAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ESTUDOS MARSHALL LPAV E LNEC

5.4- Ensaio com *Wheel Tracking*

Como complemento do estudo Marshall, realizaram-se ensaios com *wheel tracking* com o objectivo de aproximadamente verificar se para um valor superior a 5,5 % de percentagem de betume a mistura apresentaria um comportamento inadequado face à deformação permanente. Assim, fabricaram-se três provetes com 6 % de betume para os quais se mediu a baridade e se realizaram ensaios com *wheel tracking*.

De acordo com as recomendações da *D.G. de Carreteras* espanhola, o comportamento de uma mistura betuminosa à deformação permanente pode ser avaliado através da medição da velocidade de deformação daquela num ensaio de *wheel tracking*, à temperatura de 60°C, em função do tráfego previsto e da zona climática em que se pretende aplicar essa mistura.

Com base nos princípios referidos, foram estabelecidos critérios limites para avaliar o comportamento das misturas betuminosas face àquele mecanismo de degradação que se traduzem no QUADRO 21.

QUADRO 21- VALORES MÁXIMOS DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO, 10^{-3} mm/min (D.G. CARRETERAS)

Classe de tráfego pesado	Zona Térmica Estival		
	Quente	Média	Temperada
T0, T1	15	15	20
T2	15	20	20
T3	20	20	---
T4	20	---	---

A EN 14 é um itinerário muito carregado, com elevado número de pesados e com elevadas cargas por eixo, muito provavelmente com um tráfego da classe T0. Relativamente às zonas climáticas, embora no QUADRO 21 se refiram as definidas para Espanha, pensa-se que será razoável considerar a zona norte do distrito do Porto (localização da EN14) como zona média. Resulta do exposto que uma mistura betuminosa a colocar em tais condições de serviço não deverá apresentar, de acordo com os critérios referidos, uma velocidade de deformação superior a 15×10^{-3} mm/min num ensaio de *wheel tracking* realizado a 60 °C.

O ensaio decorre durante 120 minutos e a deformação vertical da laje de mistura betuminosa é registada ao longo tempo. A velocidade de deformação a considerar é o valor ocorrido no intervalo

de tempo 105-120 minutos. Os valores medidos para os três provetes ensaiados, nos intervalos de tempo geralmente considerados em Espanha, são os que constam do QUADRO 22.

QUADRO 22- *WHEEL TRACKING*: VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA

Intervalo de Tempo (min)	Velocidade de Deformação (10^{-3} mm/min)		
	Provete nº 1	Provete nº 2	Provete nº 3
30-45	36	26,7	13,3
75-90	28,7	18,7	9,3
105-120	29,3	14	9,3
Valor a Verificar	29	14	9

O valor médio medido para os três provetes é de $17,3 \times 10^{-3}$ mm/min. Dado o reduzido número de provetes ensaiados não é possível concluir com certeza se 6 % de betume será ou não uma percentagem de ligante potencialmente inadequada face ao mecanismo da deformação permanente. Como é sabido, as misturas muito ricas em betume tendem a resistir mal àquele tipo de fenómeno. Contudo, dado o tipo de betume empregue no fabrico de MAM, estas apresentam habitualmente um excelente comportamento à deformação permanente, apesar da elevada quantidade de betume incorporada.

Dois dos provetes ensaiados (provete nº2 e provete nº 3) conduziram a resultados satisfatórios para qualquer das situações previstas em Espanha (QUADRO 21). Já o provete nº1 apresentou um comportamento manifestamente pior. Por essa razão, o valor médio faz supor que uma MAM fabricada com a mistura de agregados seleccionada (FRN4) e com uma percentagem de betume 10/20 de 6 % seria inadequada. Apenas análises mais extensas, após a realização dos trechos experimentais, poderão levar a conclusões mais definitivas.

6. TEMPERATURAS DE MISTURA E COMPACTAÇÃO A ADOPTAR

O CAEJAE98 indica como intervalos de variação de viscosidade cinemática do betume para a mistura e compactação, respectivamente 150 - 190 cSt e 250 - 310 cSt. Estes critérios são um pouco diferentes dos indicados pela *SHELL* que indica um valor de 0,2 Pa.s para a viscosidade cinemática do betume durante a mistura e um intervalo de 2 Pa.s a 20 Pa.s para a viscosidade cinemática de compactação.

Considerando os critérios propostos pelo CEJAE98 e admitindo que o betume seleccionado é representado por uma linha recta no *Bitumen Test Data Chart*, chega-se a valores de temperaturas

de mistura entre 157 °C e 162 °C. Para as temperaturas de compactação obtiveram-se pela mesma metodologia valores entre 114 °C e 117 °C. A aplicação dos critérios da *SHELL* conduz a uma temperatura de 156 °C para a mistura e a valores entre 95 °C e 120 °C para a compactação.

A experiência estrangeira tem mostrado que a aplicação de MAM deve ser feita a temperaturas relativamente altas. Assim, por exemplo, a *COMPOSAN* sugere a utilização de temperaturas entre 160 °C e 180 °C para a mistura, no caso de se utilizarem centrais descontínuas, o que é o caso. Indica como temperaturas de espalhamento valores entre 145 °C e 165 °C. Ainda de acordo com aquele fabricante de betumes a temperatura de entrada dos compactadores não deve ser inferior a 140 °C. Esta última indicação é corroborada pela norma francesa NF P 98-140.

Analisando os valores obtidos anteriormente, sugere-se a aplicação dos critérios propostos pela *COMPOSAN*.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Face aos resultados que foi possível obter, pensa-se que a realização de trechos experimentais deve incluir a aplicação da mistura de agregados FRN4. As percentagens de betume a testar deverão ser 5,0 %, 5,5 % e 6,0 %.

As composições indicadas devem ser testadas para os meios de compactação disponíveis, sugerindo-se a utilização alternativa de cilindros vibradores e de pneus de modo seleccionar aquele que venha a mostrar-se mais adequado.

Como complemento, sugere-se o estudo da mistura FRN5 em trecho experimental de modo a tirar conclusões sobre a eventual necessidade de ajustes no CEJAE98 relativas à aplicação de misturas de alto módulo de deformabilidade para camada de base.



Eng.º Silvino Dias Capitão
Doutorando do DEC da FCTUC
Prof. Adjunto do ISEC / IPC



Prof. Doutor Luís Picado Santos
Prof. Auxiliar do DEC da FCTUC
Coordenador do LPAV



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

LABORATÓRIO DE URBANISMO, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO
E TRANSPORTES

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105

Características Marshall e Resistência Conservada da
Mistura Betuminosa de Alto Módulo

2º RELATÓRIO INTERNO

SILVINO DIAS CAPITÃO

LUÍS PICADO-SANTOS

COIMBRA, Junho de 1999

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105

2º RELATÓRIO INTERNO

CARACTERÍSTICAS MARSHALL E RESISTÊNCIA CONSERVADA DA MISTURA BETUMINOSA DE ALTO MÓDULO

Sumário

Este relatório apresenta os resultados dos ensaios de compressão Marshall, resistência conservada e determinação de baridades realizados sobre 36 provetes produzidos com as misturas de alto módulo (agregados graníticos e betume 10/20) aplicadas na realização do trecho experimental da EN14. Fabricaram-se 6 provetes por cada situação a estudar: 2 misturas de agregados (A e B) x 3 percentagens de betume (teoricamente 4,8 %, 5,3 % e 5,8 %). A mistura de agregados A incorporou 2 % de filer comercial, enquanto que na mistura B foi usada uma percentagem de 5 % de filer comercial. Utilizou-se um betume 10/20 a que foi junto um aditivo, o qual parece ter resolvido as dificuldades de adesividade inicialmente verificadas. Comparam-se os resultados obtidos com alguns valores de referência. Contudo, os resultados dos ensaios indiciam alguma falta de qualidade dos provetes produzidos, pelo que se propõem alguns caminhos a seguir de modo a poder tirar conclusões mais definitivas.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. MISTURAS UTILIZADAS	1
3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA CONSERVADA	3
3.1. BARIDADES	3
3.2. ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO MARSHALL.....	4
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	6
4.1. RESISTÊNCIA CONSERVADA	6
4.2. BARIDADE	6
4.3. ESTABILIDADE MARSHALL	8
4.4. DEFORMAÇÃO MARSHALL	9
5. CONCLUSÕES.....	10

Índice de Quadros

QUADRO 1 - MISTURA A: BARIDADES (kg/m^3)	3
QUADRO 2 - MISTURA B: BARIDADES (kg/m^3)	3
QUADRO 3 - MISTURA A: BARIDADES (kg/m^3) E GRUPOS DE PROJETOS CONSIDERADOS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA CONSERVADA	4
QUADRO 4 - MISTURA B: BARIDADES (kg/m^3) E GRUPOS DE PROJETOS CONSIDERADOS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA CONSERVADA	4
QUADRO 5 - MISTURA A: ESTABILIDADE MARSHALL (N)	4
QUADRO 6 - MISTURA B: ESTABILIDADE MARSHALL (N)	5
QUADRO 7 - MISTURA A: ESTABILIDADE MARSHALL APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO (N)	5
QUADRO 8 - MISTURA B: ESTABILIDADE MARSHALL APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO (N)	5
QUADRO 9 - ESTABILIDADE MARSHALL E RESISTÊNCIA CONSERVADA (N)	5
QUADRO 10 - DEFORMAÇÃO MARSHALL (mm)	6
QUADRO 11 - ESTABILIDADE MARSHALL: PERCENTAGEM DO VALOR DE REFERÊNCIA DO CEJAE98	8
QUADRO 12 - TRECHO B4: ESTABILIDADE MARSHALL (N)	8

Índice de Figuras

FIGURA 1 - MASSA DOS PROVETES SUBMETIDOS A ENSAIO	7
FIGURA 2 - ALTURA DOS PROVETES SUBMETIDOS A ENSAIO	7

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105

2º RELATÓRIO INTERNO

CARACTERÍSTICAS MARSHALL E RESISTÊNCIA CONSERVADA DA MISTURA BETUMINOSA DE ALTO MÓDULO

1. INTRODUÇÃO

O trecho experimental realizado no âmbito da empreitada de beneficiação da Estrada Nacional 14 consistiu na aplicação de misturas betuminosas de alto módulo, as quais consistiram na utilização de duas misturas de agregados (mistura A e mistura B). Para cada uma das misturas de agregados aplicadas foram usadas três percentagens de betume (10/20) diferentes, perfazendo um total de seis misturas betuminosas (A1, A2, A3, B4, B5 e B6). Tinha-se como objectivo que aquelas percentagens tivessem, relativamente à massa total de mistura, os seguintes valores: A1 e B4: 4,8 %; A2 e B5: 5,3 % e A3 e B6: 5,8 %. De acordo com os resultados entretanto obtidos pelo empreiteiro e pela JAE, parece ter havido desvios significativos nas percentagens de betume efectivamente utilizadas em relação às desejadas. Assim, é conveniente uma nova determinação das quantidades de betume efectivamente utilizadas nos vários sub-trechos realizados.

Este relatório refere-se apenas aos ensaios de compressão de Marshall e aos ensaios de resistência conservada realizados sobre provetes fabricados na obra com cada uma das misturas efectivamente aplicadas. Os principais objectivos foram a verificação das condições de adesividade do agregado granítico-ligante e a averiguação da estabilidade e da deformação Marshall, de modo a comparar os valores obtidos com os indicados no Caderno de Encargos-Tipo da JAE 1998 (CEJAE98). Por essa razão, não se faz qualquer referência a outros aspectos a estudar no âmbito da realização do trecho experimental, os quais serão avaliados mais tarde.

2. MISTURAS UTILIZADAS

Em qualquer das misturas utilizou-se um betume CEPESA 10/20 com um aditivo constituído por 2 ‰ (relativamente à massa de betume) de POLYRAM 200, de modo a melhorar a adesividade agregado-ligante.

A mistura de agregados designada por A consistiu na utilização das seguintes percentagens (em relação à massa total de agregado seco) das fracções granulométricas disponíveis:

- fracção 14/20 mm: 25 %
- fracção 10/14 mm: 8 %
- fracção 6/10 mm: 16 %
- fracção 0/6 mm: 49 %
- filer comercial: 2 %.

A mistura de agregados designada por B consistiu na utilização das seguintes percentagens (em relação à massa total de agregado seco) das fracções granulométricas disponíveis:

- fracção 14/20 mm: 25 %
- fracção 10/14 mm: 8 %
- fracção 6/10 mm: 16 %
- fracção 0/6 mm: 46 %
- filer comercial: 5 %

Nenhuma das misturas acima corresponde àquela que foi estudada em laboratório pelo método de Marshall. No entanto, após a fase de transposição para a central da composição estudada em laboratório, acompanhada pela Fiscalização, verificou-se que as curvas granulométricas das mistura A e B são iguais à previamente estudada.

A mistura A é uma variante da mistura B na qual se pretendeu incorporar uma maior percentagem de filer granítico recuperado em detrimento da quantidade de filer comercial. Tinha-se como objectivo diminuir a quantidade de finos rejeitados pela central durante o fabrico das misturas betuminosas. Assim, a mistura A difere da B porquanto se substituíram 3 % de filer comercial por igual percentagem da fracção 0/6 mm, tendo-se incorporado apenas 2 % de filer comercial.

3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA CONSERVADA

3.1. Baridades

Na realização dos ensaios de resistência conservada utilizou-se uma variante do procedimento proposto pela norma ASTM D 1075, segundo o qual cada grupo de provetes a ensaiar (no mínimo 6) deve ser dividido em dois grupos de três provetes cada um, de tal modo que a média das baridades dos provetes do grupo 1 seja idêntica à média das baridades dos provetes do grupo 2. As amostras do primeiro conjunto são ensaiadas à compressão Marshall de acordo com o procedimento corrente (isto é, após imersão em água a 60 °C durante 40 minutos). As amostras do segundo grupo são submetidas a ensaio nas mesmas condições, mas após um tempo de imersão de 24 horas em água a 60 °C.

As baridades dos provetes (LNEC E 267) determinadas são as indicadas nos QUADROS 1 e 2. Os grupos de amostras construídos como se indicou são os indicados nos QUADROS 3 e 4.

QUADRO 1 - MISTURA A: BARIDADES (kg/m³)

Provete	Trecho A1	Provete	Trecho A2	Provete	Trecho A3
1	2378	7	2381	13	2396
2	2381	8	2405	14	2399
3	2386	9	2377	15	2391
4	2363	10	2371	16	2403
5	2386	11	239	17	2395
6	2394	12	2404	18	2379
<i>Média</i>	<i>2381</i>	<i>Média</i>	<i>2388</i>	<i>Média</i>	<i>2394</i>

QUADRO 2 - MISTURA B: BARIDADES (kg/m³)

Provete	Trecho B4	Provete	Trecho B5	Provete	Trecho B6
19	2375	25	2349	31	2334
20	2340	26	2378	32	2376
21	2322	27	2331	33	2345
22	2328	28	2371	34	2378
23	2366	29	2320	35	2373
24	2341	30	2322	36	2354
<i>Média</i>	<i>2345</i>	<i>Média</i>	<i>2345</i>	<i>Média</i>	<i>2360</i>

QUADRO 3 - MISTURA A: BARIDADES (kg/m^3) E GRUPOS DE PROVETES CONSIDERADOS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA CONSERVADA

Provete	Trecho A1	Provete	Trecho A2	Provete	Trecho A3
1	2378	7	2381	13	2396
2	2381	8	2405	15	2391
3	2386	9	2377	17	2395
<i>Média</i>	2382	<i>Média</i>	2388	<i>Média</i>	2394
4	2363	10	2371	14	2399
5	2386	11	239	16	2403
6	2394	12	2404	18	2379
<i>Média</i>	2381	<i>Média</i>	2388	<i>Média</i>	2394

QUADRO 4 - MISTURA B: BARIDADES (kg/m^3) E GRUPOS DE PROVETES CONSIDERADOS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA CONSERVADA

Provete	Trecho B4	Provete	Trecho B5	Provete	Trecho B6
19	2375	25	2349	33	2345
20	2340	28	2371	34	2378
21	2322	29	2320	36	2354
<i>Média</i>	2346	<i>Média</i>	2347	<i>Média</i>	2359
22	2328	26	2378	31	2334
23	2366	27	2331	32	2376
24	2341	30	2322	35	2373
<i>Média</i>	2345	<i>Média</i>	2344	<i>Média</i>	2361

3.2. Estabilidade e Deformação Marshall

Os ensaios de compressão Marshall consistiram na determinação da estabilidade e da deformação, a 60 °C, de séries de três provetes (ASTM D 1559) e ainda, como se referiu, após um período de imersão em água a 60 °C durante 24 horas de modo a determinar também a “resistência conservada” das várias misturas. Os valores das estabilidade Marshall medidos são os indicados nos QUADROS 5 e 6, respectivamente para a mistura A e B.

QUADRO 5 - MISTURA A: ESTABILIDADE MARSHALL (N)

Provete	Trecho A1	Provete	Trecho A2	Provete	Trecho A3
1	19860	7	18902	13	20563
2	19375	8	19355	15	14972
3	22016	9	16930	17	18447
<i>Média</i>	20417,0	<i>Média</i>	18395,4	<i>Média</i>	17993,9

QUADRO 6 - MISTURA B: ESTABILIDADE MARSHALL (N)

Provete	Trecho B4	Provete	Trecho B5	Provete	Trecho B6
19	17134	25	11334	33	10507
20	11976	28	13182	34	9496
21	10020	29	10398	36	10682
Média	13043,1	Média	11637,7	Média	10228,6

Após um tempo de imersão de 24 horas os valores da estabilidade Marshall obtidos foram os apresentados nos QUADROS 7 e 8.

QUADRO 7 - MISTURA A: ESTABILIDADE MARSHALL APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO (N)

Provete	Trecho A1	Provete	Trecho A2	Provete	Trecho A3
4	20563	10	15090	14	17885
5	19429	11	15553	16	19277
6	21353	12	19573	18	18385
Média	20448,4	Média	16738,9	Média	18515,5

QUADRO 8 - MISTURA B: ESTABILIDADE MARSHALL APÓS 24 HORAS DE IMERSÃO (N)

Provete	Trecho B4	Provete	Trecho B5	Provete	Trecho B6
22	10463	26	14063	31	10799
23	11868	27	10938	32	12519
24	10946	30	9496	35	12427
Média	11092,3	Média	11499,2	Média	11915,0

A resistência conservada é determinada, para cada uma das misturas estudadas, pela relação entre os valores da estabilidade Marshall medidos após imersão em água durante 24 horas e os determinados nas condições correntes (imersão durante 40 minutos). No QUADRO 9 apresentam-se os valores obtidos para a estabilidade e para a resistência conservada das misturas estudadas.

QUADRO 9 - ESTABILIDADE MARSHALL E RESISTÊNCIA CONSERVADA (N)

Característica	Trecho A1	Trecho A2	Trecho A3	Trecho B4	Trecho B5	Trecho B6
Est. com Imersão	20448,4	16738,9	18515,5	11092,3	11499,2	11915,0
Estabilidade	20417,0	18395,4	17993,9	13043,1	11637,7	10228,6
Resistência Conservada	100,2 %	91,0 %	102,9 %	85,0 %	98,8 %	116,5 %

De referir que o CEJAE98 exige uma resistência conservada mínima de 70 % para misturas de alto módulo de deformabilidade em camada de base. Como se pode observar no Quadro 9, todas as misturas testadas cumprem o limite mínimo especificado.

Como se referiu, as deformações sofridas pelos provetes durante os ensaios de compressão Marshall foram também medidas. Nos QUADROS 10 e 11 resumem-se os resultados obtidos para cada uma das situações estudadas (média de três provetes).

QUADRO 10 - DEFORMAÇÃO MARSHALL (mm)

Característica	Trecho A1	Trecho A2	Trecho A3	Trecho B4	Trecho B5	Trecho B6
Deformação c/ Imersão	3,9	4,5	5,2	3,8	4,4	5,2
Deformação	3,7	4,5	6,0	4,4	5,3	4,3

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Resistência Conservada

Como se viu acima, qualquer das misturas apresentou valores da resistência conservada superiores ao indicado no CEJAE98. Assim, tudo indica que a adesividade agregado-ligante foi melhorada com a aditivação do betume com POLYRAM 200, não constituindo assim um problema que possa afectar a qualidade das misturas betuminosas a aplicar em obra.

