

COMPORTAMENTO DO MASTIQUE BETUMINOSO A TEMPERATURAS ELEVADAS: INFLUÊNCIA DO FÍLER E DO BETUME

Pedro Matos¹, Rui Micaelo² e Cátia Duarte³

¹²Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Campus da Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal

email: ² ruilbm@fct.unl.pt <http://www.dec.fct.unl.pt/>

³ Galp Energia, Rua Tomás da Fonseca, 1600-209 Lisboa, Portugal

Sumário

Este artigo apresenta um estudo reológico a temperaturas elevadas de mastiques fabricados com 6 betumes (2 puros e 4 modificados com SBS) e 3 fíleres (2 calcários e cal), para duas relações fíler/betume (ponderal fixa e relação volumétrica função das propriedades do fíler). Os mastiques foram caracterizados com ensaios de penetração, temperatura de amolecimento e viscosidade dinâmica, a diferentes temperaturas e taxas de corte. Diferentes metodologias propostas na literatura para a determinação das temperaturas de mistura e compactação de betumes modificados foram implementadas para quantificar a influência do betume e do fíler nas duas fases do processo construtivo.

Palavras-chave: mastique betuminoso; fíler; betume modificado; temperatura; viscosidade.

1 INTRODUÇÃO

O mastique betuminoso é habitualmente referido como o produto da ligação do ligante betuminoso com as frações finas do agregado mineral. Este elemento assume um papel de matriz na mistura betuminosa, com comportamento visco-elásto-plástico, em que a primeira função é envolver e manter ligados os agregados mais grossos, considerados elementos elásticos embebidos no mastique, e secundariamente o de preencher os vazios existentes no esqueleto mineral, garantir compactidade, impermeabilidade e trabalhabilidade às misturas betuminosas [1, 2].

A inclusão de partículas minerais na matriz de betume conduz ao aumento da rigidez do conjunto, relacionado principalmente com a concentração, cujo estudo se iniciou no princípio do século XX [3]. No agregado mais fino destaca-se o fíler pelas suas propriedades químicas e físicas, tais como a forma e tamanho das partículas, a energia de superfície, etc. A ligação fíler-betume depende da absorção e adsorção de determinados grupos de elementos do betume na interface. Os fíleres ricos em sílica têm ligações de adsorção mecânicas fracas por forças de Van der Waals enquanto os fíleres ricos em óxidos de cálcio providenciam uma ligação química forte. A ligação influencia o comportamento do mastique e, conseqüentemente, as misturas betuminosas, nomeadamente o teor ótimo em betume, a durabilidade, o comportamento mecânico e a trabalhabilidade [3, 4]. As especificações de materiais de pavimentação utilizados maioritariamente na Europa e nos EUA definem relativamente ao fíler simplesmente a origem e granulometria do material e o intervalo da relação fíler-betume (f/b) na mistura betuminosa. Em Portugal, a empresa Estradas de Portugal, S.A. no âmbito da revisão do Caderno de Encargos Tipo Obra [5] procedeu a alterações nas especificações do fíler, quer nas características do material quer na relação f/b a incorporar na mistura betuminosa. O Quadro 1 resume as especificações do Caderno de Encargos anterior [6], da ex-Junta Autónoma de Estradas (JAE), e o atual. Presentemente, a relação volumétrica f/b é determinada com a expressão seguinte:

$$\frac{f}{b} = \frac{(100 - v) \times \Delta T_{ab}}{1021,2 + \Delta T_{ab} \times v} \quad (1)$$

Em que f/b é a relação volumétrica filler-betume (%); v é o volume de vazios do filler seco compactado (ou índice de vazios de Rigden) (%); ΔT_{ab} é o aumento da temperatura de amolecimento (betume para mastique) (°C). Esta expressão foi desenvolvida no Centro de Investigação Rodoviária Belga (BRRC) para prever o endurecimento do mastique com o filler, no qual concluíram que o comportamento das misturas betuminosas é otimizado quando o mastique apresenta um aumento na temperatura de amolecimento entre 12 e 16 °C [7].

Quadro 1. Resumo das especificações para o filler em misturas betuminosas [5, 6]

Material	a) recuperado b) comercial (calcário; cimento tipo Portland; cinzas volantes; cal hidráulica)
JAE (anterior)	- relação ponderal f/b : 1,1-1,5 ou 1,3-1,5 função da mistura - se agregado granítico, mínimo 3% filler comercial ou 2% cal hidráulica - granulometria (mm): 0,475 (100%); 0,180 (95-100%); 0,075 (75-100%)
EP (atual)	- relação volumétrica f/b : valor médio de f/b determinado com ΔT_{ab} 12 e 16 °C - granulometria (mm): 2 (100%); 0,125 (85-100%); 0,063 (70-100%)

Relativamente aos betumes utilizados em misturas betuminosas tem existido um incremento forte na utilização de betumes modificados nas duas últimas décadas. Anteriormente os aditivos incorporados visavam mais a melhoria do comportamento mecânico (resistência à fadiga, às deformações permanentes e ao envelhecimento) enquanto atualmente existe uma procura crescente por aditivos para a redução da temperatura de fabrico, por motivos ambientais e económicos [8, 9]. Em 2011 na Europa os betumes modificados com polímeros corresponderam a 10% da produção total de betume para pavimentação [10], havendo países em que atinge 74% [8].

O comportamento das misturas betuminosas no pavimento em serviço depende da correta formulação dos materiais constituintes e dos processos de fabrico e pavimentação. Estes últimos pontos dependem grandemente da viscosidade do ligante betuminoso, dependente do tipo de ligante e da temperatura, a qual influencia a qualidade do envolvimento das partículas de agregado na central de fabrico e a obtenção de uma estrutura compacta durante a compactação em obra [11-13].

Santos [14] estudou a aplicação de vários métodos propostos por outros investigadores para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados com SBS (estireno-butadieno-estireno), a partir de betumes refinados em Portugal e Espanha. O Quadro 2 apresenta as condições de caracterização da relação viscosidade-temperatura do betume, utilizando um viscosímetro rotativo, para a determinação das temperaturas de operação no método tradicional (Superpave) e em dois outros métodos desenvolvidos para betumes modificados e que determinaram temperaturas mais próximas das recomendadas. O HSRV-E corresponde ao método da viscosidade à taxa de corte elevada (versão evolução) e o ZSRV-S ao método da viscosidade à taxa de corte zero (versão simplificação). Ambas as metodologias se baseiam no comportamento não-Newtoniano dos betumes modificados, em que a viscosidade varia com a temperatura e a taxa de corte. A relação da viscosidade com a taxa de corte, com temperatura constante, é habitualmente expressa por meio do modelo de Cross, a partir da equação seguinte:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (K\dot{\gamma})^m} \quad (2)$$

Em que η é a viscosidade (Pa.s) à taxa de corte $\dot{\gamma}$ (s^{-1}); η_{∞} é a viscosidade à taxa de corte infinita (Pa.s); η_0 é a viscosidade à taxa de corte zero (Pa.s); k e m são constantes. A constante m indica a dependência da taxa de corte (0 para comportamento Newtoniano) e k tem dimensão de tempo e define o início do comportamento pseudoplástico (*shear-thinning*) [15].

Baseado nos resultados de um projeto de investigação realizado nos EUA sobre novos métodos de caracterização e especificação do filler (NCHRP Project 9-45), Bahia [16] propõe a imposição de um limite para a viscosidade do mastique considerando os requisitos de trabalhabilidade da mistura, a qual mostrou depender da viscosidade do betume e dos vazios de Rigden do filler. Foi estabelecido como valor limite 5 vezes o valor da viscosidade do betume (viscosidade dinâmica medida com viscosímetro rotativo a 135°C e com taxa de corte de $6,8 s^{-1}$; relação ponderal f/b unitária).