4.2. Baridade

Os valores da baridade obtidos para os 36 provetes submetidos a ensaio apresentam alguma variabilidade em torno do valor médio, como aliás se pode observar nos QUADROS 1 e 2. Esse facto pode indiciar falta de uniformidade no procedimento de fabrico dos provetes na obra. Aliás, as amostras tinham massas significativamente diferentes entre si e, por vezes, apresentavam desvios importantes face ao valor teórico de 1200 g. Também a altura dos provetes apresentava uma variação assinalável. Nas FIGURAS 1 e 2 representam-se graficamente as massas e as alturas dos provetes ensaiados.

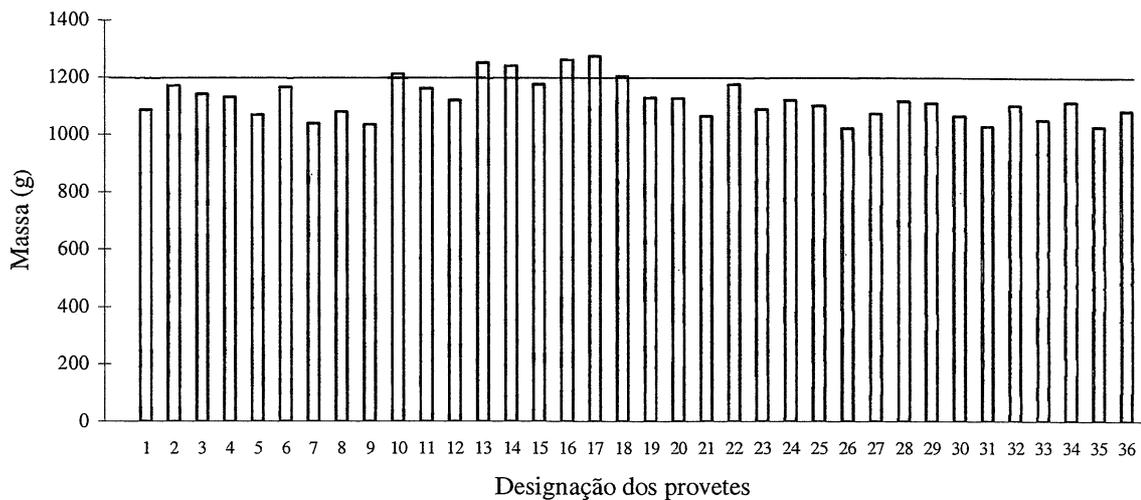


FIGURA 1 - MASSA DOS PROVETES SUBMETIDOS A ENSAIO

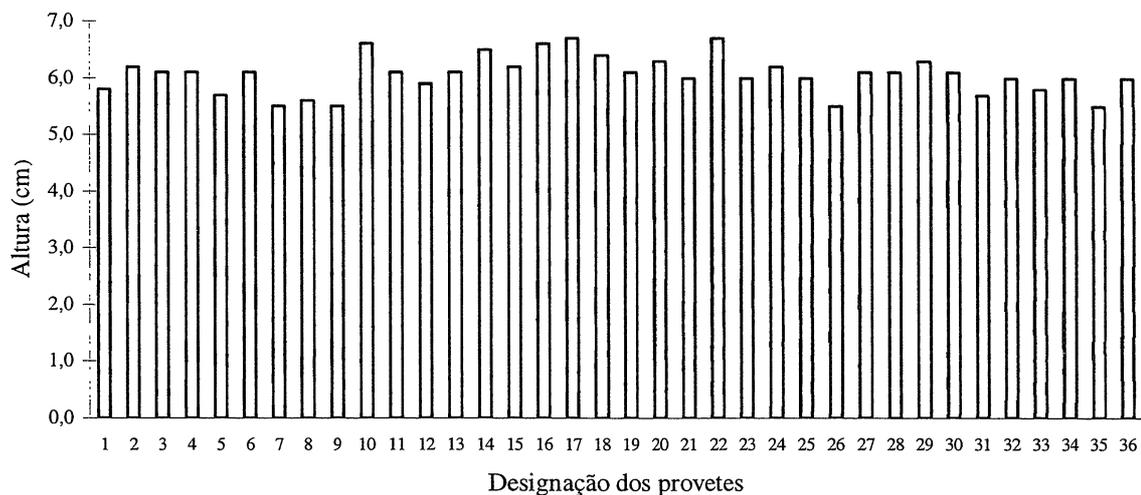


FIGURA 2 - ALTURA DOS PROVETES SUBMETIDOS A ENSAIO

Em termos gerais, os provetes das misturas A e B apresentaram baridades médias da ordem de 2390 kg/m³ e 2350 kg/m³, respectivamente, o que significa que os provetes da mistura A são, em média, um pouco mais compactos que os da mistura B. Contudo, verifica-se que os valores obtidos para as baridades da mistura B são sistematicamente inferiores (da ordem de 97 %) aos obtidos para a mesma mistura no estudo Marshall previamente realizado em laboratório. Todavia, as baridades determinadas para os provetes da mistura B são semelhantes em média às obtidas para três provetes produzidos em laboratório com mistura B (trecho B4) recolhida aquando da execução do trecho experimental.

Parece assim evidente haver necessidade de verificar se a curva granulométrica resultante da mistura de agregados B traduz adequadamente aquela que se pretendeu produzir.

4.3. Estabilidade Marshall

Em termos indicativos pode tomar-se como referência o valor mínimo de estabilidade Marshall proposto no CEJAE98 que é de 16000 N. Por análise dos resultados que constam dos QUADROS 5 e 6, verifica-se que a mistura A apresenta estabilidades superiores ao mínimo indicado. Já a mistura B tem estabilidades sistematicamente inferiores ao valor mínimo de 16000 N. No QUADRO 11 são indicados os valores da relação entre as estabilidades medidas e o valor de referência.

QUADRO 11 - ESTABILIDADE MARSHALL: PERCENTAGEM DO VALOR DE REFERÊNCIA DO CEJAE98

Trecho A1	Trecho A2	Trecho A3	Trecho B4	Trecho B5	Trecho B6
127,6	115,0	115,0	81,5	72,7	63,9

Como se verifica por observação do QUADRO 11, os provetes da mistura B apresentam valores de estabilidade consideravelmente inferiores ao limiar mínimo proposto no CEJAE98. Isto significa que, à luz do CEJAE98 aquela mistura não é adequada como mistura de alto módulo de deformabilidade. No entanto, também se verificou que os valores da estabilidade obtidos no estudo Marshall previamente realizado em laboratório com a mistura B são muito superiores (da ordem de 240 % a 300 %) aos agora encontrados.

Além disso, fabricaram-se três provetes em laboratório com mistura recolhida durante a execução do trecho B4, as quais tinham estabilidades significativamente superiores às obtidas para os provetes da mesma mistura produzidos em obra, como se pode verificar por análise do QUADRO 12.

QUADRO 12 - TRECHO B4: ESTABILIDADE MARSHALL (N)

Provetes de Obra		Provetes de Laboratório	
Provete	Trecho B4	Provete	Trecho B4
19	17134	1	20805
20	11976	2	21482
21	10020	3	19120
<i>Média</i>	<i>13043,1</i>	<i>Média</i>	<i>20469,3</i>

Assim, no caso da mistura B, parece existir diferença significativa entre os provetes produzidos na obra com aquela mistura e os previamente fabricados em laboratório. Face aos resultados obtidos, afiguram-se plausíveis os seguintes comentários relativamente à mistura B:

- A curva granulométrica usada no trecho experimental poderá não traduzir a curva previamente estabelecida em laboratório (deficiente transposição para a central);
- As percentagens de betume incorporadas nas misturas poderão ter desvios significativos em relação aos valores objectivo;
- As condições de produção dos provetes em obra poderão não ter sido convenientemente controladas (por exemplo o número de pancadas).

Pelo que se referiu, parece haver a necessidade de averiguar o que está na origem das diferenças significativas encontradas entre os provetes produzidos na obra e os fabricados em laboratório.

4.4. Deformação Marshall

Relativamente aos valores da deformação Marshall, impõe-se um comentário prévio. De facto, a deformação que se pretende medir é aquela que corresponde ao momento da rotura. Como se sabe, os ensaios são conduzidos a uma temperatura de 60 °C, a qual é um pouco inferior ao ponto de amolecimento do betume 10/20 (da ordem de 64 °C).

Assim, o instante da rotura dos provetes fabricados com misturas de alto módulo é um pouco mais difícil de determinar que para as misturas correntes, porquanto é habitual verificar-se um brusco abrandamento do crescimento da força antes da ruína completa do provete. Pensa-se que este comportamento se deve ao facto de o betume não ter atingido o seu ponto de amolecimento. Por essa razão, o instante da rotura fica assim mal definido por não se saber se ela ocorre quando se dá a súbita variação da taxa de crescimento da força, ou quando a agulha do deflectómetro inverte o seu sentido de rotação.

Como indicação, refira-se que as deformações medidas no estudo Marshall previamente realizado foram da ordem de 4,5 mm. Como consequência do comportamento atrás descrito pode admitir-se que as deformações geralmente medidas são relativamente mais elevadas do que aquelas que na realidade traduzem o ponto de rotura. De facto, para valores de estabilidade sensivelmente iguais,

podem obter-se variações de deformação superiores a 0,5 mm. Por tudo isto pode dizer-se que as deformações encontradas (QUADRO 10) cumprem o que o CEJAE98 propõe como máximo para a deformação Marshall deste tipo de misturas, ou seja o valor de 4 mm.

5. CONCLUSÕES

Face aos resultados obtidos, a mistura A parece satisfazer as condições de adesividade pretendidas. As características Marshall, nomeadamente a estabilidade e a baridade encontram-se dentro de níveis tidos como adequados para o fim em vista. Contudo, dada a falta de certeza quanto às quantidades de betume efectivamente utilizadas em cada uma das misturas parece imprescindível a verificação desses valores. Além disso, de modo a ter maior certeza sobre os resultados agora encontrados, seria útil realizar ensaios idênticos sobre carotes extraídas do pavimento.

Relativamente à mistura B, dadas as diferenças encontradas face ao estudo Marshall previamente realizado e ainda relativamente aos resultados proporcionados pelos provetes realizados com a mesma mistura colhida em obra, propõe-se uma verificação semelhante à indicada para a mistura A. Além disso, é fundamental verificar se a curva granulométrica utilizada corresponde realmente à inicialmente proposta.



Silvano Dias Capitão
Doutorando do DEC da FCTUC
Prof. Adjunto do ISEC / IPC



Luís Picado Santos
Prof. Auxiliar do DEC da FCTUC
Responsável do LPAV



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

LABORATÓRIO DE URBANISMO, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO
E TRANSPORTES

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105

Determinação das Percentagens de Betume

Usadas nas Misturas Betuminosas de Alto Módulo Aplicadas nos Trechos Experimentais

3º RELATÓRIO INTERNO

SILVINO DIAS CAPITÃO

LUÍS PICADO-SANTOS

COIMBRA, Setembro de 1999

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105

3º RELATÓRIO INTERNO

DETERMINAÇÃO DAS PERCENTAGENS DE BETUME USADAS NAS MISTURAS BETUMINOSAS DE ALTO MÓDULO APLICADAS NOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

Sumário

Este relatório apresenta os resultados dos ensaios de determinação da percentagem de betume relativos às misturas de alto módulo de deformabilidade aplicadas no trecho experimental realizado na EN14. Os ensaios foram realizados sobre provetes do tipo Marshall produzidos na obra a partir da mistura produzida em central. A determinação das percentagens de betume das misturas foi obtida sobre séries de, pelo menos, três provetes cada uma. Para isso, usaram-se dois métodos de ensaio diferentes, nomeadamente “centrifugação com correcção de cinzas” (método A da norma ASTM D 2172) e “método de incineração”. Para cada um dos métodos, apresentam-se os resultados obtidos, analisa-se a sua dispersão e examinam-se os desvios dos resultados face aos valores-alvo. Além disso, comparam-se os valores obtidos pelos dois métodos e indicam-se algumas conclusões a que foi possível chegar.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. MÉTODO DE CENTRIFUGAÇÃO	1
2.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	1
2.2 RESULTADOS.....	2
3. MÉTODO DE INCINERAÇÃO.....	4
3.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	4
3.2 RESULTADOS.....	6
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	7
5. CONCLUSÕES.....	9
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	9

Índice de Quadros

QUADRO 1 - TRECHOS A: % BETUME DETERMINADO POR CENTRIFUGAÇÃO	3
QUADRO 2 - TRECHOS B: % BETUME DETERMINADO POR CENTRIFUGAÇÃO	3
QUADRO 3 - TRECHOS A: % BETUME DETERMINADO POR INCINERAÇÃO	6
QUADRO 4 - TRECHOS B: % BETUME DETERMINADO POR INCINERAÇÃO	6
QUADRO 5 - TRECHOS A E B: % BETUME DETERMINADO POR CENTRIFUGAÇÃO E POR INCINERAÇÃO	8

Índice de Figuras

FIGURA 1 - TRECHOS A: % DE BETUME DE CADA UM DOS PROVETES E SUA MÉDIA, E VALORES-ALVO.....	4
FIGURA 2 - TRECHOS B: % DE BETUME DE CADA UM DOS PROVETES E SUA MÉDIA, E VALORES-ALVO.....	4
FIGURA 3 - TRECHOS A: % DE BETUME DE CADA UM DOS PROVETES E SUA MÉDIA, E VALORES-ALVO.....	7
FIGURA 4 - TRECHOS B: % DE BETUME DE CADA UM DOS PROVETES E SUA MÉDIA, E VALORES-ALVO.....	7
FIGURA 5 - VALORES-ALVO E PERCENTAGEM MÉDIA DE BETUME (CENTRIFUGAÇÃO E INCINERAÇÃO)	8

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105
3º RELATÓRIO INTERNO

**DETERMINAÇÃO DAS PERCENTAGENS DE BETUME USADAS NAS MISTURAS
BETUMINOSAS DE ALTO MÓDULO APLICADAS NOS TRECHOS EXPERIMENTAIS**

1. INTRODUÇÃO

O trecho experimental realizado no âmbito da empreitada de beneficiação da Estrada Nacional 14 consistiu na aplicação de misturas betuminosas de alto módulo, nas quais se utilizaram duas misturas de agregados (mistura A e mistura B). Para cada uma das misturas de agregados aplicadas foram usadas três percentagens de betume (10/20) diferentes, perfazendo um total de seis misturas betuminosas (A1, A2, A3, B4, B5 e B6), com as quais se produziram provetes Marshall com 75 pancadas em cada extremidade. Tinha-se como objectivo que aquelas percentagens tivessem, relativamente à massa total de mistura, os seguintes valores: A1 e B4: 4,8 %; A2 e B5: 5,3 % e A3 e B6: 5,8 %. De acordo com informações prestadas pela JAE verificaram-se, em ensaios realizados, desvios significativos nas percentagens de betume efectivamente utilizadas em relação às desejadas. Foi assim considerado desejável determinar de novo as quantidades de betume utilizadas nos vários trechos realizados. Utilizou-se para tal o método de “centrifugação com correcção de cinzas” (método A da norma ASTM D 2172) e o “método de incineração”.

2. MÉTODO DE CENTRIFUGAÇÃO

2.1 Descrição da Metodologia

A metodologia seguida corresponde à proposta na Norma ASTM D 2172, incluindo o procedimento de determinação da quantidade de cinzas carbonatadas do extracto betuminoso.

Os provetes são aquecidos em estufa a 110 °C, sendo posteriormente desagregados manualmente e mantidos àquela temperatura até peso constante. Depois a amostra é totalmente coberta com solvente (usou-se tolueno) dentro da taça do aparelho de centrifugação, na qual é aplicado um filtro sob a tampa para retenção de finos durante o seu movimento de rotação. Após um período de espera (inferior a 1 hora) realizam-se várias centrifugações, adicionando-se sucessivamente 200 ml de

solvente. Este processo termina quando o líquido extraído apresenta uma cor clara (“cor de palha”). O agregado e o filtro são secos em estufa, a 110°C, até peso constante. A massa de agregado corresponde ao conteúdo da taça e ao acréscimo da massa do papel de filtro.

O método tradicional de determinação da percentagem de betume de uma mistura betuminosa por centrifugação inclui apenas o procedimento que acabou de se descrever. Nesse caso, considera-se que a quantidade de betume é a perda de massa da amostra desde o instante inicial (amostra seca a peso constante) até ao instante final (amostra de agregado seco e acréscimo da massa do filtro a peso constante). Verifica-se, contudo, que tende a ocorrer uma passagem significativa de material agregado fino para o extracto betuminoso recolhido (betume + solvente + finos). No caso presente, a diferença entre a percentagem de betume determinada antes da “correção de cinzas” e a determinada após aquela correção variou entre 1,2 % e 1,9 %, o que mostra bem a necessidade de se realizar o procedimento complementar.

A determinação da quantidade de cinzas faz-se através da recolha num cadinho de porcelana de 100 ml do extracto betuminoso extraído da centrifugação. Num primeiro passo, coloca-se aquele recipiente num banho de areia de modo a evaporar lentamente a fase líquida do extracto. Num segundo passo, o resíduo betuminoso sólido remanescente é levado a incinerar numa mufla a 500-600 °C. Após a incineração, o material é arrefecido em exsiccador, adicionando-se depois 5 ml de uma solução saturada de carbonato de amónio por cada grama de cinzas e deixa-se digerir 1 hora à temperatura ambiente. A massa de cinzas é a que se obtém após secagem em estufa, a 100°C, até massa constante, e posterior arrefecimento em exsiccador. O valor assim determinado é extrapolado para o total do volume do extracto recolhido, uma vez que a incineração é feita apenas sobre uma amostra de 100 ml desse extracto.

Note-se que, de acordo com a Norma ASTM D 2172 o acréscimo de peso do filtro é considerado agregado. De modo a confirmar a validade daquele pressuposto, procedeu-se à recolha, por escovagem, de parte do material retido no papel de filtro e levou-se a incinerar a 600 °C. Verificou-se não haver qualquer variação de massa, o que prova não haver betume retido no agregado que fica solidário com o papel de filtro usado na taça de centrifugação, ou seja, o acréscimo de massa do filtro é devido à aderência de parte do agregado ao papel.

2.2 Resultados

Como se referiu, as percentagens de betume foram determinadas sobre séries de três provetes para cada um dos trechos. Os resultados obtidos são os apresentados nos QUADROS 1 e 2.

Verifica-se que os valores obtidos são sistematicamente inferiores aos valores-alvo. No caso dos trechos A, as percentagens determinadas para a percentagem de betume foram inferiores em 0,06, 0,19 e 0,20 % relativamente ao valor pretendido. Em relação aos trechos B, aquele desvio foi inferior, variando de 0,03 a 0,19 %.

QUADRO 1 - TRECHOS A: % BETUME DETERMINADO POR CENTRIFUGAÇÃO

Trecho A1			Trecho A2			Trecho A3		
Provete	s/corr.	c/ corr.	Provete	s/corr.	c/ corr.	Provete	s/corr.	c/ corr.
1	6,1	4,45	7	6,4	5,00	13	6,8	5,73
4	6,7	4,83	10	6,0	4,91	14	6,8	4,99*
5	6,2	4,56	11	6,6	5,38	15	6,7	5,74
Média	6,33	4,61	Média	6,33	5,10	Média	6,77	5,74
Valor-Alvo		4,8	Valor-Alvo		5,3	Valor-Alvo		5,8
Diferença		- 0,19	Diferença		-0,20	Diferença		-0,06

* ensaio não considerado

QUADRO 2 - TRECHOS B: % BETUME DETERMINADO POR CENTRIFUGAÇÃO

Trecho B4			Trecho B5			Trecho B6		
Provete	s/corr.	c/ corr.	Provete	s/corr.	c/ corr.	Provete	s/corr.	c/ corr.
19	6,2	4,90	25	6,8	5,20	31	7,3	5,89
23	6,0	4,46	28	6,3	4,94	33	7,5	5,66
24	7,5	4,64	29	7,5	5,22	34	6,6	5,41
Média	6,56	4,77	Média	6,87	5,11	Média	7,13	5,65
Valor-Alvo		4,8	Valor-Alvo		5,3	Valor-Alvo		5,8
Diferença		- 0,03	Diferença		-0,19	Diferença		-0,15

Nas FIGURAS 1 e 2 representam-se graficamente, para cada um dos trechos experimentais, os valores determinados sobre cada um dos provetes bem como a sua média. Além disso, mostram-se ainda os valores-alvo da percentagem de betume para cada um dos trechos.