Quadro 2. Metodologias para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação [14]

Metodologia	Condições		Viscosidade (Pa.s)	
	Temperatura (°C)	Taxa de corte (s ⁻¹)	Fabrico	Compactação
Superpave	135 & 165	6,8	0,17±0,02	0,28±0,03
HSRV-E	135 & 165	500	0,275±0,03	0,550±0,06
ZSRV-S	120, 135 & 165	6,8	0,750±0,05	1,40±0,10 ou 1,10±0,20

Este artigo apresenta e discute os resultados de um programa experimental realizado com o objetivo de avaliar o efeito do fíler e do betume, incluindo a modificação com SBS, no comportamento do mastique no intervalo de temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas. O programa envolveu a avaliação do comportamento reológico, de diferentes betumes e mastiques, com medição da penetração, da temperatura de amolecimento e da viscosidade dinâmica, em diferentes condições.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste estudo foram utilizados dois betumes de classes de penetração diferente (35/50 e 50/70), provenientes da refinaria de Matosinhos, e modificados com o polímero SBS. Foram fabricados mastiques com os diversos betumes e três fíleres diferentes, para duas relações fíler/betume de acordo com as especificações JAE e EP.

Relativamente aos fíleres utilizados no trabalho, dois provêm da moagem direta de calcário (Eurocalcio) e o terceiro é cal hidráulica natural tipo NHL5 (Secil). O Quadro 3 apresenta as características dos fíleres com base nas fichas técnicas de produto [17, 18]. Os fíleres RC 480 e RC 590 são obtidos na mesma pedra mas têm granulometria diferente (mais fino o RC 480). A origem e a granulometria são as duas variáveis relativas ao fíler em análise no trabalho. O índice de vazios de Rigden relativo ao RC 590 não foi fornecido enquanto no caso da cal a ficha técnica indica somente a classe de acordo com a norma de ensaio (28/45).

Os betumes modificados com SBS foram produzidos com 2 e 4% de polímero, relativo à massa total, e adicionado um aditivo para estabilização (extracto aromático NF100), em conformidade com o procedimento de modificação do laboratório NIDIN (Galp). O SBS é um polímero elastómero termoplástico que quando adicionado ao betume aumenta a flexibilidade e a ductilidade a baixas temperaturas. As misturas betuminosas apresentam maior resistência à fadiga e às deformações permanentes [12, 19]. Neste documento, os betumes são expressos pela classe de penetração do betume puro (35/50 ou 50/70), e no caso dos modificados é adicionado “P”, seguido do conteúdo em polímero. Como exemplo, “35/50 P2” corresponde a um betume da classe de penetração 35/50 modificado com 2% de polímero.

Quadro 3. Características dos fíleres [17, 18]

Fíler	Granulometria (% passado)			Finura – método de Blaine (cm ² /g)	Densidade das partículas (Mg/m ³)	Vazios de Rigden (%)
	2 mm	0,125 mm	0,063 mm			
RC 480	100-100	100-98	88,5-78,5	3680	2,71	32
RC 590	100-100	99-98	95-85	4190	2,68	-
NHL5	100-100	100-90	75-85	5000-6400	2,70-2,90	28-45

Quadro 4. Relações fíler-betume utilizadas no programa experimental

Método	RC 480		RC 590		NHL5	
	f/b (M)	f/b (V)	f/b (M)	f/b (V)	f/b (M)	f/b (V)
JAE	1,20		1,20		1,20	
EP	1,68	0,65	1,70	0,65	1,57	0,58

As amostras de mastique (1000 g) foram obtidas por mistura do fíler no betume a 150-165 °C durante 30-45 min. Os 18 mastiques (6 betumes x 3 fíleres) foram produzidos com duas relações *f/b* diferentes de acordo com as especificações de materiais JAE e EP (Quadro 4). No primeiro caso (JAE) estabeleceu-se uma relação igual para todos os mastiques e próxima do limite inferior (1,2). No segundo caso (EP) as relações volumétricas foram estabelecidas como a média dos valores determinados com a Eq. (1) para ΔT_{ab} de 12 e 16 °C, admitindo que ambos os fíleres calcários têm igual índice de vazios de Rigden e a cal o valor médio do intervalo de valores

apresentados no Quadro 3. Os valores obtidos são bastante elevados, superiores aos máximos estabelecidos nas especificações JAE.