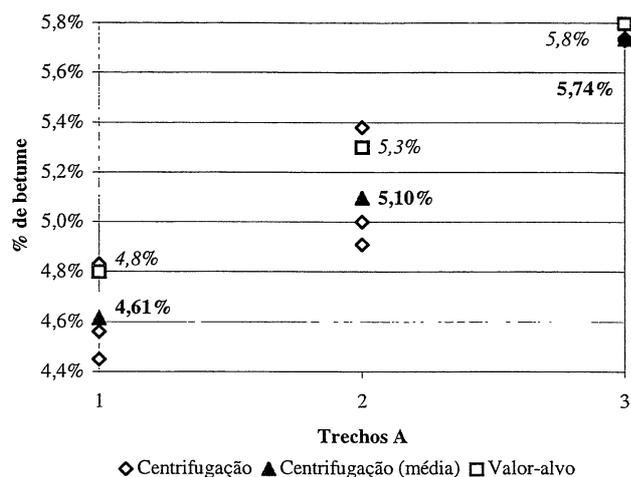


FIGURA 1 - TRECHOS A: % DE BETUME DE CADA UM DOS PROVETES E SUA MÉDIA, E VALORES-ALVO

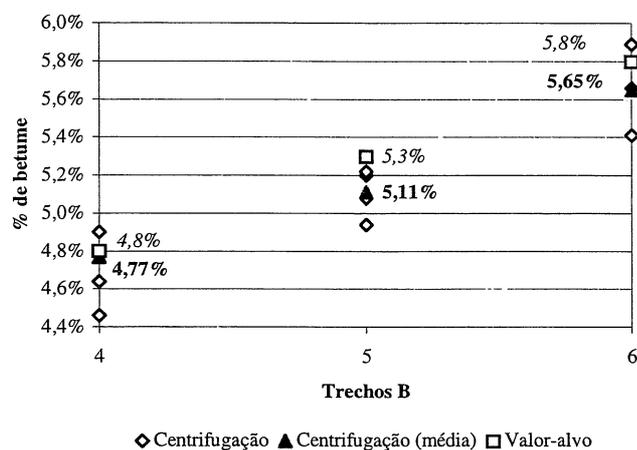


FIGURA 2 - TRECHOS B: % DE BETUME DE CADA UM DOS PROVETES E SUA MÉDIA, E VALORES-ALVO

3. MÉTODO DE INCINERAÇÃO

3.1 Descrição da Metodologia

Para a determinação da percentagem de betume das misturas betuminosas pelo método de incineração foi utilizada uma mufla *Gilson Modelo HM-378*. Não foi ainda estabelecida nenhuma norma de ensaio para a utilização deste tipo de equipamento. No entanto, tem sido seguido o procedimento que se descreve sumariamente a seguir.

No essencial, o procedimento consiste em submeter a uma temperatura de 538 °C a amostra de mistura cuja percentagem de betume se pretende determinar. A amostra é previamente aquecida em estufa à temperatura necessária para que possa ser desagregada com uma espátula (aprox. 110 °C).

Depois de desagregada, a amostra é mantida na estufa, a 110 °C, até peso constante de modo a evaporar toda a água que eventualmente esteja contida no material.

A mufla dispõe de um conjunto de tabuleiros que permite espalhar o material já desagregado de modo a facilitar a queima do ligante. Quando iniciado o ensaio, a amostra deve ser mantida à temperatura de 538 °C o tempo necessário à queima completa do ligante. No caso presente esse tempo foi de 30 minutos. Mesmo assim, no fim da incineração há sempre que ter o cuidado de averiguar se não existe ainda “carvão” no material que indique a presença de betume não queimado (visível como manchas negras no agregado).

À partida, pensar-se-ia que a perda de massa do material após incineração corresponderia à quantidade de betume queimada e, por isso, seria razoável tomar esse valor para determinar a percentagem de betume da mistura. Todavia, verifica-se que, para a gama de temperaturas usadas, ocorre também uma perda de massa no agregado. O valor dessa perda não é o mesmo para todos os materiais granulares, havendo que determiná-lo para cada caso. O procedimento que é habitual seguir consiste em incinerar, nas condições de ensaio usadas para a determinação da percentagem de betume, uma mistura de agregado seco idêntica à que constitui a mistura betuminosa. No caso presente foi esse o procedimento adoptado. Assim, submeteram-se às condições de ensaio (538 °C durante 30 minutos) provetes de agregado cuja composição era semelhante à usada nas misturas betuminosas.

Avaliou-se a perda de massa de agregado sobre amostras com, aproximadamente, 1200 g e 2400 g. Os factores de correcção médios assim determinados para os dois casos foram, respectivamente de 0,48 % e de 0,7 %.

A temperatura de 538 °C (1000 °F) tem sido considerada adequada para a generalidade dos agregados (Brown, E. e Mager, S., 1996) por corresponder a um equilíbrio razoável entre a perda de massa do agregado e a duração de ensaio. Por um lado, temperaturas de ensaio superiores a 538 °C aumentam bastante a perda de massa de agregado de alguns tipos de materiais granulares e, por outro lado, temperaturas mais baixas fazem aumentar muito o tempo de ensaio.

3.2 Resultados

Os resultados determinados para a percentagem de betume pelo método da incineração são os apresentados nos QUADROS 3 e 4.

QUADRO 3 - TRECHOS A: % BETUME DETERMINADO POR INCINERAÇÃO

Trecho A1			Trecho A2			Trecho A3		
Provete	s/corr.	c/ corr.	Provete	s/corr.	c/ corr.	Provete	s/corr.	c/ corr.
2, 3	5,19	4,74	8, 9	5,68	5,23	16, 17	6,12	5,67
6	5,67	5,01	12	5,99	5,33	18	6,58	5,92
Média	5,43	4,83	Média	5,84	5,26	Média	6,35	5,75
Valor-Alvo		4,8	Valor-Alvo		5,3	Valor-Alvo		5,8
Diferença		+0,03	Diferença		-0,04	Diferença		-0,05

Como se observa, os valores determinados diferem um pouco dos valores-alvo. No caso dos trechos A, a diferença entre as percentagens de betume determinadas e os valores-alvo foram de +0,03, -0,04 e -0,05 %, respectivamente para os trechos A1, A2 e A3. Em relação aos trechos B, aquela diferença foi de +0,02, -0,11 e -0,17 para os trechos B4, B5 e B6, respectivamente.

QUADRO 4 - TRECHOS B: % BETUME DETERMINADO POR INCINERAÇÃO

Trecho B4			Trecho B5			Trecho B6		
Provete	s/corr.	c/ corr.	Provete	s/corr.	c/ corr.	Provete	s/corr.	c/ corr.
20, 21	5,35	4,90	JA E 1, 2	5,65	5,20	32, 33	6,07	5,62
22	5,30	4,74	30	5,84	5,18	36	6,31	5,65
Média	5,33	4,82	Média	5,75	5,19	Média	6,19	5,63
Valor-Alvo		4,8	Valor-Alvo		5,3	Valor-Alvo		5,8
Diferença		+0,02	Diferença		-0,11	Diferença		-0,17

Nas FIGURAS 3 e 4 representam-se graficamente, para cada um dos trechos experimentais, os valores determinados sobre cada um dos provetes bem como a sua média. Além disso, mostram-se ainda os valores-alvo da percentagem de betume para cada um dos trechos.

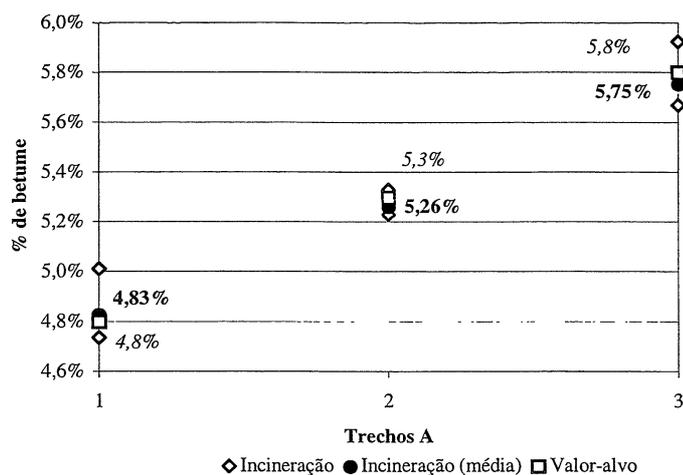


FIGURA 3 - TRECHOS A: % DE BETUME DE CADA UM DOS PROVETES E SUA MÉDIA, E VALORES-ALVO

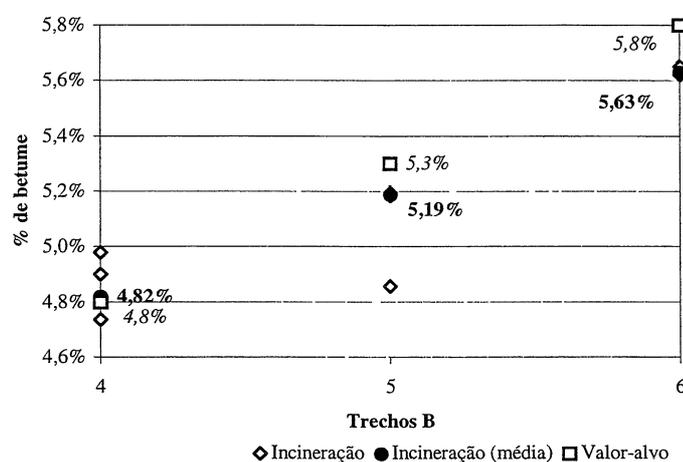


FIGURA 4 - TRECHOS B: % DE BETUME DE CADA UM DOS PROVETES E SUA MÉDIA, E VALORES-ALVO

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No QUADRO 5 resumem-se os valores médios da percentagem de betume obtidos para cada um dos trechos experimentais pelos métodos da centrifugação e da incineração. Além disso, apresentam-se, como medida da dispersão obtida, os valores do coeficiente de variação.

Verifica-se que a dispersão dos resultados obtidos pelo método da centrifugação é, em geral, maior que a obtida pelo método da incineração. Além disso, os desvios em relação aos valores-alvo são também maiores no primeiro caso.

QUADRO 5 - TRECHOS A E B: % BETUME DETERMINADO POR CENTRIFUGAÇÃO E POR INCINERAÇÃO

Método	Trecho A1		Trecho A2		Trecho A3		Trecho B4		Trecho B5		Trecho B6	
	Centr.	Incin.										
<i>Média</i>	4,61	4,83	5,10	5,26	5,75	5,74	4,77	4,82	5,11	5,19	5,65	5,63
<i>Valor-Alvo</i>	4,8		5,3		5,8		4,8		5,3		5,8	
<i>Diferença</i>	-0,19	+0,03	-0,20	-0,04	-0,05	-0,06	-0,03	+0,02	-0,19	-0,11	-0,15	-0,17
<i>Cof. Variação (%)</i>	4,24	3,28	4,89	1,10	0,12	2,56	4,64	2,58	2,53	0,15	4,25	0,33

Na FIGURA 5 representam-se graficamente, para os vários trechos construídos, as percentagens de betume determinadas e os valores-alvo pré-estabelecidos.

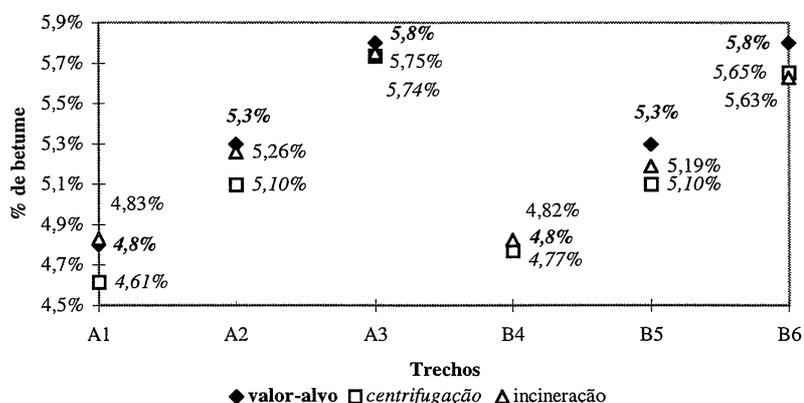


FIGURA 5 - VALORES-ALVO E PERCENTAGEM MÉDIA DE BETUME (CENTRIFUGAÇÃO E INCINERAÇÃO)

Os resultados obtidos mostram que o método da incineração conduz geralmente a resultados de maior qualidade (menor dispersão) que os determinados por centrifugação. A grandeza dos desvios da quantidade de betume foi no máximo da ordem de 0,2 %, o que poderá influenciar a avaliação que se pretendia fazer com a realização dos trechos experimentais, isto é, seleccionar a percentagem de betume tida como adequada para a composição final da mistura de alto módulo em estudo. Contudo, o método de incineração, embora mais recente, parece conduzir a resultados mais precisos e com menor variabilidade que os baseados na utilização de solventes (Brown, E. e Mager, S., 1996).

Assim, considerando que a percentagem de betume determinada por incineração apenas num caso (trecho B6) conduziu a uma diferença da ordem de 0,2 % relativamente ao valor-alvo, pode afirmar-se que os trechos experimentais foram construídos com misturas cuja quantidade de betume foi

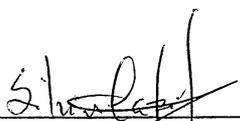
suficientemente próxima dos valores-alvo pretendidos e, por isso, adequada às avaliações que se pretendem realizar.

5. CONCLUSÕES

Face aos resultados obtidos, as misturas aplicadas na execução dos trechos experimentais parecem conter as percentagens de betume pré-estabelecidas (valores-alvos). Contudo, nos trechos B5 e B6 verificam-se desvios mais significativos (da ordem de 0,1 e 0,2 %, respectivamente), os quais deverão ser tidos em conta nos estudos de caracterização mecânica subsequentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROWN, E., MAGER, S., *Round-robin study of asphalt-concrete content by ignition*, Transportation Research Record No. 1543, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp. 132-138, 1996.



Silvano Dias Capitão
Doutorando do DEC da FCTUC
Prof. Adjunto do ISEC / IPC



Luís Picado Santos
Prof. Auxiliar do DEC da FCTUC
Responsável do LPAV



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

LABORATÓRIO DE URBANISMO, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO
E TRANSPORTES

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105

Apreciação dos Resultados do Controlo de Qualidade
da Mistura Betuminosa de Alto Módulo

4º RELATÓRIO INTERNO

SILVINO DIAS CAPITÃO
LUÍS PICADO-SANTOS

COIMBRA, Janeiro de 2000

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105
4º RELATÓRIO INTERNO

APRECIÇÃO DOS RESULTADOS DO CONTROLO DE QUALIDADE
DA MISTURA BETUMINOSA DE ALTO MÓDULO

Sumário

Este relatório tem como objectivo apreciar os resultados do controlo de qualidade obtidos pelo empreiteiro durante a aplicação da mistura betuminosa de alto módulo na Estrada Nacional nº 14, entre o Nó de Chantre (Km 4,585) e o Limite do Distrito de Braga (Km 20,028). Além disso, apresentam-se ainda os resultados dos ensaios realizados pela fiscalização, os quais têm como objectivo verificar, por amostragem, o controlo que é feito pelo empreiteiro. O controlo de qualidade efectuado consistiu na realização de ensaios sobre carotes recolhidas no pavimento e sobre provetes Marshall fabricados com mistura recolhida na central ou no momento da sua aplicação. Foram efectuados ensaios de compressão Marshall, determinaram-se as baridades dos provetes (carotes ou provetes Marshall), mediram-se as percentagens de betume realmente utilizadas e determinaram-se as curvas granulométricas das misturas produzidas. Neste relatório apresentam-se os valores determinados ao longo da realização da obra e faz-se uma análise crítica dos mesmos.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. CARACTERÍSTICAS DE REFERÊNCIA DA MISTURA BETUMINOSA.....	1
2.1- CURVA GRANULOMÉTRICA	1
2.2- PERCENTAGEM DE BETUME.....	2
2.3- BARIDADE	3
2.4- ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO MARSHALL.....	3
3. CARACTERÍSTICAS DA MISTURA BETUMINOSA APLICADA.....	4
3.1- CONTROLO EFECTUADO PELO EMPREITEIRO	4
3.1.1- CURVA GRANULOMÉTRICA	4
3.1.2- PERCENTAGEM DE BETUME	14
3.1.3- BARIDADE.....	16
3.1.4- ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO MARSHALL.....	16
3.2 - PROPRIEDADES DETERMINADAS PELA FISCALIZAÇÃO.....	19
3.2.1 - CURVA GRANULOMÉTRICA	19
3.2.2- PERCENTAGEM DE BETUME	25
3.2.3- BARIDADE.....	27
3.2.4- ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO MARSHALL.....	27
4. CONCLUSÕES	28
5. BIBLIOGRAFIA	31

Índice de Quadros

QUADRO 1- CURVA E FUSO GRANULOMÉTRICOS DE REFERÊNCIA DA MISTURA DE AGREGADOS.....	2
QUADRO 2- TOLERÂNCIAS DEFINIDAS EM PROJECTO PARA A CURVA GRANULOMÉTRICA NO FABRICO	2
QUADRO 3- COMPRESSÃO MARSHALL: ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA $P_B=5,3\%$	4
QUADRO 4- CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS NO CONTROLO DE OBRA	5
QUADRO 5- VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E DE REFERÊNCIA, E INTERVALOS PARA 95 % E 85 % DAS OBSERVAÇÕES.....	8
QUADRO 6- CURVAS GRANULOMÉTRICAS: PROBABILIDADES CORRESPONDENTES ÀS TOLERÂNCIAS DEFINIDAS EM PROJECTO.....	8
QUADRO 7 - PERCENTAGENS DE BETUME OBTIDAS NO CONTROLO DE OBRA.....	15
QUADRO 8 - BARIDADES (g/cm^3) DETERMINADAS NO CONTROLO DE OBRA.....	16
QUADRO 9 - ESTABILIDADE MARSHALL (N) DETERMINADA NO CONTROLO DE OBRA.....	17
QUADRO 10 - DEFORMAÇÃO MARSHALL (MM) DETERMINADA NO CONTROLO DE OBRA	18
QUADRO 11- CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS PELA FISCALIZAÇÃO (VIA SECA).....	20
QUADRO 12- CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS PELA FISCALIZAÇÃO (VIA HÚMIDA)	20
QUADRO 13- COMPARAÇÃO DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS PELO EMPREITEIRO E PELA FISCALIZAÇÃO (VIA HÚMIDA)	21
QUADRO 14- VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E DE REFERÊNCIA, E INTERVALOS PARA 95 % DAS OBSERVAÇÕES	23
QUADRO 15 - PERCENTAGENS DE BETUME OBTIDAS PELA FISCALIZAÇÃO	26
QUADRO 16 - BARIDADES (g/cm^3) DETERMINADAS PELA FISCALIZAÇÃO	27
QUADRO 17 - ESTABILIDADE MARSHALL (N) DETERMINADA PELA FISCALIZAÇÃO	27
QUADRO 18 - DEFORMAÇÃO MARSHALL (mm) DETERMINADA PELA FISCALIZAÇÃO	28

Índice de Figuras

FIGURA 1 - CURVA E FUSO GRANULOMÉTRICOS DE REFERÊNCIA DA MISTURA DE AGREGADOS	2
FIGURA 2 - CURVA MÉDIA DA MISTURA DE AGREGADOS E FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA	6
FIGURA 3 - FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA E VALORES MÉDIOS, MÁXIMOS E MÍNIMOS.....	6
FIGURA 4 - FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA, MÉDIA E INTERVALO PARA 95% DOS VALORES	7
FIGURA 5 - FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA, MÉDIA E INTERVALO PARA 85% DOS VALORES	7
FIGURA 6 - % DE PASSADOS: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DENTRO E FORA DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA DEFINIDOS NO PROJECTO.....	9
FIGURA 7 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA E PERCENTIS 5 % E 95 %	10
FIGURA 8 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE SUPERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 14 JULHO	11
FIGURA 9 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE SUPERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 27 AGOSTO.....	11
FIGURA10 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE SUPERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 13 SETEMBRO.....	12
FIGURA 11 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE INFERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 29 JUNHO.....	12
FIGURA 12 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE INFERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 25 AGOSTO.....	13
FIGURA 13 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE INFERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 20 AGOSTO.....	13
FIGURA 14 - FUSO DE REFERÊNCIA E CURVA OBSERVADA EM 8 DE SETEMBRO.....	14
FIGURA 15 - % DE BETUME: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DENTRO E FORA DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA	15
FIGURA 16 - ESTABILIDADE: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS ABAIXO E ACIMA DO LIMITE MÍNIMO.....	18
FIGURA 17 - DEFORMAÇÃO: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS ABAIXO E ACIMA DO LIMITE MÁXIMO.....	19
FIGURA 18 - CURVAS MÉDIAS DA MISTURA DE AGREGADOS (VIAS SECA E HÚMIDA) E FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA.....	21
FIGURA 19 - CURVAS MÉDIAS DA MISTURA DE AGREGADOS DETERMINADAS PELO EMPREITEIRO E PELA FISCALIZAÇÃO E FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA	22

FIGURA 20 - FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA E INTERVALO PARA 95% DOS VALORES	23
FIGURA 21 - % DE PASSADOS: NÚMERO DE OBSERVAÇÕES DENTRO E FORA DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA DO PROJECTO	24
FIGURA 22 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA E PERCENTIS 5% E 95 % (FISCALIZAÇÃO).....	24
FIGURA 23 - FUSO DE REFERÊNCIA E CURVA OBSERVADA EM 9 JUNHO	25
FIGURA 24 - % DE BETUME: NÚMERO DE OBSERVAÇÕES DENTRO E FORA DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA	26

EMPREITADA DE BENEFICIAÇÃO DAS EENN 14, 104 E 105
4º RELATÓRIO INTERNO

APRECIÇÃO DOS RESULTADOS DO CONTROLO DE QUALIDADE
DA MISTURA BETUMINOSA DE ALTO MÓDULO

1. INTRODUÇÃO

Na obra em análise neste relatório tem vindo a ser aplicada uma mistura betuminosa de alto módulo de deformabilidade, em camada única, com 14 cm de espessura final. A referida mistura é colocada após fresagem do pavimento existente, sendo posteriormente aplicada sobre esta camada, uma camada de desgaste em betão betuminoso..

A mistura betuminosa de granulometria 0/20 adoptada é produzida com um conjunto de 4 agregados graníticos provenientes da pedreira de Fornelo e um filer comercial calcário. Além disso, incorpora um betume CEPSA 10/20 com um aditivo constituído por 2 por mil (relativamente à massa de betume) de POLYRAM 200, de modo a melhorar a adesividade agregado-ligante.

2. CARACTERÍSTICAS DE REFERÊNCIA DA MISTURA BETUMINOSA

2.1- Curva Granulométrica

A mistura de agregados seleccionada utiliza as seguintes percentagens (em relação à massa total de agregado seco) das fracções granulométricas disponíveis:

- fracção 14/20 mm: 25 %
- fracção 10/14 mm: 8 %
- fracção 6/10 mm: 16 %
- fracção 0/6 mm: 48 %
- filer comercial: 3 %.

A composição de agregados acima mencionada foi a adoptada para efeitos de fabrico, após a realização dos estudos de transposição da fórmula de laboratório para a central. A curva granulométrica assim obtida para a mistura de agregados tem um traçado adequado face ao fuso

granulométrico indicado pelo caderno de encargos-tipo da JAE 1998 (CEJAE98), o qual se reproduz no QUADRO 1 e na FIGURA 1.

QUADRO 1- CURVA E FUSO GRANULOMÉTRICOS DE REFERÊNCIA DA MISTURA DE AGREGADOS

Peneiro ASTM	1"	3/4"	1/2"	3/8"	n°4	n°8	n°20	n°40	n°80	n°200
Malha (mm)	25,4	19,0	12,5	9,50	4,75	2,36	0,85	0,43	0,18	0,075
C. Referência	100,0	99,0	81,1	69,1	49,5	35,2	21,3	15,6	11,0	7,7
C.E. JAE 1998	100	90-100	70-90	60-80	44-62	30-44	16-30	10-21	7-14	6-10

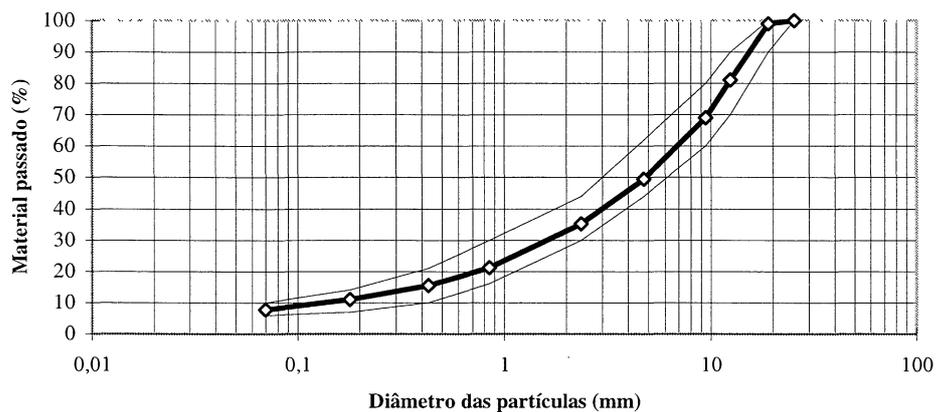


FIGURA 1 - CURVA E FUSO GRANULOMÉTRICOS DE REFERÊNCIA DA MISTURA DE AGREGADOS

Embora o fuso proposto no caderno de encargos da obra tenha sido abandonado em detrimento do proposto pelo CEJAE98, as tolerâncias definidas no projecto relativamente à curva aprovada para o fabrico da mistura são as indicadas no QUADRO 2. Estas tolerâncias não estão previstas no CEJAE98. Neste, a tolerância é o próprio fuso granulométrico definido, sendo exigido que a curva final tenha uma forma semelhante a um dos limites especificados.

QUADRO 2- TOLERÂNCIAS DEFINIDAS EM PROJECTO PARA A CURVA GRANULOMÉTRICA NO FABRICO

Peneiro ASTM	n°4	n°8	n°40	n°200
Malha (mm)	4,75	2,36	0,43	0,075
Tolerância	±4 %	±3 %	±2 %	±1 %

2.2- Percentagem de Betume

No seguimento dos estudos de formulação, adoptou-se para a mistura a produzir em obra uma percentagem de betume (já com aditivo) de 5,3 % (relativamente à massa total de mistura).

O caderno de encargos da obra estabelece, relativamente à percentagem de betume seleccionada para o fabrico da mistura, uma tolerância de 0,2 %, sendo, por isso, permitidas percentagens de 5,1 % a 5,5 % de betume.

2.3- Baridade

Nos estudos de formulação a baridade foi determinada sobre provetes, do tipo Marshall, moldados em laboratório, com a aplicação de 75 pancadas em cada topo. No caso do estudo realizado no Laboratório de Mecânica de Pavimentos (LPAV) do DEC da FCTUC, para a percentagem de betume usada em obra (5,3 %) esse valor foi de 2,40 g/cm³ (LNEC E 267-1973). No estudo realizado no LNEC o valor obtido para a mesma situação foi de 2,35 g/cm³ (ASTM D 2726). A diferença resulta, provavelmente, do facto de o método usado não ser o mesmo nos dois casos. Com efeito, ambos os procedimentos utilizam uma técnica baseada no “método da balança hidrostática”, isto é, o volume aparente do provete é calculado a partir do conhecimento das suas massas ao ar (m_1) e imerso em água a 25 °C (m_2). Contudo, a técnica de ensaio preconizada na norma ASTM americana utiliza além daqueles o valor da massa do provete ao ar, determinada depois de o retirar da água e de limpar a sua superfície com um pano húmido (m_3). A baridade da amostra é determinada, no primeiro e no segundo casos, respectivamente pelas expressões (1) e (2):

$$\text{baridade} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (1)$$

$$\text{baridade} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \quad (2)$$

O denominador da segunda expressão é maior que o da primeira se o provete não for completamente impermeável, resultando, por isso, para provetes idênticos, baridades menores no segundo caso. Esta é, provavelmente, a explicação para as pequenas diferenças acima assinaladas.

2.4- Estabilidade e Deformação Marshall

Inicialmente, a mistura foi formulada no LNEC e no LPAV pelo método de Marshall. Verificou-se alguma dificuldade na obtenção de curvas com o traçado típico do método de Marshall, conforme se referiu em relatório apresentado anteriormente (CAPITÃO, S., PICADO-SANTOS, L., 1999 [1]).

Os valores da estabilidade e da deformação obtidos nos ensaios de compressão Marshall realizados naqueles estudos são os que se indicam no QUADRO 3.

QUADRO 3- COMPRESSÃO MARSHALL: ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA $p_b=5,3\%$

Característica	Força de rotura (kN)	Deformação (mm)
LPAV	23	4,0
LNEC	28	3,3

O CEJAE98 aponta também valores de referência para estas duas grandezas. Assim, para a força de rotura indica um valor mínimo de 16 kN. Para a deformação estabelece um valor máximo de 4 mm.

3. CARACTERÍSTICAS DA MISTURA BETUMINOSA APLICADA

3.1- Controlo Efectuado pelo Empreiteiro

3.1.1- Curva Granulométrica

As amostras sobre as quais se obtiveram as curvas granulométricas das misturas produzidas ao longo da obra foram obtidas por carotagem da camada construída e por moldagem de provetes do tipo Marshall no momento da construção do pavimento. As granulometrias foram obtidas por peneiração húmida, após extracção do betume. No QUADRO 4 mostram-se o fuso granulométrico de referência e, para cada um dos peneiros usados para definir o fuso granulométrico, as percentagens de passados, a sua média, o desvio-padrão, o coeficiente de variação, o máximo e o mínimo obtidos.

Na FIGURA 2 representa-se a curva granulométrica média das curvas obtidas ao longo do período de controlo. Verifica-se que, em termos médios, a curva tem um traçado que segue o andamento geral do fuso e fica dentro dos limites daquele.

No entanto, observando os valores do coeficiente de variação (C.V.) que constam do QUADRO 4, verifica-se que a dispersão dos valores obtidos é, em geral, maior quanto menor é o diâmetro das partículas. Além disso, observa-se um desvio assinalável dos valores máximos e mínimos observados face à curva granulométrica média. Isso está patente na FIGURA 3, na qual se sobrepõem o fuso proposto no CEJAE98, os valores médios, máximos e mínimos determinados para cada um dos peneiros da série usada.

QUADRO 4- CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS NO CONTROLO DE OBRA

Peneiro Malha (mm)	1"	3/4"	1/2"	3/8"	nº4	nº8	nº20	nº40	nº80	nº200
Fuso Máximo	100	100	90	80	62	44	30	21	14	10
Fuso Mínimo	100	90	70	60	44	30	16	10	7	6
31-Mai	100,0	96,7	72,0	65,9	46,9	34,0	20,6	15,3	10,8	7,6
1-Jun	100,0	97,9	78,3	72,0	53,9	37,5	23,4	17,2	12,1	8,6
8-Jun	100,0	100,0	82,3	72,7	51,2	37,5	23,4	17,6	12,8	9,3
9-Jun	100,0	96,3	77,9	73,4	50,2	36,5	24,2	18,9	12,5	8,2
15-Jun	100,0	100,0	80,4	74,6	50,1	35,0	21,2	15,9	11,9	8,6
15-Jun	100,0	100,0	86,6	79,8	53,3	37,5	22,9	16,7	11,4	8,1
25-Jun	100,0	100,0	87,1	79,2	53,0	35,0	20,0	14,9	10,3	6,5
29-Jun	100,0	100,0	86,1	77,7	56,9	41,0	22,0	16,4	11,7	7,6
29-Jun	100,0	95,0	72,0	64,5	44,9	33,0	18,8	13,6	9,6	6,5
30-Jun	100,0	100,0	85,1	79,4	52,6	37,0	24,7	19,0	12,4	8,7
1-Jul	100,0	95,7	80,0	72,1	50,7	36,5	23,2	16,9	10,6	8,1
2-Jul	100,0	100,0	88,0	82,4	53,2	35,0	20,7	15,5	11,2	8,1
6-Jul	100,0	95,5	88,0	77,8	50,8	37,0	22,3	16,7	11,9	8,4
7-Jul	100,0	100,0	79,9	73,3	47,8	35,0	21,3	15,7	10,9	7,6
8-Jul	100,0	97,2	81,7	71,5	49,8	37,0	20,2	14,3	11,1	8,1
9-Jul	100,0	99,2	85,1	73,7	55,1	41,0	25,3	17,6	12,7	8,0
12-Jul	100,0	100,0	79,6	67,2	47,4	35,0	20,0	14,4	10,7	7,9
13-Jul	100,0	94,7	78,6	68,9	49,2	36,0	21,6	16,5	12,1	8,5
14-Jul	100,0	100,0	85,7	73,8	58,9	43,0	26,6	18,4	12,6	8,6
15-Jul	100,0	95,2	80,0	69,8	55,8	37,5	23,7	15,1	11,4	8,8
28-Jul	100,0	100,0	81,8	71,0	50,2	36,0	20,7	16,9	12,8	8,4
9-Ago	100,0	98,8	79,9	69,4	51,1	36,0	20,2	14,5	10,9	8,5
10-Ago	100,0	100,0	87,0	77,2	58,0	40,0	24,8	15,7	12,4	7,8
11-Ago	100,0	94,3	77,1	65,0	47,8	36,0	20,5	14,9	11,3	8,9
12-Ago	100,0	95,0	80,5	68,0	48,1	34,0	19,7	14,5	9,7	7,6
13-Ago	100,0	100,0	77,8	66,9	45,8	33,5	18,0	11,9	8,5	7,0
17-Ago	100,0	94,7	78,6	67,8	45,9	34,0	19,6	15,2	12,1	9,1
18-Ago	100,0	97,0	83,9	74,2	54,3	40,0	23,4	15,3	12,1	9,1
19-Ago	100,0	100,0	86,1	75,3	55,0	39,0	22,6	18,3	12,1	7,2
20-Ago	100,0	95,2	78,2	65,2	45,7	32,0	17,6	13,0	10,1	8,0
23-Ago	100,0	100,0	85,8	75,3	55,1	39,0	25,0	18,0	12,9	8,1
24-Ago	100,0	95,0	78,2	64,0	47,0	34,0	18,6	13,6	9,4	8,1
25-Ago	100,0	93,8	76,7	64,0	46,0	33,0	17,3	12,9	9,6	7,0
26-Ago	100,0	100,0	77,1	68,9	53,8	40,0	25,1	17,3	9,7	7,8
27-Ago	100,0	100,0	87,1	77,5	59,9	42,0	26,0	18,0	13,5	1,7
3-Set	100,0	95,4	79,6	70,9	50,7	37,5	25,0	17,7	11,5	6,7
8-Set	100,0	92,0	76,8	72,1	51,7	40,0	29,6	23,5	14,1	9,2
13-Set	100,0	98,3	88,0	78,3	56,2	40,0	24,7	18,0	12,4	8,8
29-Set	100,0	100,0	84,6	77,1	48,9	35,0	21,7	16,4	11,6	8,1
30-Set	100,0	100,0	81,7	73,9	52,8	36,5	21,1	14,8	9,9	6,6
<i>Média</i>	<i>100,0</i>	<i>97,8</i>	<i>81,5</i>	<i>72,3</i>	<i>51,4</i>	<i>36,9</i>	<i>22,2</i>	<i>16,2</i>	<i>11,4</i>	<i>7,9</i>
<i>Desvio-padrão</i>	<i>0,0</i>	<i>2,4</i>	<i>4,3</i>	<i>4,9</i>	<i>3,9</i>	<i>2,7</i>	<i>2,7</i>	<i>2,1</i>	<i>1,2</i>	<i>1,2</i>
<i>C.V. (%)</i>	<i>0,0</i>	<i>2,5</i>	<i>5,3</i>	<i>6,8</i>	<i>7,6</i>	<i>7,3</i>	<i>12,2</i>	<i>13,0</i>	<i>10,9</i>	<i>15,8</i>
<i>Máximo valor</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>88,0</i>	<i>82,4</i>	<i>59,9</i>	<i>43,0</i>	<i>29,6</i>	<i>23,5</i>	<i>14,1</i>	<i>9,3</i>
<i>Mínimo valor</i>	<i>100,0</i>	<i>92,0</i>	<i>72,0</i>	<i>64,0</i>	<i>44,9</i>	<i>32,0</i>	<i>17,3</i>	<i>11,9</i>	<i>8,5</i>	<i>1,7</i>

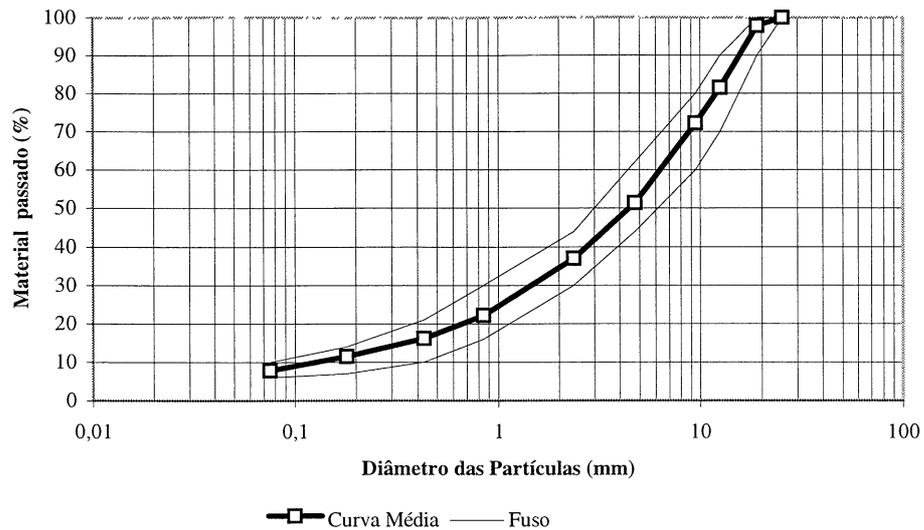


FIGURA 2 - CURVA MÉDIA DA MISTURA DE AGREGADOS E FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA

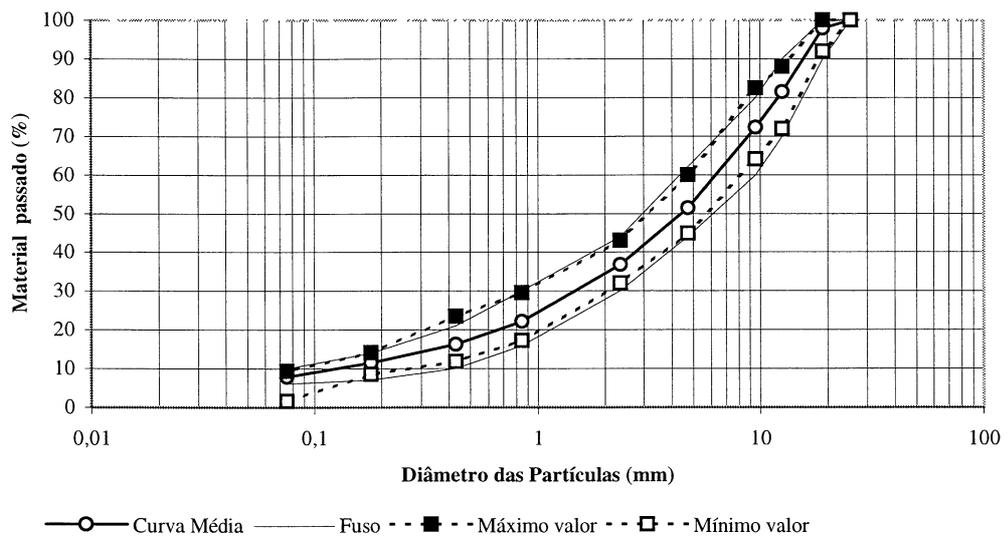


FIGURA 3 - FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA E VALORES MÉDIOS, MÁXIMOS E MÍNIMOS

A FIGURA 3 permite observar que os valores máximos e mínimos de material passado em cada um dos peneiros, nalguns casos, ultrapassam os limites definidos pelo fuso pré-estabelecido. No entanto, não permite averiguar a importância desses desvios em cada curva onde ocorrem. Podem avaliar-se ainda, para cada peneiro, os intervalos, centrados na média, da percentagem de passados onde é provável encontrar 95 % e 85 % dos valores observados. Aqueles intervalos (respectivamente, $média \pm 1,96 \times \text{desvio-padrão}$ e $média \pm 1,44 \times \text{desvio-padrão}$) estão representados

nas FIGURAS 4 e 5. Apesar de tudo, pode dizer-se que, *grosso modo*, a menos de 5 %, todos os valores observados se encontram dentro do fuso estabelecido.