Os betumes e os mastiques foram caracterizados com os ensaios seguintes: penetração com agulha (NP EN 1426:2010); temperatura de amolecimento (NP EN 1427:2010); viscosidade dinâmica com viscosímetro rotativo (EN 13302:2010). A viscosidade foi medida em diferentes condições de temperatura (120, 135, 150, 165 e 180 °C) e de taxa de corte (3 a 5 valores) função dos limites mínimo e máximo de momento torsor aplicáveis com as hastes nº 21, 27 e 28.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização dos ligantes

O Quadro 5 apresenta os valores de penetração, da temperatura de amolecimento e o índice de penetração dos 6 betumes. Os betumes modificados têm um menor valor de penetração e um maior valor da temperatura de amolecimento que os betumes correspondentes antes da modificação conforme esperado, excetuando o 35/50 P2. Em geral, os betumes mais duros apresentam maior dificuldade com a dissolução do polímero e de homogeneização, principalmente com adições baixas do aditivo modificador [20].

De acordo com o anexo nacional da versão provisória da NP EN 14023 [21], os betumes P4 são classificados como PMB25/55-65 e o betume 50/70 P2 como PMB45/80-55 enquanto o 35/50 P2 não está em conformidade com nenhum dos tipos recomendados para utilização em Portugal.

Relativamente ao comportamento reológico a temperaturas elevadas, os resultados da medição da viscosidade dinâmica em diferentes condições de temperatura e de taxa de corte mostram que, conforme esperado, os betumes puros têm um comportamento Newtoniano e os betumes modificados um comportamento não-Newtoniano. A Figura 1 ilustra a diferença de comportamentos com apresentação do betume 50/70 antes e depois da modificação.

Quadro 5. Características dos betumes

Propriedade	Método ensaio	Não modificado		Modificado			
		35/50	50/70	35/50 P2	35/50 P4	50/70 P2	50/70 P4
Pen (0,1 mm)	EN 1426	41,5	62,5	42,3	39,9	52,9	42,7
T _{ab} (°C)	EN 1427	51,8	48,5	56,9	70,2	57,6	78,3
IP	EN 1426	-1,2	-1,1	0,0	2,3	0,7	3,7

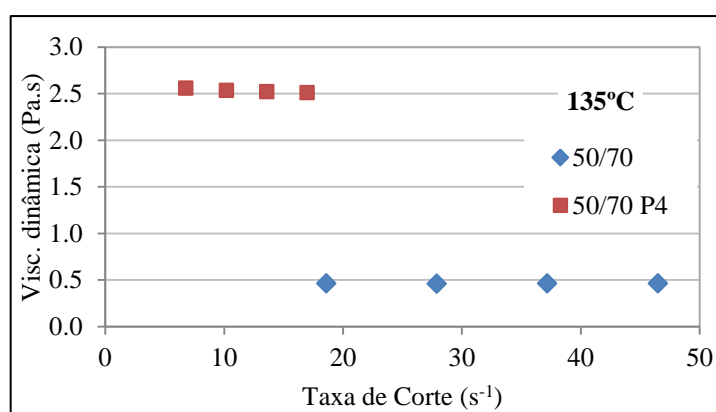


Figura 1. Betume: viscosidade dinâmica vs. taxa de corte (temperatura constante)

A variação da viscosidade com a taxa de corte para cada par betume-temperatura foi definida com o modelo de Cross a partir dos resultados experimentais, com o qual se determinaram as temperaturas de fabrico e compactação dos betumes modificados (Quadro 6) de acordo com os métodos apresentado na secção anterior (Quadro 2). As temperaturas obtidas para os betumes puros estão em conformidade com as recomendadas pelos produtores. Em relação aos betumes modificados, através do método Superpave obtém-se temperaturas muito

superiores às recomendadas enquanto os métodos HSRV-E e ZSRV-S determinam temperaturas, respetivamente superiores às recomendadas para os P4 e inferiores às recomendadas para os P2.