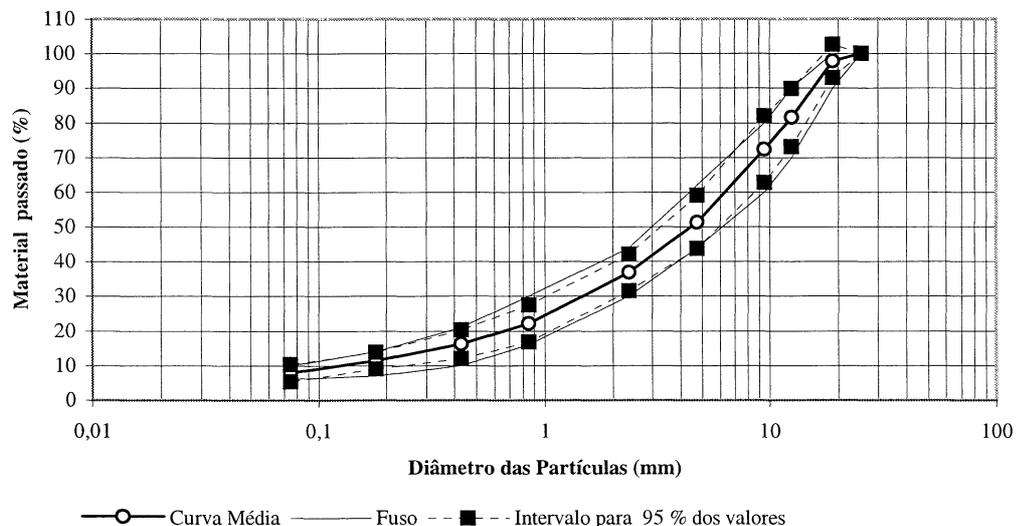


FIGURA 4 - FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA, MÉDIA E INTERVALO PARA 95% DOS VALORES

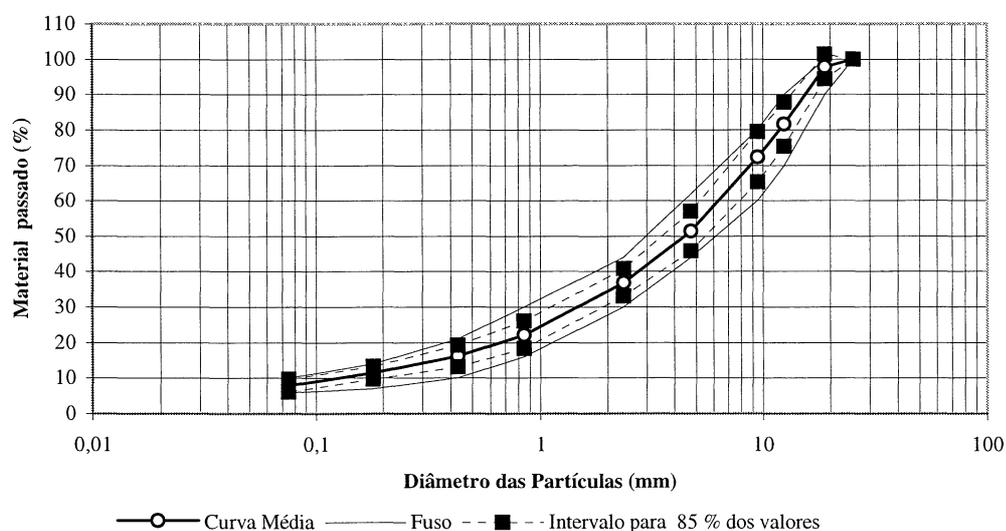


FIGURA 5 - FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA, MÉDIA E INTERVALO PARA 85% DOS VALORES

Comparando agora os valores máximos e mínimos obtidos com a curva de referência e as tolerâncias indicadas no projecto (QUADRO 5), verifica-se, mais uma vez, que a granulometria da mistura aplicada ao longo da obra apresenta uma variabilidade assinalável. No QUADRO 5 indicam-se também os limites dos intervalos, centrados na média, correspondentes a 95 % e 85 % das observações, verificando-se que as tolerâncias de projecto correspondem a intervalos de menor

amplitude que aquela que resulta para os intervalos referentes a 95 % e 85 % das observações, respectivamente.

QUADRO 5- VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E DE REFERÊNCIA, E INTERVALOS PARA 95 % E 85 % DAS OBSERVAÇÕES

Peneiro Malha (mm)	1"	3/4"	1/2"	3/8"	n°4	n°8	n°20	n°40	n°80	n°200
Curva de Referência	100,0	99,0	81,1	69,1	49,5	35,2	21,3	15,6	11,0	7,7
<i>Tolerância de projecto (máximo)</i>	---	---	---	---	53,5	38,2	---	17,6	---	8,7
<i>Tolerância de projecto (mínimo)</i>	---	---	---	---	45,5	32,2	---	13,6	---	6,7
<i>Máximo Observado</i>	---	---	---	---	59,9	43,0	---	23,5	---	9,3
<i>Mínimo Observado</i>	---	---	---	---	44,9	32,0	---	11,9	---	1,7
<i>Int. para 95 % observações (limite superior)</i>	100,0	102,6	90,0	81,9	59,1	42,1	27,5	20,3	13,9	10,3
<i>Int. para 95 % observações (limite inferior)</i>	100,0	93,0	73,1	62,7	43,7	31,6	16,9	12,0	9,0	5,4
<i>Int. para 85 % observações (limite superior)</i>	100,0	101,3	87,7	79,4	57,0	40,7	26,1	19,2	13,2	9,7
<i>Int. para 85 % observações (limite inferior)</i>	100,0	94,3	75,3	65,2	45,8	33,0	18,3	13,1	9,6	6,1

Note-se que, as tolerâncias de projecto são referidas à curva de referência e não à média das observações realizadas no controlo da obra. Assim, fez-se um exercício que consistiu em determinar, para os peneiros para os quais se estabeleceram tolerâncias, as probabilidades de encontrar as observações dentro dos intervalos de tolerância definidos no projecto, tomando para a média o valor da curva de referência e para desvio-padrão o obtido para a amostra (QUADRO 6).

QUADRO 6- CURVAS GRANULOMÉTRICAS: PROBABILIDADES CORRESPONDENTES ÀS TOLERÂNCIAS DEFINIDAS EM PROJECTO

Peneiro ASTM Malha (mm)	n°4	n°8	n°40	n°200
$x_{\text{máx.}}$: Tolerância de projecto (máximo)	53,5	38,2	17,6	8,7
$x_{\text{mín.}}$: Tolerância de projecto (mínimo)	45,5	32,2	13,6	6,7
μ : Média (valor curva de referência)	49,5	35,2	15,6	7,7
σ : Desvio-padrão da amostra	3,9	2,7	2,1	1,2
<i>Var. N. Reduzida</i> $z = (x_{\text{mín.}} - \mu) / \sigma$	-1,03	-1,11	-0,95	-0,83
<i>Var. N. Reduzida</i> $z = (x_{\text{máx.}} - \mu) / \sigma$	1,03	1,11	0,95	0,83
<i>Probabilidade (%)</i>	69,7	73,3	65,8	59,3

Observando o QUADRO 6, é possível verificar que as probabilidades são baixas (59,3 a 73,3 %), confirmando que os intervalos de tolerância de projecto têm uma amplitude relativamente pequena, isto é, os limites daqueles intervalos variam, em relação à média, de $\pm 0,83$ desvios-padrão para o peneiro n° 200, a $\pm 1,11$ desvios-padrão para o peneiro n°8. Pode concluir-se que, sendo estreitos os limites previstos no projecto, não há uma sistemática verificação desses limites.

Para se ter mais uma medida da extensão da variabilidade verificada, determinou-se, para cada um dos peneiros para os quais foi imposta uma tolerância, o número de ocorrências (frequência) dentro e fora dos intervalos de tolerância definidos no projecto (QUADRO 5). Os resultados a que se chegou são os que se mostram na FIGURA 6.

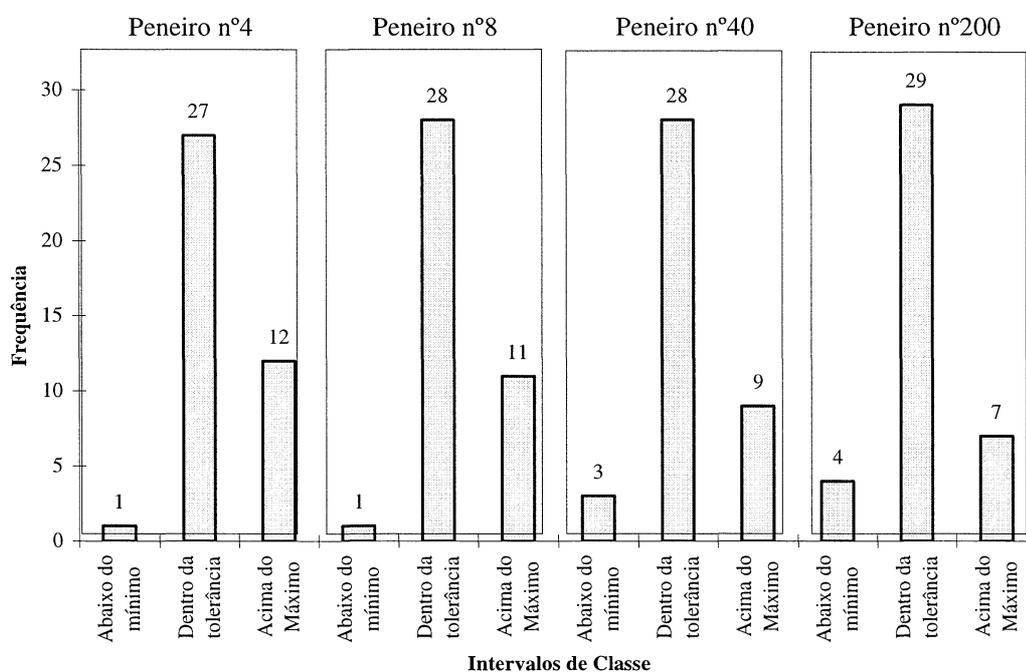


FIGURA 6 - % DE PASSADOS: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DENTRO E FORA DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA DEFINIDOS NO PROJECTO

Da análise da FIGURA 6, verifica-se que existe um número apreciável de ocorrências nas quais não são cumpridos os limites estabelecidos no projecto para a percentagem de passados nos 4 peneiros de controlo indicados. Isso aconteceu em 33 % dos casos para o peneiro nº4, em 30 % dos casos para os peneiros nº8 e nº40 e, finalmente, em 28 % dos casos para o peneiro nº200.

Como contraponto ao que se pode referir se se tomar como referência os limites impostos em projecto, determinaram-se os limites correspondentes aos percentis 95 % e 5 %, os quais representam, respectivamente, os limites superiores para 95 % e 5 % dos valores observados. Por outra palavras, pode afirmar-se que 95 % das observações estão abaixo da “curva 95 %” e que 5 % das ocorrências estão acima da “curva 5 %” (ou 5 % estão abaixo desta). Na FIGURA 7 representam-se as referidas curvas sobrepostas ao fuso de referência e à média das observações.

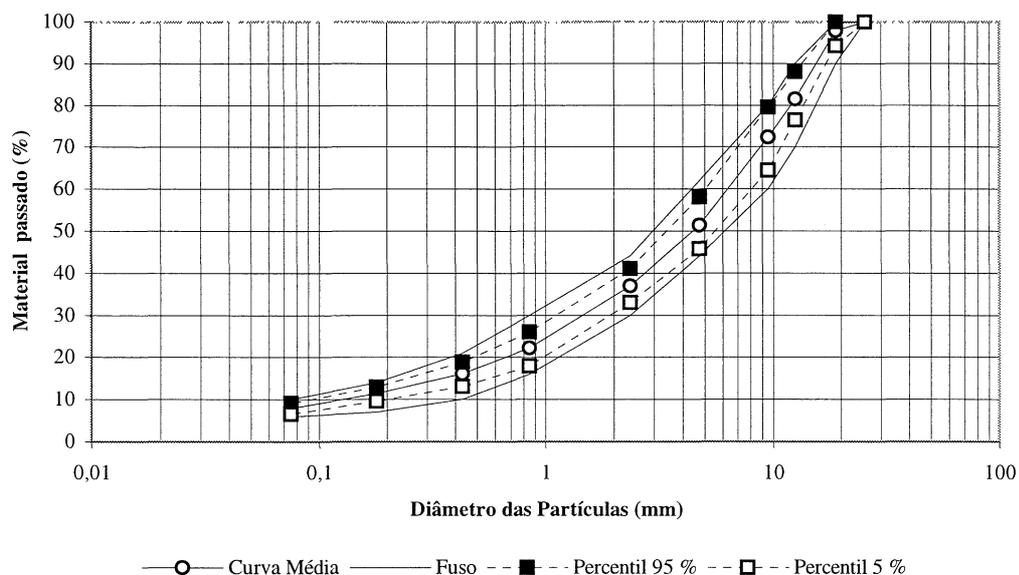


FIGURA 7 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA E PERCENTIS 5 % E 95 %

Tal como analisado anteriormente, pode-se concluir que a grande maioria das observações resultou em curvas dentro dos limites do fuso. Isto ainda pode ser corroborado verificando quais as curvas observadas que mais se aproximam dos limites do fuso especificado. Isto é possível de realizar calculando, para cada curva observada, o somatório dos desvios, em relação à média, obtidos para cada um dos peneiros da série adoptada $\left[\sum (x_i - \bar{x}) \right]$. As curvas mais desviadas da média tendem a resultar num somatório de maior valor absoluto. No caso de o sinal da soma ser negativo a curva estará abaixo da média, se acontecer o contrário estará acima daquela.

Nas FIGURAS 8 a 13 representam-se as três curvas mais desviadas, para cima e para baixo, em relação à média, considerando o critério acima definido. Além disso, representam-se também o fuso de referência e a curva média em todos os casos, e o limite superior do intervalo onde é provável encontrar 95 % das observações ($média + 1,96 \times desvio-padrão$) nos primeiros três casos, e o limite inferior daquele intervalo ($média - 1,96 \times desvio-padrão$) nos restantes três casos. Pode verificar-se que, excepto para o peneiro nº200 do caso representado na FIGURA 9, todas as curvas, encontradas pelo método descrito, nas quais o desvio em relação à média é mais visível, são objectivamente aceitáveis, isto é, estão dentro do fuso definido e apresentam um forma regular.

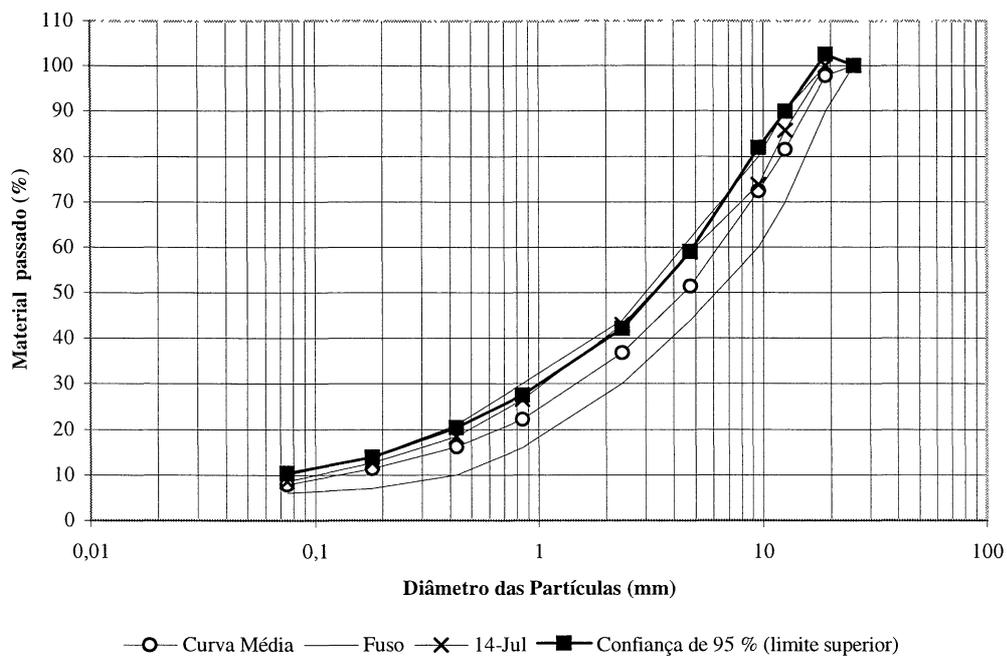


FIGURA 8 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE SUPERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 14 JULHO

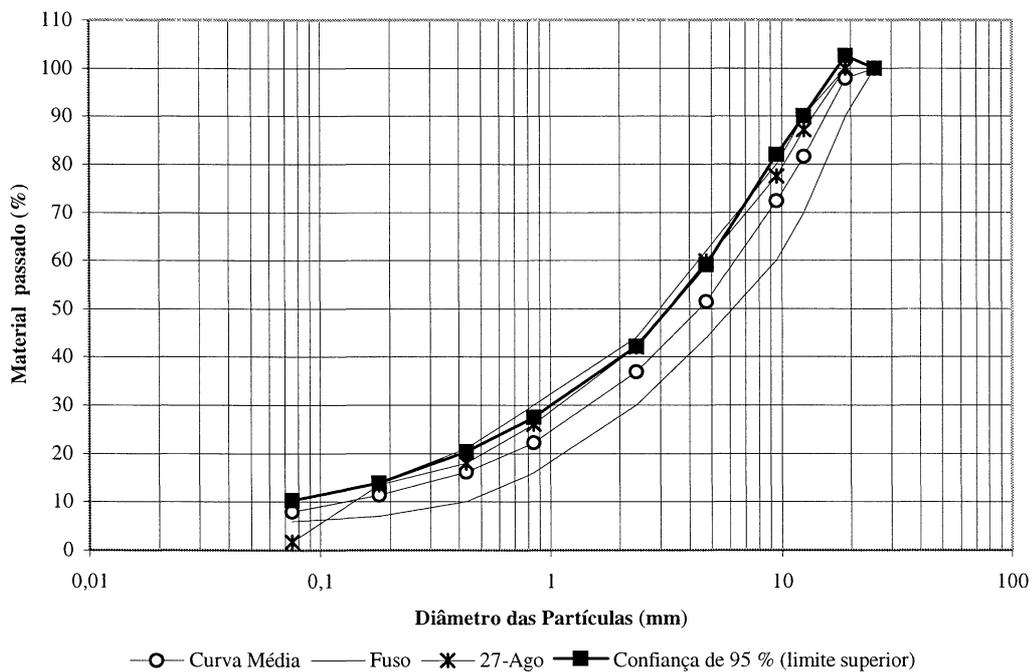


FIGURA 9 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE SUPERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 27 AGOSTO

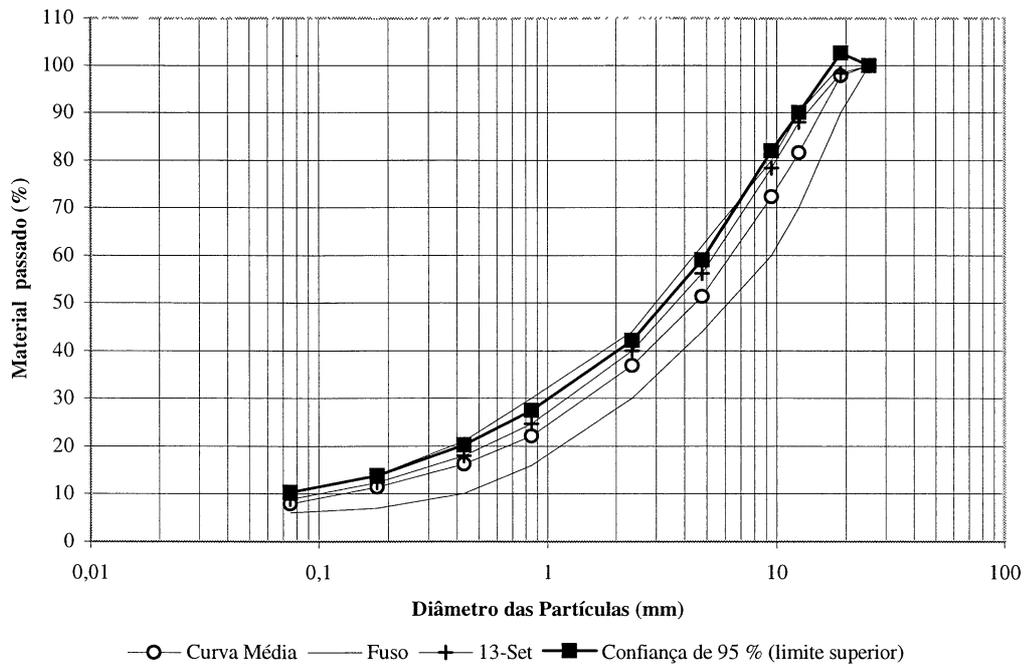


FIGURA 10 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE SUPERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 13 SETEMBRO

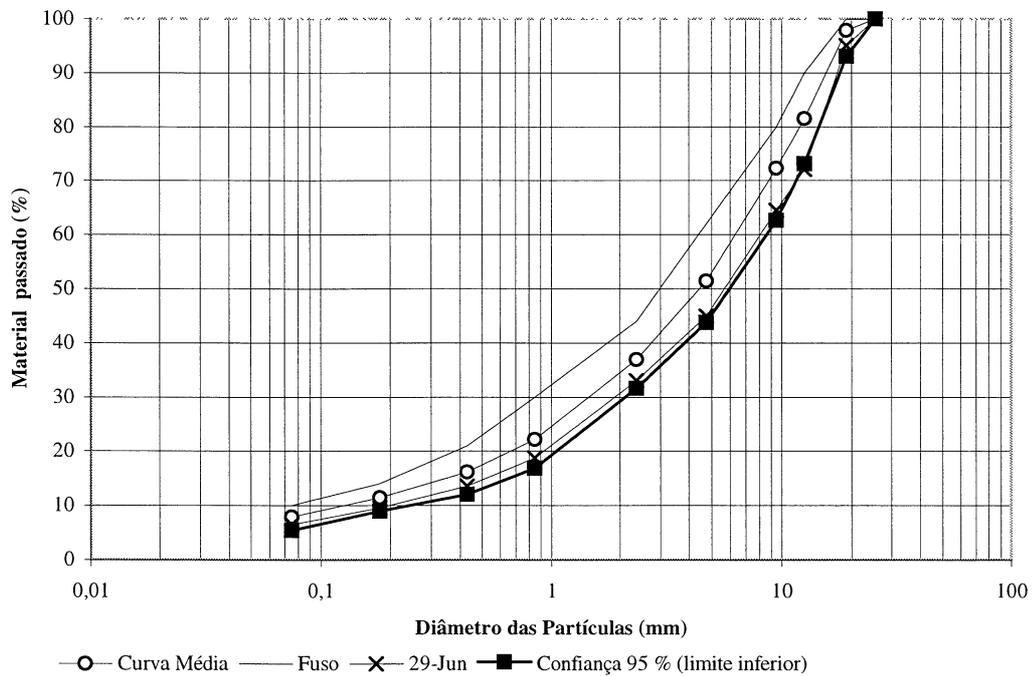


FIGURA 11 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE INFERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 29 JUNHO

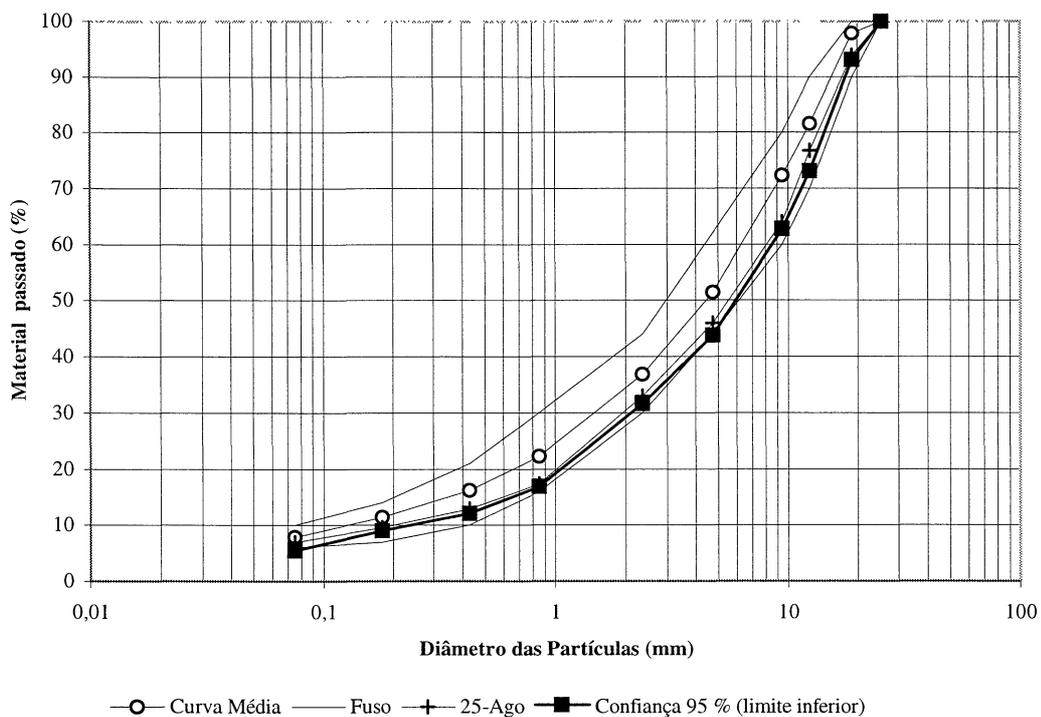


FIGURA 12 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE INFERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 25 AGOSTO

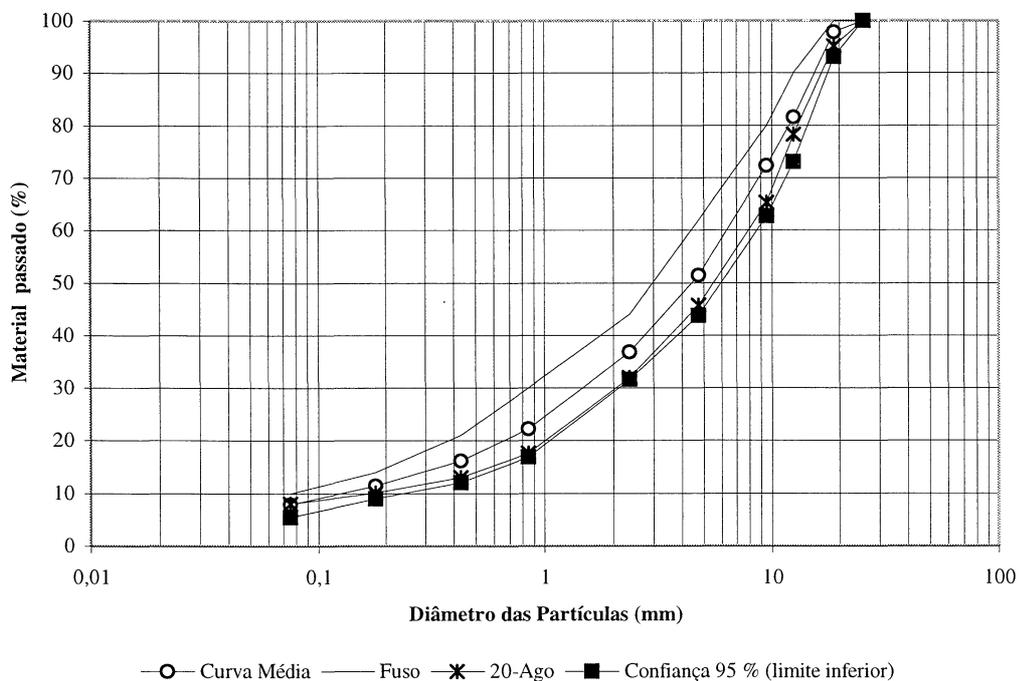


FIGURA 13 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA, LIMITE INFERIOR DO INTERVALO PARA 95 % DOS VALORES E CURVA OBSERVADA EM 20 AGOSTO

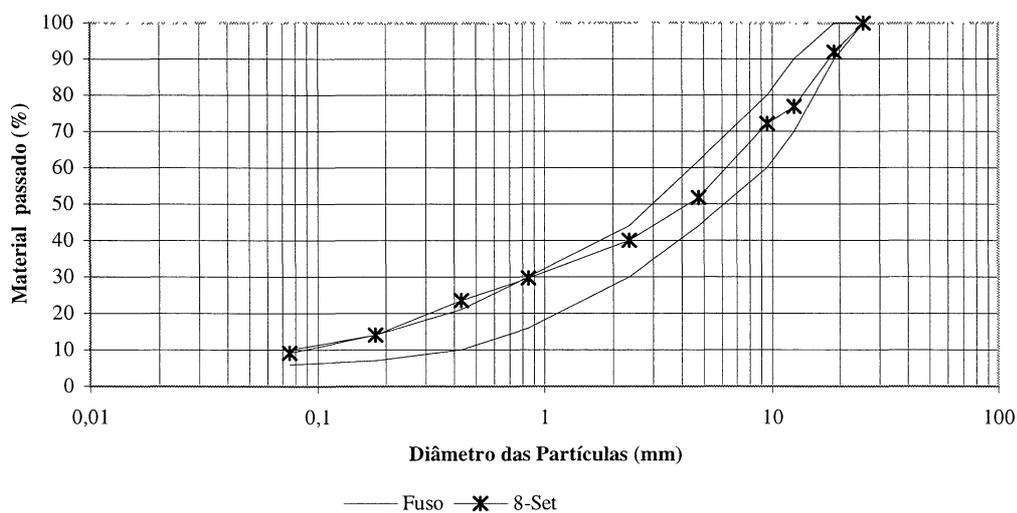


FIGURA 14 - FUSO DE REFERÊNCIA E CURVA OBSERVADA EM 8 DE SETEMBRO

Fazendo agora uma outra análise que consiste em verificar se os traçados das curvas granulométricas observadas apresentam ou não um andamento geral semelhante ao fuso granulométrico de referência estabelecido, fica-se com a noção se as curvas utilizadas têm uma forma regular, como se exige no CEJAE98. Como se sabe, mesmo que tais curvas não ultrapassem os limites do fuso, podem ocorrer curvas que cruzam o fuso, isto é, que numa zona seguem o traçado do limite superior e noutra o traçado do limite inferior ou vice-versa, com prejuízo para a qualidade da estrutura do esqueleto agregado. Para detectar estas situações, é necessário traçar todas as curvas determinadas e verificar se efectivamente elas existem. Na FIGURA 14 representa-se uma curva cujo traçado ilustra bem um “andamento” inadequado, sendo mesmo a curva de pior traçado encontrada. Foram detectados 6 casos destes (15 Jun., 25 Jun., 2 Jul., 17 Ago., 8 Set. e 29 Set.), o que corresponde a 15 % das observações.

3.1.2- Percentagem de Betume

A percentagem de betume foi determinada pelo método do extractor de Kumagawa. Os valores assim determinados são os que se indicam no QUADRO 7.

Como se referiu, a tolerância estabelecida no caderno de encargos da obra era de $\pm 0,2$ % relativamente ao valor adoptado. Ora, no caso presente pretendia utilizar-se uma mistura com 5,3 % de betume 10/20. Verifica-se, pois, que o valor médio de 5,41 % cai dentro dos limites de variação estabelecidos (5,1 a 5,5 %). No entanto, verifica-se que há uma amplitude de variação relativamente grande (4,9 a 5,8 %).

A FIGURA 15 mostra o número de ocorrências em que a percentagem de betume ficou dentro e fora do intervalo de tolerância, verificando-se que em 19 % dos casos em que se fez controlo da percentagem de betume da mistura, o valor obtido estava fora dos limites do caderno de encargos.

QUADRO 7 - PERCENTAGENS DE BETUME OBTIDAS NO CONTROLO DE OBRA

Data	% betume	Data	% betume	Data	% betume
31-Mai	5,5	6-Jul	5,5	12-Ago	5,6
1-Jun	5,3	8-Jul	5,5	13-Ago	5,4
8-Jun	4,9	9-Jul	5,2	17-Ago	5,6
9-Jun	5,8	12-Jul	5,3	18-Ago	5,5
15-Jun	5,6	13-Jul	5,4	3-Set	5,4
15-Jun	5,7	14-Jul	5,3	8-Set	5,2
25-Jun	5,3	15-Jul	5,5	11-Set	5,1
25-Jun	5,5	16-Jul	5,5	13-Set	5,4
30-Jun	5,4	29-Jul	5,5	29-Set	5,2
1-Jul	5,5	10-Ago	5,5	30-Set	5,2
5-Jul	5,4	11-Ago	5,5		
				<i>Média</i>	5,41
				<i>Desvio-padrão</i>	0,18
				<i>C.V. (%)</i>	3,3
				<i>Máximo valor</i>	5,8
				<i>Mínimo valor</i>	4,9

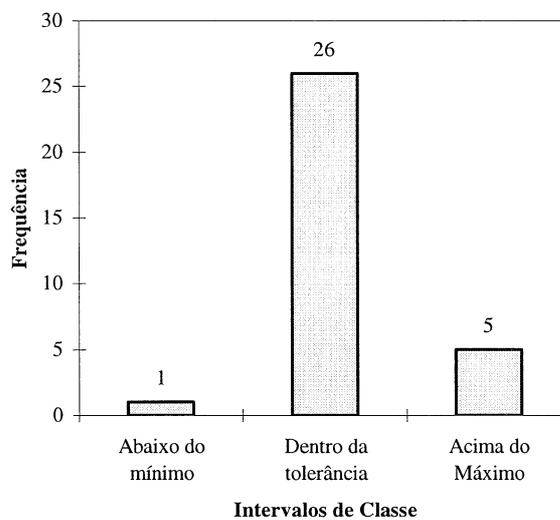


FIGURA 15 - % DE BETUME: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DENTRO E FORA DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA

3.1.3- Baridade

As baridades determinadas sobre as amostras recolhidas do pavimento durante a sua construção são as que se indicam no QUADRO 8. Para a sua determinação foi seguido um método semelhante ao usado pelo LNEC (do tipo “provete saturado com a superfície seca”).

QUADRO 8 - BARIDADES (g/cm^3) DETERMINADAS NO CONTROLO DE OBRA

Data	baridade	Data	baridade	Data	baridade
31-Mai	2,34	2-Jul	2,35	2-Ago	2,37
1-Jun	2,36	6-Jul	2,36	9-Ago	2,37
1-Jun	2,41	7-Jul	2,37	10-Ago	2,36
1-Jun	2,39	8-Jul	2,36	11-Ago	2,37
7-Jun	2,41	9-Jul	2,36	12-Ago	2,36
8-Jun	2,39	12-Jul	2,36	13-Ago	2,37
8-Jun	2,36	13-Jul	2,35	17-Ago	2,37
9-Jun	2,34	14-Jul	2,37	18-Ago	2,35
11-Jun	2,35	15-Jul	2,36	3-Set	2,38
14-Jun	2,36	19-Jul	2,37	8-Set	2,37
15-Jun	2,36	20-Jul	2,35	11-Set	2,37
16-Jun	2,37	21-Jul	2,38	13-Set	2,37
17-Jun	2,37	22-Jul	2,37	29-Set	2,39
29-Jun	2,35	26-Jul	2,36		
30-Jun	2,36	28-Jul	2,34		
1-Jul	2,36	29-Jul	2,37		
				<i>Média</i>	2,37
				<i>Desvio-padrão</i>	0,02
				<i>C.V. (%)</i>	0,65
				<i>Máximo valor</i>	2,41
				<i>Mínimo valor</i>	2,34

Comparando o valor médio obtido com os valores de referência encontrados para o método de formulação de Marshall, pode afirmar-se que os resultados são satisfatórios. De facto, considerando o valor determinado pelo LNEC obtém-se um “grau de compactação médio” relativo ao método de Marshall de 100,9 %. Se se tomar como referência o valor obtido pelo LPAV chega-se a uma percentagem de 98,8 %.

Considerando agora as baridades mínima e máxima medidas, e tomando o valor $2,35 \text{ g/cm}^3$ como referência, verifica-se que o “grau de compactação da mistura” relativo ao ensaio de Marshall variou de 99,6 % a 102,6 %. Ora, correntemente exige-se em obra uma baridade superior a 98 % da de referência. No caso presente, tendo como base as amostras recolhidas, pode afirmar-se que o processo construtivo cumpriu as exigências relativas à compactação, em termos da baridade obtida.

3.1.4- Estabilidade e Deformação Marshall

A estabilidade Marshall determinada nos ensaios de controlo da obra apresentou os valores indicados no QUADRO 9.

QUADRO 9 - ESTABILIDADE MARSHALL (N) DETERMINADA NO CONTROLO DE OBRA

Data	Estabilidade	Data	Estabilidade	Data	Estabilidade
31-Mai	18032	2-Jul	18630	2-Ago	18890
1-Jun	18542	6-Jul	18542	9-Ago	18816
1-Jun	17478	7-Jul	18845	10-Ago	18439
1-Jun	17733	8-Jul	17954	11-Ago	19086
7-Jun	17209	9-Jul	18821	12-Ago	18395
8-Jun	15974	12-Jul	18385	13-Ago	18610
8-Jun	16297	13-Jul	18400	17-Ago	18811
9-Jun	16729	14-Jul	18596	18-Ago	18311
11-Jun	18649	15-Jul	18571	3-Set	13906
14-Jun	18532	19-Jul	18855	8-Set	14896
15-Jun	16885	20-Jul	18076	11-Set	14582
16-Jun	19286	21-Jul	19169	13-Set	17366
17-Jun	19179	22-Jul	18365	29-Set	18375
29-Jun	19012	26-Jul	18635		
30-Jun	18645	28-Jul	18351		
1-Jul	18571	29-Jul	18640		
				<i>Média</i>	18046
				<i>Desvio-padrão</i>	1220,2
				<i>C.V. (%)</i>	6,8
				<i>Máximo valor</i>	19286
				<i>Mínimo valor</i>	13906

Analisando o QUADRO 9, verifica-se que o valor médio da estabilidade é superior ao limite mínimo de 16000 N preconizado pelo CEJAE98, embora bastante mais baixo que a estabilidade obtida para a formulação Marshall (QUADRO 3). Além disso, verifica-se existirem forças de rotura abaixo do mínimo. O número de ocorrências abaixo e acima do valor mínimo está representado na FIGURA 16, a qual permite verificar que em 9 % dos testes não houve cumprimento do limite mínimo.

Os valores da deformação que constam do QUADRO 10 foram medidos no instante da rotura dos provetes, correspondendo, por isso, aos valores da estabilidade indicados no QUADRO 9.