Quadro 6. Temperaturas de fabrico e compactação determinadas e recomendadas

		Não modificado		Modificado				
		35/50	50/70	35/50 P2	35/50 P4	50/70 P2	50/70 P4	
Recomendado	fabrico	150-165		160-175		155-170		
	compactação	140-150		155-165		150-165		
Determinado	Superpave	fabrico	165	159	184	201	181	199
		compactação	155	149	172	189	170	187
	HSRV-E	fabrico	-	-	172	189	168	186
		compactação	-	-	155	171	154	171
	ZSRV-S	fabrico	-	-	148	164	150	165
		compactação	-	-	140	155	142	157

3.2 Caracterização dos mastiques

Os Quadros 7 e 8 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de penetração e de temperatura de amolecimento dos mastiques fabricados de acordo com as duas formulações (especificações JAE e EP). Como esperado, verifica-se a redução da penetração e o aumento da temperatura de amolecimento relativo aos betumes. As variações relativas obtidas nos mastiques com a formulação EP são superiores visto que a dosagem de fíler é também superior. Os valores obtidos nos mastiques com os fíler RC480 e RC590, para o mesmo betume, são semelhantes apesar das diferenças granulométricas, e com variações relativas ao betume bastante inferiores às obtidas com a cal. O efeito da cal aumenta com o conteúdo adicionado, e apesar da formulação EP determinar uma relação f/b mais baixa relativamente aos fíleres calcários os valores de ΔPen e ΔT_{ab} aumentam em relação aos outros fíleres. Não obstante a relação f/b (formulação EP) ser calculada com o objetivo de obter ΔT_{ab} entre 12 e 16°C, apenas em 4 dos 24 mastiques estudados se obtiveram valores neste intervalo, com variação de 3°C (50/70 P2 + RC480) a 56°C (35/50 P4 + cal-NHL5).

Os resultados da medição da viscosidade dinâmica dos mastiques para cada par mastique-temperatura, com variação da taxa de corte, permitem concluir em todos os casos pelo comportamento não-Newtoniano. A Figura 2 ilustra a variação da viscosidade com a taxa de corte dos dois mastiques fabricados a partir dos betumes apresentados na Figura 1 e cal, no qual se identifica facilmente a dependência mais acentuada da taxa de corte. Este comportamento está de acordo com o concluído em [22]. O modelo de Cross foi implementado para expressar a variação da viscosidade com a taxa de corte, com temperatura constante, a partir dos resultados experimentais. No Quadro 9 apresentam-se os valores da viscosidade dinâmica dos betumes e dos mastiques a 135°C e à taxa de corte de $6,8s^{-1}$, e a viscosidade relativa dos mastiques com os betumes (η_b/η_m). Nas situações em que não foi possível a medição da viscosidade dinâmica à taxa de corte de $6,8s^{-1}$ os valores foram determinados a partir do modelo de Cross. A análise dos resultados permite concluir o seguinte:

- o comportamento dos mastiques é altamente dependente da interação fíler/betume; embora os betumes 50/70 P2 e 50/70 P4 apresentem viscosidades superiores aos betumes modificados da classe 35/50, os mastiques com betumes 35/50 apresentam viscosidades superiores; a cal NHL5 confere aos mastiques elevada rigidez, principalmente no caso dos betumes 35/50;
- os 2 fíleres calcários apresentam um poder de endurecimento semelhante apesar das diferenças granulométricas;
- a formulação EP não reduziu as diferenças de comportamento entre os mastiques com diferentes fíleres e igual betume; em mastiques com betumes modificados, o poder de endurecimento da cal relativamente aos restantes fíleres é muito semelhante apesar das diferenças nas relações f/b utilizadas;
- a viscosidade relativa dos mastiques diminui com a relação f/b ; para a relação ponderal fíler-betume unitária deverá cumprir-se a relação de viscosidade máxima (5) estabelecida por Bahia [16] como requisito de trabalhabilidade.