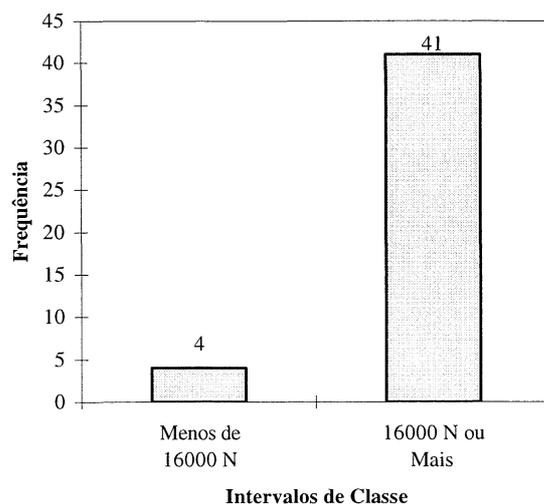


FIGURA 16 - ESTABILIDADE: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS ABAIXO E ACIMA DO LIMITE MÍNIMO

QUADRO 10 - DEFORMAÇÃO MARSHALL (mm) DETERMINADA NO CONTROLO DE OBRA

Data	Deformação	Data	Deformação	Data	Deformação
31-Mai	3,6	2-Jul	4,0	2-Ago	3,8
1-Jun	3,7	6-Jul	3,9	9-Ago	4,1
1-Jun	4,7	7-Jul	3,9	10-Ago	3,7
1-Jun	4,6	8-Jul	3,8	11-Ago	3,9
7-Jun	4,4	9-Jul	4,1	12-Ago	3,6
8-Jun	5,35	12-Jul	3,8	13-Ago	3,9
8-Jun	3,7	13-Jul	3,9	17-Ago	4,0
9-Jun	3,7	14-Jul	3,9	18-Ago	3,6
11-Jun	3,7	15-Jul	3,8	3-Set	3,9
14-Jun	3,5	19-Jul	3,6	8-Set	3,7
15-Jun	3,8	20-Jul	3,8	11-Set	4,1
16-Jun	4,1	21-Jul	3,8	13-Set	4,8
17-Jun	4,1	22-Jul	3,8	29-Set	4,4
29-Jun	3,7	26-Jul	4,0		
30-Jun	3,8	28-Jul	3,9		
1-Jul	3,9	29-Jul	3,9		
				<i>Média</i>	3,9
				<i>Desvio-padrão</i>	0,35
				<i>C.V. (%)</i>	8,8
				<i>Máximo valor</i>	5,4
				<i>Mínimo valor</i>	3,5

Verifica-se que a deformação média (3,9 mm) tem um valor próximo do máximo proposto pelo CEJAE98 (4 mm), ficando compreendida entre os valores determinados, sobre provetes Marshall, pelo LNEC (3,3 mm) e pelo LPAV (4,0 mm).

A frequência relativa de deformações acima do limite máximo de 4 mm é de 29 % (FIGURA 17).

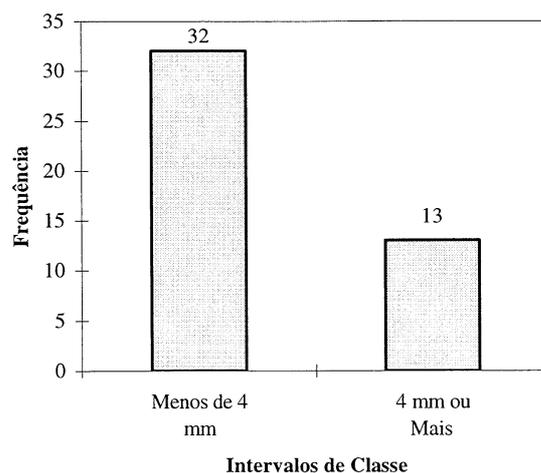


FIGURA 17 - DEFORMAÇÃO: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS ABAIXO E ACIMA DO LIMITE MÁXIMO

3.2 - Propriedades Determinadas pela Fiscalização

O controlo das propriedades da mistura foram realizados pelo empreiteiro. No entanto, a verificação dos resultados assim obtidos foi feita, por amostragem, pela fiscalização, a qual recolheu amostras de forma aleatória em qualquer ponto da obra ou da linha de produção. No caso presente, a fiscalização procedeu à recolha de mistura em central, a qual foi usada para produzir provetes Marshall. Além disso, extraiu tarolos na camada construída com a mistura de alto módulo produzida. Em ambos os casos, determinou, em laboratório, as propriedades que pretendia controlar.

Nesta secção do texto faz-se uma análise idêntica à que se apresentou em 3.1 e comparam-se os resultados obtidos com os determinados pelo empreiteiro. Note-se que o número de amostras recolhido pela fiscalização é inferior ao recolhido pelo empreiteiro, pelo que os resultados a que se chegou representarão pior as observações médias encontradas durante a obra. No entanto, os ensaios realizados pela fiscalização permitem averiguar sobre deficiências sistemáticas no processo de construção e/ou de controlo seguidos pelo empreiteiro.

3.2.1 - Curva Granulométrica

As amostras da mistura de alto módulo recolhidas, após a extracção do betume, conduziram às curvas granulométricas indicadas nos QUADROS 11 e 12. Saliente-se o facto de as granulometrias terem sido realizadas por via seca no primeiro caso e por via húmida no segundo caso. Em geral, o

segundo método é mais adequado que o primeiro, porquanto permite determinar com maior precisão a quantidade de material fino.

QUADRO 11- CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS PELA FISCALIZAÇÃO (VIA SECA)

Peneiro Malha (mm)	1"	3/4"	1/2"	3/8"	n°4	n°10	n°20	n°40	n°80	n°200
	25,4	19,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,85	0,43	0,18	0,075
Fuso Máximo	100	100	90	80	62	42	30	21	14	10
Fuso Mínimo	100	90	70	60	44	27,8	16	10	7	6
9-Jun	100,0	99,6	87,2	78,4	53,4	34,6	24,0	18,0	12,4	5,9
9-Jun	100,0	99,3	86,9	78,7	50,1	30,6	20,7	15,7	10,9	6,6
30-Jun	100,0	100,0	86,6	79,1	55,5	39,0	24,0	18,3	12,6	7,4
9-Jul	100,0	98,3	82,3	77,0	48,7	32,5	19,0	14,2	10,5	6,2
12-Jul	100,0	99,2	88,4	82,7	55,5	37,2	22,6	17,0	11,9	7,6
1-Set	100,0	99,2	84,0	76,5	49,2	30,3	20,7	16,0	11,5	7,1
<i>Média</i>	<i>100,0</i>	<i>99,3</i>	<i>85,9</i>	<i>78,7</i>	<i>52,1</i>	<i>34,0</i>	<i>21,8</i>	<i>16,5</i>	<i>11,6</i>	<i>6,8</i>
<i>Desvio-padrão</i>	<i>0,0</i>	<i>0,5</i>	<i>2,3</i>	<i>2,2</i>	<i>3,1</i>	<i>3,5</i>	<i>2,0</i>	<i>1,5</i>	<i>0,8</i>	<i>0,7</i>
<i>C.V. (%)</i>	<i>0,0</i>	<i>0,6</i>	<i>2,6</i>	<i>2,8</i>	<i>6,0</i>	<i>10,4</i>	<i>9,3</i>	<i>9,3</i>	<i>7,3</i>	<i>10,2</i>
<i>Máximo valor</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>88,4</i>	<i>82,7</i>	<i>55,5</i>	<i>39,0</i>	<i>24,0</i>	<i>18,3</i>	<i>12,6</i>	<i>7,6</i>
<i>Mínimo valor</i>	<i>100,0</i>	<i>98,3</i>	<i>82,3</i>	<i>76,5</i>	<i>48,7</i>	<i>30,3</i>	<i>19,0</i>	<i>14,2</i>	<i>10,5</i>	<i>5,9</i>

QUADRO 12- CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS PELA FISCALIZAÇÃO (VIA HÚMIDA)

Peneiro Malha (mm)	1"	3/4"	1/2"	3/8"	n°4	n°8	n°20	n°40	n°80	n°200
	25,4	19,0	12,5	9,5	4,75	2,36	0,85	0,43	0,18	0,075
Fuso Máximo	100	100	90	80	62	44	30	21	14	10
Fuso Mínimo	100	90	70	60	44	30	16	10	7	6
9-Jun	100,0	98,0	88,5	81,4	52,9	35,0	21,2	16,2	11,4	7,9
16-Jun	100,0	99,1	80,8	71,6	45,5	30,5	19,14	14,7	10,6	7,5
30-Jun	100,0	100,0	86,6	81,0	57,8	39,8	24,6	18,6	13,0	9,2
9-Jul	100,0	98,2	85,9	79,7	52,0	33,7	18,7	13,9	10,1	7,4
12-Jul	100,0	99,5	88,5	82,6	54,9	36,5	22,3	16,9	11,6	8,0
9-Ago	100,0	98,9	87,5	81,4	53,9	37,4	23,1	17,7	12,4	8,7
<i>Média</i>	<i>100,0</i>	<i>98,9</i>	<i>86,3</i>	<i>79,6</i>	<i>52,8</i>	<i>35,5</i>	<i>21,5</i>	<i>16,3</i>	<i>11,5</i>	<i>8,1</i>
<i>Desvio-padrão</i>	<i>0,0</i>	<i>0,8</i>	<i>2,9</i>	<i>4,1</i>	<i>4,1</i>	<i>3,2</i>	<i>2,3</i>	<i>1,8</i>	<i>1,1</i>	<i>0,7</i>
<i>C.V. (%)</i>	<i>0,0</i>	<i>0,8</i>	<i>3,4</i>	<i>5,1</i>	<i>7,8</i>	<i>9,1</i>	<i>10,7</i>	<i>10,8</i>	<i>9,2</i>	<i>8,4</i>
<i>Máximo valor</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>88,5</i>	<i>82,6</i>	<i>57,8</i>	<i>39,8</i>	<i>24,6</i>	<i>18,6</i>	<i>13,0</i>	<i>9,2</i>
<i>Mínimo valor</i>	<i>100,0</i>	<i>98,0</i>	<i>80,8</i>	<i>71,6</i>	<i>45,5</i>	<i>30,5</i>	<i>18,7</i>	<i>13,9</i>	<i>10,1</i>	<i>7,4</i>

Na FIGURA 18 representam-se os traçados das curvas granulométricas médias, obtidas por via seca e húmida, da mistura de agregados usada no fabrico da mistura de alto módulo. Como se observa o desvio entre ambas é quase imperceptível a olho nu. Analisando os QUADROS 11 e 12, é possível confirmar que a diferença entre as duas curvas médias (por via seca e por húmida) é diminuta, embora a percentagem de passados seja, em geral, ligeiramente maior no segundo caso.

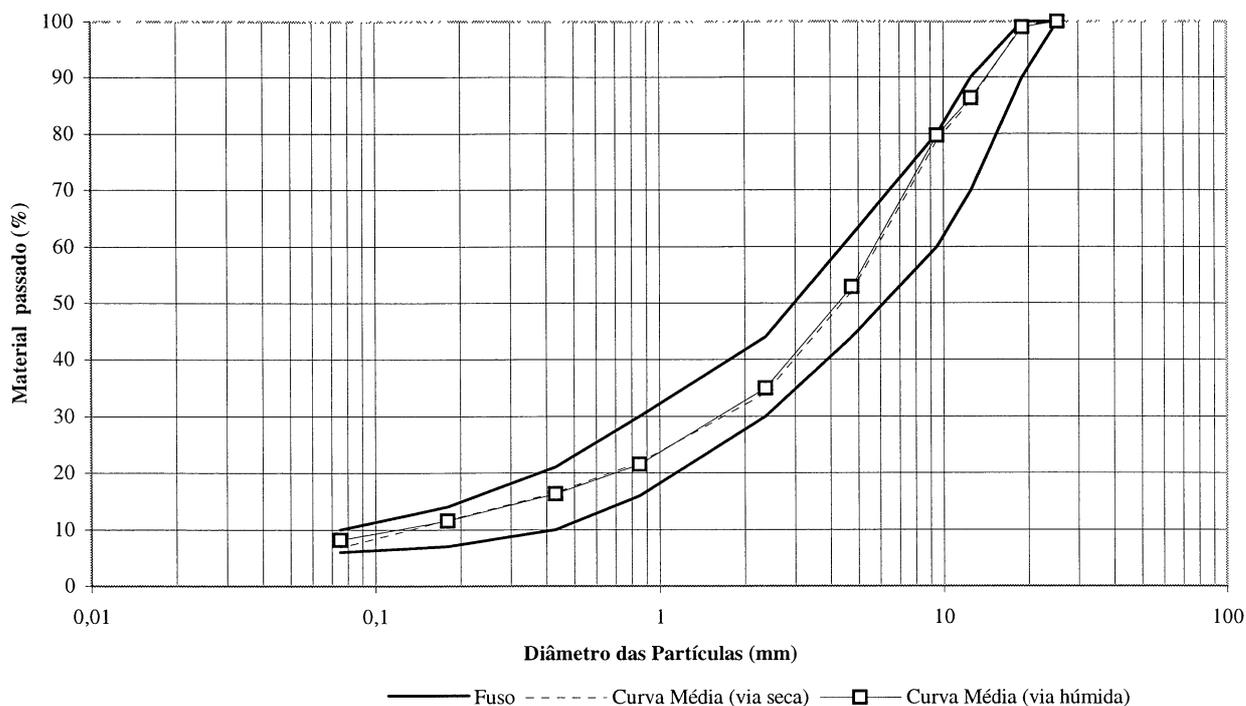


FIGURA 18 - CURVAS MÉDIAS DA MISTURA DE AGREGADOS (VIAS SECA E HÚMIDA) E FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA

No QUADRO 13 comparam-se os valores referentes às curvas granulométricas (média, desvio-padrão, coeficiente de variação, máximo e mínimo) determinados pela fiscalização (por via húmida) com os obtidos pelo empreiteiro. A representação gráfica das curvas médias em ambos os casos é a que se mostra na FIGURA 19.

QUADRO 13- COMPARAÇÃO DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS PELO EMPREITEIRO E PELA FISCALIZAÇÃO (VIA HÚMIDA)

Peneiro Malha (mm)	1"	3/4"	1/2"	3/8"	n°4	n°8	n°20	n°40	n°80	n°200
Fuso Máximo	100	100	90	80	62	44	30	21	14	10
Fuso Mínimo	100	90	70	60	44	30	16	10	7	6
Média (Empreiteiro)	100,0	97,8	81,5	72,3	51,4	36,9	22,2	16,2	11,4	7,9
Média (Fiscalização)	100,0	98,9	86,3	79,6	52,8	35,5	21,5	16,3	11,5	8,1
Desvio-padrão (E.)	0,0	2,4	4,3	4,9	3,9	2,7	2,7	2,1	1,2	1,2
Desvio-padrão (F.)	0,0	0,8	2,9	4,1	4,1	3,2	2,3	1,8	1,1	0,7
C.V. (%) (E.)	0,0	2,5	5,3	6,8	7,6	7,3	12,2	13,0	10,9	15,8
C.V. (%) (F.)	0,0	0,8	3,4	5,1	7,8	9,1	10,7	10,8	9,2	8,4
Máximo valor (E.)	100,0	100,0	88,0	82,4	59,9	43,0	29,6	23,5	14,1	9,3
Máximo valor (F.)	100,0	100,0	88,5	82,6	57,8	39,8	24,6	18,6	13,0	9,2
Mínimo valor (E.)	100,0	92,0	72,0	64,0	44,9	32,0	17,3	11,9	8,5	1,7
Mínimo valor (F.)	100,0	98,0	80,8	71,6	45,5	30,5	18,7	13,9	10,1	7,4

Como se observa, na zona mais à direita (materiais grossos) da FIGURA 19, as curvas granulométricas determinadas pela fiscalização têm, em média, material mais fino que as determinadas pelo empreiteiro. Como se viu anteriormente, a curva média determinada pelo

empreiteiro segue de perto o traçado da curva de referência, pelo que pode afirmar-se que, em média, as curvas granulométricas obtidas pela fiscalização são de pior qualidade que as obtidas pelo empreiteiro.

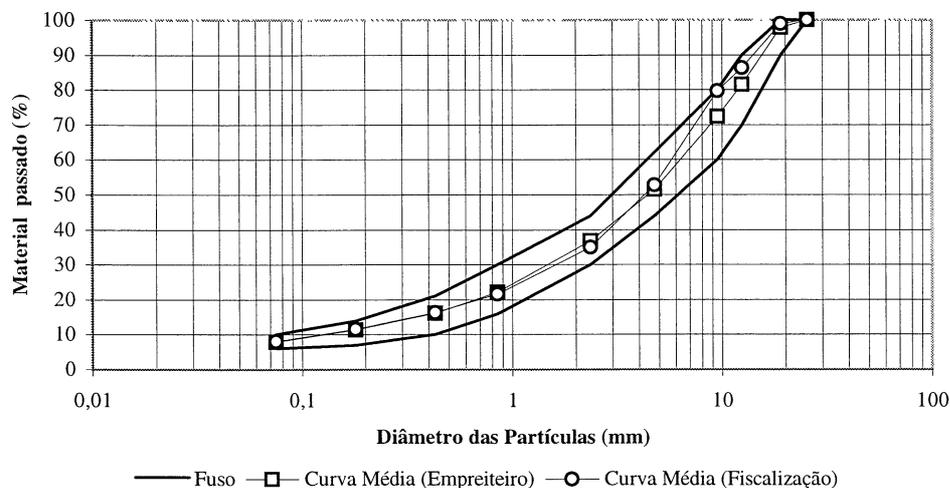


FIGURA 19 - CURVAS MÉDIAS DA MISTURA DE AGREGADOS DETERMINADAS PELO EMPREITEIRO E PELA FISCALIZAÇÃO E FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA

Uma das explicações possíveis para os resultados observados é a variação das granulometrias dos agregados ao longo da obra (detectada pelos ensaios realizados pelo empreiteiro, como se viu). Dado que o número de amostras ensaiadas pela fiscalização foi relativamente pequeno, aquela variação tende a reflectir-se mais no valor médio, dando origem a uma “curva média” de pior qualidade. Além disso, a amostragem feita pode ter coincidido com períodos de variação importante nas granulometrias dos materiais de pedreira. No entanto, os valores determinados pela fiscalização apresentam menor variabilidade que os do empreiteiro. No caso presente, usou-se como medida dessa variabilidade média o somatório dos valores do coeficiente de variação (QUADRO 13). Assim, para as curvas obtidas pelo empreiteiro obteve-se o valor de 81,4 e para as resultantes dos ensaios efectuados pela fiscalização o valor de 66,5.

Uma outra razão que pode explicar o sucedido é a existência de erro sistemático nos resultados do empreiteiro ou da fiscalização. Tratando-se de análises granulométricas, cuja realização é simples e corrente, esta explicação parece pouco verosímil.

O QUADRO 14 mostra os limites dos intervalos admissíveis pelo projecto, bem como os valores máximos e mínimos determinados, e os limites dos intervalos, centrados na média, correspondentes a 95 % das ocorrências. Verifica-se que ocorreram situações de cumprimento e de incumprimento

dos limites do projecto. Além disso, é possível observar que o intervalo, centrado na média, que corresponde a 95 % das observações tem maior amplitude que os limites preconizados pelo projecto.

QUADRO 14- VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E DE REFERÊNCIA, E INTERVALOS PARA 95 % DAS OBSERVAÇÕES

Peneiro Malha (mm)	1"	3/4"	1/2"	3/8"	nº4	nº8	nº20	nº40	nº80	nº200
	25,4	19,0	12,5	9,5	4,75	2,36	0,85	0,43	0,18	0,075
Curva de Referência	100,0	99,0	81,1	69,1	49,5	35,2	21,3	15,6	11,0	7,7
Tolerância de projecto (máximo)	---	---	---	---	53,5	38,2	---	17,6	---	8,7
Tolerância de projecto (mínimo)	---	---	---	---	45,5	32,2	---	13,6	---	6,7
Máximo Observado	---	---	---	---	57,8	39,8	---	18,6	---	9,2
Mínimo Observado	---	---	---	---	45,5	30,5	---	13,9	---	7,4
Int. para 95 % observações (limite superior)	100,0	102,6	90,0	81,9	60,9	41,9	27,5	19,8	13,9	9,5
Int. para 95 % observações (limite inferior)	100,0	93,0	73,1	62,7	44,8	27,9	16,9	12,9	9,0	6,8

Na FIGURA 20 representam-se, para as curvas obtidas pelo empreiteiro e pela fiscalização, os limites dos intervalos, centrados na média, correspondentes a 95 % das observações. Mais uma vez é patente, acima da dimensão nominal de 5 mm, o desvio para cima das curvas obtidas pela fiscalização em relação às determinadas pelo empreiteiro.

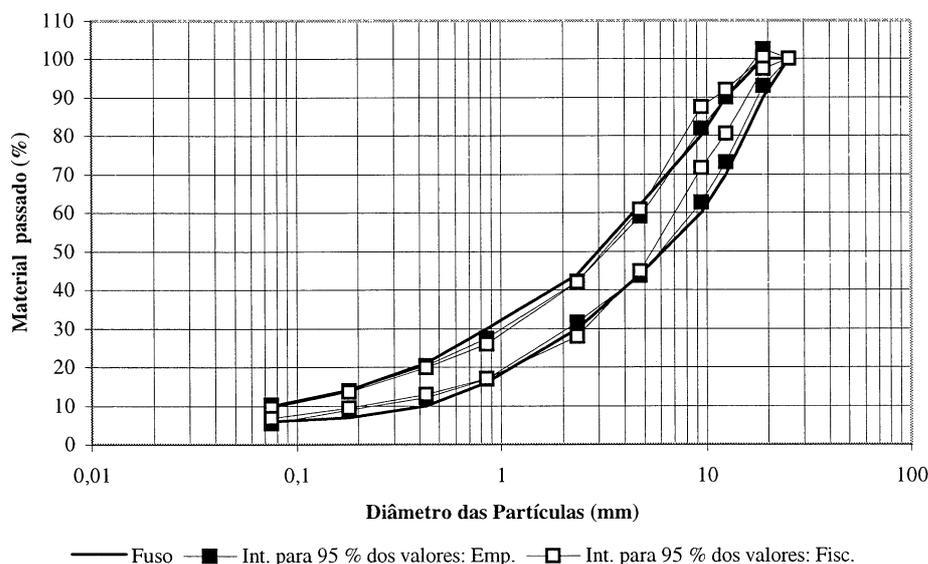


FIGURA 20 - FUSO GRANULOMÉTRICO DE REFERÊNCIA E INTERVALO PARA 95% DOS VALORES

A FIGURA 21 permite verificar que para os peneiros números 4, 40 e 200 foi respeitado o limite mínimo de projecto em todos os ensaios realizados. Não foram respeitados os limites em 50 % das vezes para os peneiros números 4 e 8, e em 33 % das vezes para os peneiros números 40 e 200. Como se viu, o projecto estabelece tolerâncias mais restritivas que o CEJAE98.

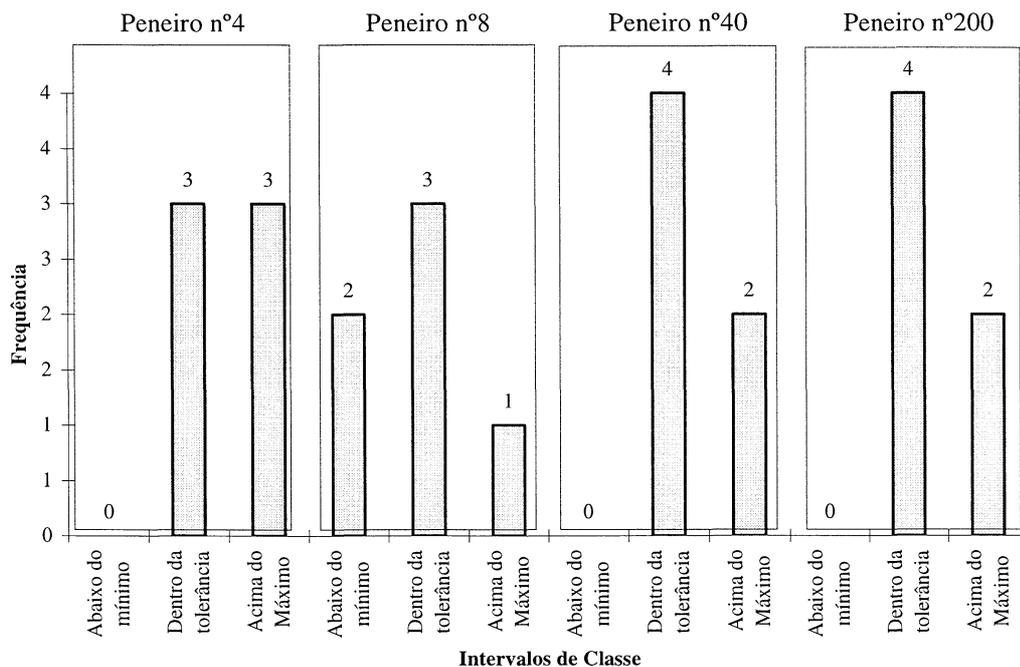


FIGURA 21 - % DE PASSADOS: NÚMERO DE OBSERVAÇÕES DENTRO E FORA DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA DO PROJECTO

Tal como se fez para as granulometrias determinadas pelo empreiteiro, calcularam-se os limites correspondentes aos percentis 95 % e 5 %. Na FIGURA 22 representam-se as referidas curvas sobrepostas ao fuso de referência e à média das observações.

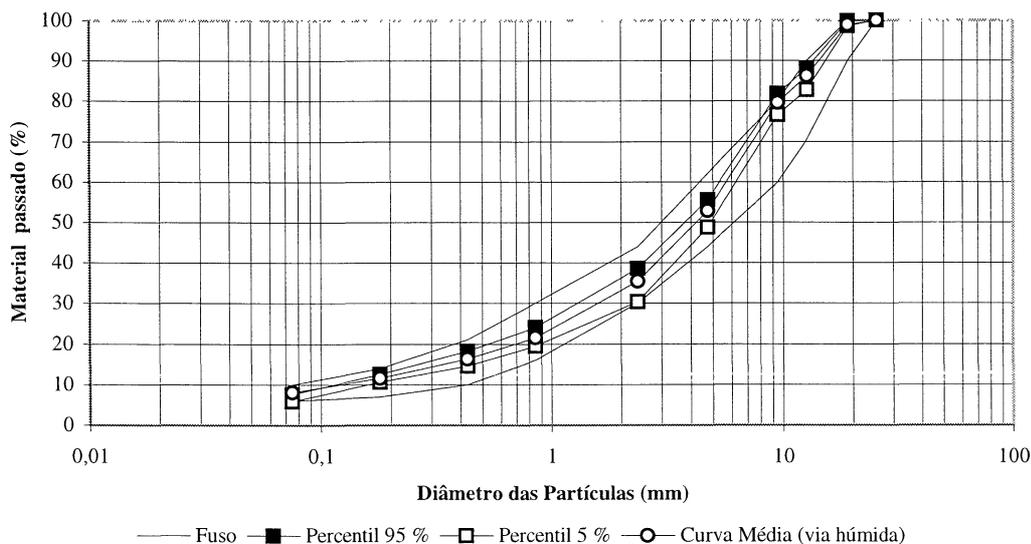


FIGURA 22 - CURVA MÉDIA, FUSO DE REFERÊNCIA E PERCENTIS 5% E 95 % (FISCALIZAÇÃO)

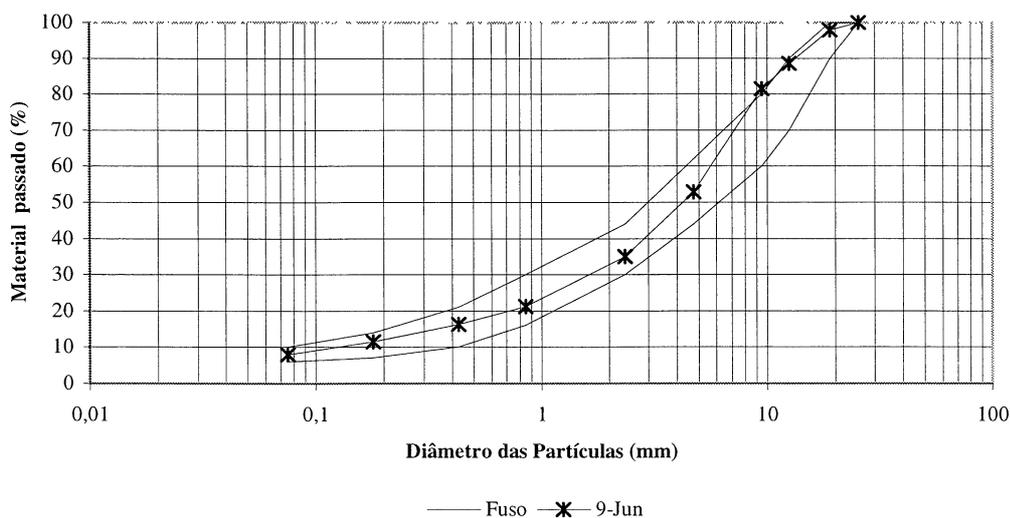


FIGURA 23 - FUSO DE REFERÊNCIA E CURVA OBSERVADA EM 9 JUNHO

Resulta do anteriormente exposto que, tal como se concluiu para as curvas granulométricas determinadas pelo empreiteiro, grande parte das observações feitas pela fiscalização resultou em curvas dentro dos limites do fuso. Contudo, traçando todas as curvas determinadas pela fiscalização, verifica-se que, em geral, o andamento daquelas no interior do fuso não é tão adequado como os obtidos para as observações feitas pelo empreiteiro.

A FIGURA 23 ilustra o pior caso detectado por observação do andamento de todas as curvas, isto é, aquele em que o traçado da curva granulométrica determinada pela fiscalização mais se desvia do andamento geral do fuso. Como se observa, embora não seja uma curva de grande qualidade, pode considerar-se aceitável o seu traçado. Foram detectados 3 casos destes (9 Jun., 9 Jul. e 12 Jul.) em 6 observações realizadas. Mais uma vez se observa que os limites do fuso do CEJAE98 são respeitados.

3.2.2- Percentagem de Betume

A percentagem de betume foi também determinada pelo método do extractor de Kumagawa. Os valores assim determinados são os que se indicam no QUADRO 15.

QUADRO 15 - PERCENTAGENS DE BETUME OBTIDAS PELA FISCALIZAÇÃO

Data	% betume	Data	% betume	Data	% betume
9-Jun	5,7	16-Jun	5,5	9-Jul	5,6
9-Jul	5,7	28-Jun	5,3	12-Jul	5,3
9-Jun	5,7	30-Jun	6,0	12-Jul	5,4
9-Jun	5,8	30-Jun	6,0	9-Ago	5,2
17-Jun	5,6	2-Jul	5,8	1-Set	5,2
16-Jun	5,8	9-Jul	5,3		
				<i>Média</i>	5,58
				<i>Desvio-padrão</i>	0,26
				<i>C.V. (%)</i>	4,7
				<i>Máximo valor</i>	6,0
				<i>Mínimo valor</i>	5,2

O valor médio de 5,58 % cai fora dos limites estabelecidos (5,1 a 5,5 %), verificando-se ainda que existe uma amplitude relativamente grande para o intervalo onde os valores estão compreendidos (5,2 a 6,0 %). A FIGURA 24 mostra o número de ocorrências em que a percentagem de betume ficou dentro e fora do intervalo de tolerância. Verifica-se-se que em 59 % das observações, o valor da percentagem de betume obtida está fora dos limites definidos no projecto, apresentando tendencialmente excesso de betume. De referir que o controlo realizado incidiu particularmente no início da obra, período durante o qual se verificou um desvio importante na afinação do processo de fabrico em central. Os valores determinados de 12 de Julho em diante estão dentro do intervalo exigido e confirmam, em termos gerais, os resultados do empreiteiro.

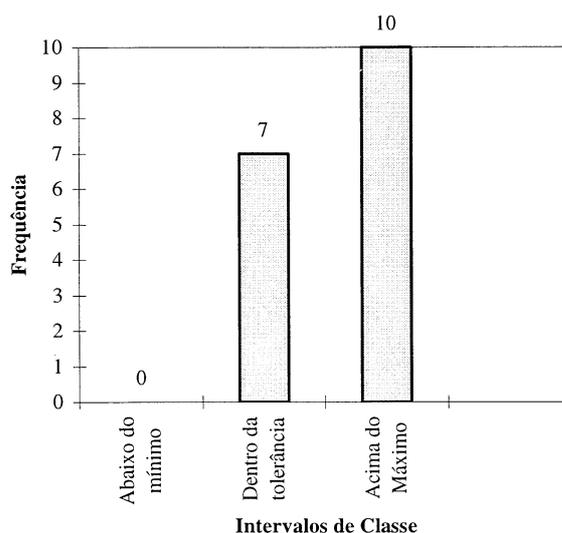


FIGURA 24 - % DE BETUME: NÚMERO DE OBSERVAÇÕES DENTRO E FORA DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA

3.2.3- Baridade

As baridades determinadas sobre as amostras recolhidas do pavimento durante a sua construção são as que se indicam no QUADRO 16. Para a sua determinação foi seguido o método proposto pela norma ASTM D 2726 (do tipo “provete saturado com a superfície seca”).

QUADRO 16 - BARIDADES (g/cm³) DETERMINADAS PELA FISCALIZAÇÃO

Data	baridade	Data	baridade	Data	baridade	
9-Jun	2,37	16-Jun	2,40	9-Jul	2,39	
9-Jul	2,37	16-Jun	2,40	9-Jul	2,40	
9-Jun	2,34	16-Jun	2,40	12-Jul	2,40	
9-Jun	2,36	16-Jun	2,40	12-Jul	2,41	
9-Jun	2,38	30-Jun	2,40	12-Jul	2,40	
9-Jun	2,34	30-Jun	2,41	12-Jul	2,41	
9-Jun	2,32	30-Jun	2,40	1-Set	2,39	
9-Jun	2,37	30-Jun	2,41	1-Set	2,40	
					<i>Média</i>	2,39
					<i>Desvio-padrão</i>	0,02
					<i>C.V. (%)</i>	1,0
					<i>Máximo valor</i>	2,40
					<i>Mínimo valor</i>	2,32

Comparando os valores médios obtidos pela fiscalização (2,39 g/cm³) e pelo empreiteiro (2,37 g/cm³), verifica-se que são próximos e, por isso, as afirmações feitas a respeito da baridade em 3.1.3 mantêm-se válidas.

3.2.4- Estabilidade e Deformação Marshall

A estabilidade Marshall determinada nos ensaios de controlo da obra apresentou os valores indicados no QUANDO 17.

QUADRO 17 - ESTABILIDADE MARSHALL (N) DETERMINADA PELA FISCALIZAÇÃO

Data	Estabilidade	Data	Estabilidade	Data	Estabilidade	
9-Jun	16239	16-Jun	15905	12-Jul	19747	
9-Jun	15582	30-Jun	20178	12-Jul	18238	
9-Jun	7732	30-Jun	18728	12-Jul	16190	
9-Jun	14700	30-Jun	15778	12-Jul	18747	
16-Jun	19228	30-Jun	18689	1-Set	15082	
16-Jun	17346	9-Jul	15758	1-Set	16248	
16-Jun	14974	9-Jul	16768			
					<i>Média</i>	16593
					<i>Desvio-padrão</i>	2684
					<i>C.V. (%)</i>	16,2
					<i>Máximo valor</i>	20178
					<i>Mínimo valor</i>	7732

Analisando o QUADRO 17, verifica-se que o valor médio da estabilidade é superior ao limite mínimo de 16000 N preconizado pelo CEJAE98. Contudo, é um pouco inferior à estabilidade média medida pelo empreiteiro. Além disso, em 40 % das observações foram medidas estabilidades inferiores a 16000 N. Estes resultados mostram que a mistura é pouco estável num número significativo de observações. Pensa-se que o excesso de betume utilizado numa fase inicial dos trabalhos poderá estar na origem do fenómeno verificado.

Os valores da deformação que constam do QUADRO 18 foram medidos no instante da rotura dos provetes, correspondendo, por isso, aos valores da estabilidade indicados no QUADRO 17.

QUADRO 18 - DEFORMAÇÃO MARSHALL (mm) DETERMINADA PELA FISCALIZAÇÃO

Data	Deformação	Data	Deformação	Data	Deformação
9-Jun	8,0	16-Jun	5,6	12-Jul	6,0
9-Jun	6,7	30-Jun	6,1	12-Jul	5,8
9-Jun	6,0	30-Jun	6,4	12-Jul	4,9
9-Jun	5,0	30-Jun	5,1	12-Jul	5,2
16-Jun	4,8	30-Jun	7,0	1-Set	4,9
16-Jun	5,4	9-Jul	4,3	1-Set	5,0
16-Jun	5,1	9-Jul	5,0		
<i>Média</i>					5,6
<i>Desvio-padrão</i>					0,90
<i>C.V. (%)</i>					16,0
<i>Máximo valor</i>					8,0
<i>Mínimo valor</i>					4,3

Verifica-se que a deformação média (5,6 mm) tem um valor substancialmente mais elevado que o máximo proposto pelo CEJAE98 (4 mm) e que o obtido pelo empreiteiro (3,9 mm). Em todos os casos foram medidas deformações acima de 4 mm. Mais uma vez, parece verificar-se o efeito do excesso de betume na mistura. Uma outra razão para o ocorrido pode ser a dificuldade em definir o instante da rotura neste tipo de misturas. De facto, acontece verificar-se um patamar no valor da força de rotura, enquanto a deformação continua a subir. Um operador não alertado para este facto pode ser levado a registar a deformação correspondente ao instante de descida do valor da força e não o relativo ao momento em que se atinge a força máxima. Um procedimento deste tipo pode levar à obtenção de deformações anormalmente elevadas.

4. CONCLUSÕES

No presente relatório foram apresentados e analisados os ensaios de controlo de qualidade realizados pelo empreiteiro durante a execução da obra até 30 de Setembro de 1999. Essa análise estendeu-se à verificação, por amostragem, feita pela fiscalização.

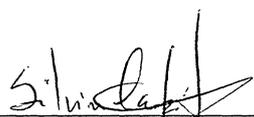
Após uma observação mais cuidada dos valores apresentados é possível apresentar as seguintes conclusões:

- As curvas granulométricas das misturas apresentaram alguma variabilidade ao longo da obra, sendo previsível uma influência sensível no desempenho da mistura, isto é, poderá esperar-se também alguma variabilidade no desempenho estrutural do material ao longo do troço construído. No entanto, de acordo com o CEJAE98, uma percentagem muito significativa de curvas observadas cumpre os requisitos. O mesmo não acontece se a referência forem os definidos no projecto. Pensa-se que apenas a realização de ensaios de caracterização mecânica poderá esclarecer sobre os efeitos dessa variabilidade.
- A percentagem de betume está, em termos médios, dentro do intervalo de tolerância estabelecido em torno da percentagem adoptada (5,3 %). Foram, no entanto, detectados alguns casos (empregado: 19 %; fiscalização: 59 %) em que foi utilizado um excesso de betume, o qual poderá reduzir bastante a capacidade estrutural da mistura, nomeadamente a sua resistência à deformação permanente.
- A baridade medida sobre as amostras recolhidas está dentro dos parâmetros esperados, tomando como termo de comparação os valores de referência obtidos durante os estudos de formulação laboratorial.
- A estabilidade Marshall determinada ao longo da obra está, em geral, acima dos mínimos preconizados no CAJAE98. No entanto, os valores obtidos ficam bastante abaixo dos medidos sobre provetes Marshall nos estudos de formulação. Uma explicação possível será o excesso de betume encontrado numa parte significativa das observações. Outra razão plausível será a variação das características do betume desde os estudos de formulação até à realização da obra. Com efeito, o betume usado na formulação cumpria a especificação LNEC E80-1997 relativa às características a exigir a um betume 10/20 (penetração: 10 a 20×10^{-1} mm; temperatura de amolecimento: 63 a 76°C). No entanto, o controlo das características do betume usado na obra feito pela fiscalização verificou que o betume era mais mole que o exigido naquela especificação (penetração: 12×10^{-1} mm; temperatura de amolecimento: 58 °C). Estes resultados comprovam os obtidos pelo LPAV (penetração: 15×10^{-1} mm; temperatura de amolecimento: 59 °C).

- A deformação Marshall não cumpriu o máximo imposto pelo CEJAE98 em 29 % dos casos analisados pelo empreiteiro e em 100% dos medidos pela fiscalização. É sabido que, dado o tipo de betume usado neste tipo de misturas, as deformações ocorridas até ao instante da rotura tendem a ser um pouco elevadas e que o instante da rotura pode ser difícil de determinar. Contudo, no caso presente, dado o número elevado de vezes em que o valor medido foi superior a 4 mm, pensa-se que o incumprimento das características do betume estará na origem dos valores obtidos.

5. BIBLIOGRAFIA

1. CAPITÃO, S., PICADO-SANTOS, L., *Empreitada de beneficiação das EENN 14, 104 e 105 - 1º Relatório Interno: Formulação da mistura betuminosa de alto módulo*, Laboratório de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 1999, 25 p.



Engº Silvino Dias Capitão
Doutorando do DEC da FCTUC
Prof. Adjunto do ISEC / IPC



Prof. Doutor Luís Picado Santos
Prof. Auxiliar do DEC da FCTUC
Coordenador do LPAV