Quadro 7. Características dos mastiques (JAE: relação ponderal f/b fixa): penetração e temperatura de amolecimento

Propriedades	35/50			35/50 P2			35/50 P4		
	RC 480	RC 590	NHL5	RC 480	RC 590	NHL5	RC 480	RC 590	NHL5
Pen (0,1 mm)	28	31	22	24	24	20	22	21	18
Δ Pen (0,1 mm)	14	11	20	20	20	23	17	18	21
T_{ab} (°C)	57,9	56,9	61,4	60,4	61,4	71,6	94,6	95,4	94,4
ΔT_{ab} (°C)	6,1	5,1	9,6	3,5	4,5	14,7	24,4	25,2	24,2
Propriedades	50/70			50/70 P2			50/70 P4		
	RC 480	RC 590	NHL5	RC 480	RC 590	NHL5	RC 480	RC 590	NHL5
Pen (0,1 mm)	40	40	33	31	33	27	33	30	28
Δ Pen (0,1 mm)	22	23	29	22	20	26	10	13	15
T_{ab} (°C)	52,9	53,6	56,7	58,4	59,1	61,6	81,1	82,7	85,8
ΔT_{ab} (°C)	4,5	5,2	8,3	0,8	1,5	4	2,8	4,4	7,5

Quadro 8. Características dos mastiques (EP: relação f/b variável): penetração e temperatura de amolecimento

Propriedades	35/50			35/50 P2			35/50 P4		
	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5
Pen (0,1 mm)	21	22	19	21	21	18	16	16	14
Δ Pen (0,1 mm)	21	20	23	22	23	26	23	23	25
T_{ab} (°C)	61,1	62,6	66,6	66	72,7	97,7	101,7	102	126,4
ΔT_{ab} (°C)	9,3	10,8	14,8	9,1	15,8	40,8	31,5	31,8	56,2
Propriedades	50/70			50/70 P2			50/70 P4		
	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5
Pen (0,1 mm)	34	33	26	28	27	24	27	25	22
Δ Pen (0,1 mm)	29	30	36	25	26	29	16	18	21
T_{ab} (°C)	56,6	57,5	62,2	60,7	62	73,1	84,8	87	90,1
ΔT_{ab} (°C)	8,2	9,1	13,8	3,1	4,4	15,5	6,5	8,7	11,8

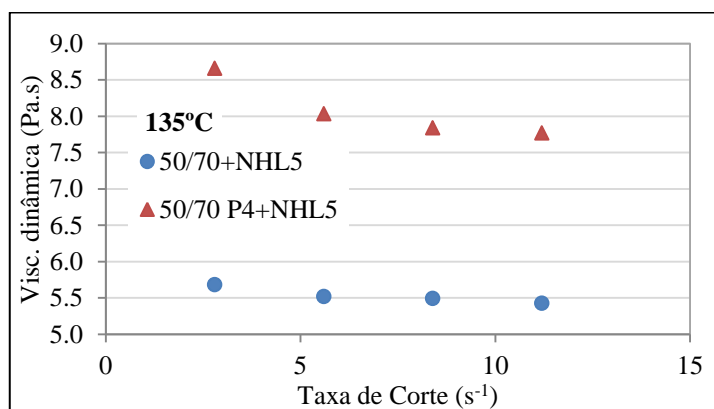


Figura 2. Mastique: viscosidade dinâmica vs. taxa de corte (temperatura constante)

Quadro 9. Viscosidade dinâmica (Pa.s) dos betumes e mastiques para 135 °C e 6,8 s-1

Fíler	Betume		Mastique - JAE		Mastique - EP	
	Tipo	η_b	η_m	η_b/η_m	η_m	η_b/η_m
RC 480	35/50	0,64	1,93	3,0	4,33	6,7
	50/70	0,46	1,66	3,6	3,09	6,7
	35/50 P2	1,18	4,14	3,5	7,55	6,4
	50/70 P2	2,10	7,79	3,7	18,87	9,0
	35/50 P4	1,32	3,23	2,5	5,28	4,0
	50/70 P4	2,56	5,40	2,1	9,53	3,7
RC 590	35/50	0,64	2,32	3,6	5,15	8,0
	50/70	0,46	2,32	5,0	3,54	7,7
	35/50 P2	1,18	4,60	3,9	8,83	7,5
	50/70 P2	2,10	8,04	3,8	21,64	10,3
	35/50 P4	1,32	3,52	2,7	6,28	4,8
	50/70 P4	2,56	6,12	2,4	11,15	4,4
NHL5	35/50	0,64	3,66	5,7	7,28	11,3
	50/70	0,46	2,63	5,7	5,51	11,9
	35/50 P2	1,18	8,09	6,8	16,33	13,8
	50/70 P2	2,10	16,18	7,7	-	-
	35/50 P4	1,32	5,04	3,8	8,94	6,8
	50/70 P4	2,56	8,59	3,4	17,73	6,9

3.3 Influência do fíler e do SBS nas temperaturas de fabrico e compactação

A avaliação da influência do fíler e do polímero SBS nas temperaturas de fabrico e compactação com a análise da variação da viscosidade dinâmica, recorrendo a gráficos ou às variáveis do modelo de Cross, é bastante difícil. Neste trabalho a avaliação baseou-se na variação de temperatura necessária para que todos os mastiques, com igual betume, apresentem a mesma viscosidade do mastique com viscosidade mais baixa à temperatura de fabrico ou compactação estabelecida para o betume de acordo com os vários métodos referidos na seção 1. Conforme se verifica no Quadro 9 os mastiques com o fíler RC480 apresentam as viscosidades mais baixas independentemente do betume utilizado, pelo qual foram selecionados como referência para o cálculo da variação de temperatura.

As Figuras 3 e 4 apresentam graficamente os resultados para os mastiques formulados de acordo com a especificação, respetivamente, JAE e EP; a variação de temperatura (ΔT) dos mastiques RC590 e cal-NHL5 é expressa por barras (eixo vertical principal/esquerda) em relação às temperaturas de fabrico (F) ou compactação (C) dos betumes, expressa por pontos (eixo vertical secundário/direita); o padrão de cor azul é relativo à operação de fabrico e o de cor vermelho à operação de compactação. É possível concluir o seguinte:

- as variações de temperatura (ΔT) são semelhantes nas operações de fabrico e compactação na generalidade das situações; em média, os mastiques com RC590 requerem variações de temperatura de 4°C (EP) e de 2°C (JAE) enquanto com a cal de 10°C, nas duas formulações, relativamente aos mastiques com fíler RC480;
- para igual relação f/b (formulação JAE) a variação de ΔT com o betume/fíler é semelhante nos métodos Superpave, HSRV-E e ZSRV-S; os mastiques com betumes 35/50 apresentam uma tendência decrescente de ΔT com o aumento do conteúdo de SBS enquanto nos mastiques com betumes 50/70 a variação de temperatura se mantém praticamente constante;
- na formulação EP (diferentes relações f/b) a variação de ΔT com o betume/fíler depende do método considerado na análise; para o fíler RC590, os métodos Superpave e ZSRV-S apresentam uma tendência decrescente de ΔT com o aumento do conteúdo de SBS; para a cal, o método Superpave determina valores de ΔT decrescentes com o conteúdo em SBS no caso dos betumes 35/50 e a tendência oposta no caso dos betumes 50/70; existe incremento de ΔT entre os fileres RC480 e RC590 da formulação JAE para EP nos três métodos enquanto nos casos RC480-cal e RC590-cal existe forte dependência do betume e do método considerado na análise.

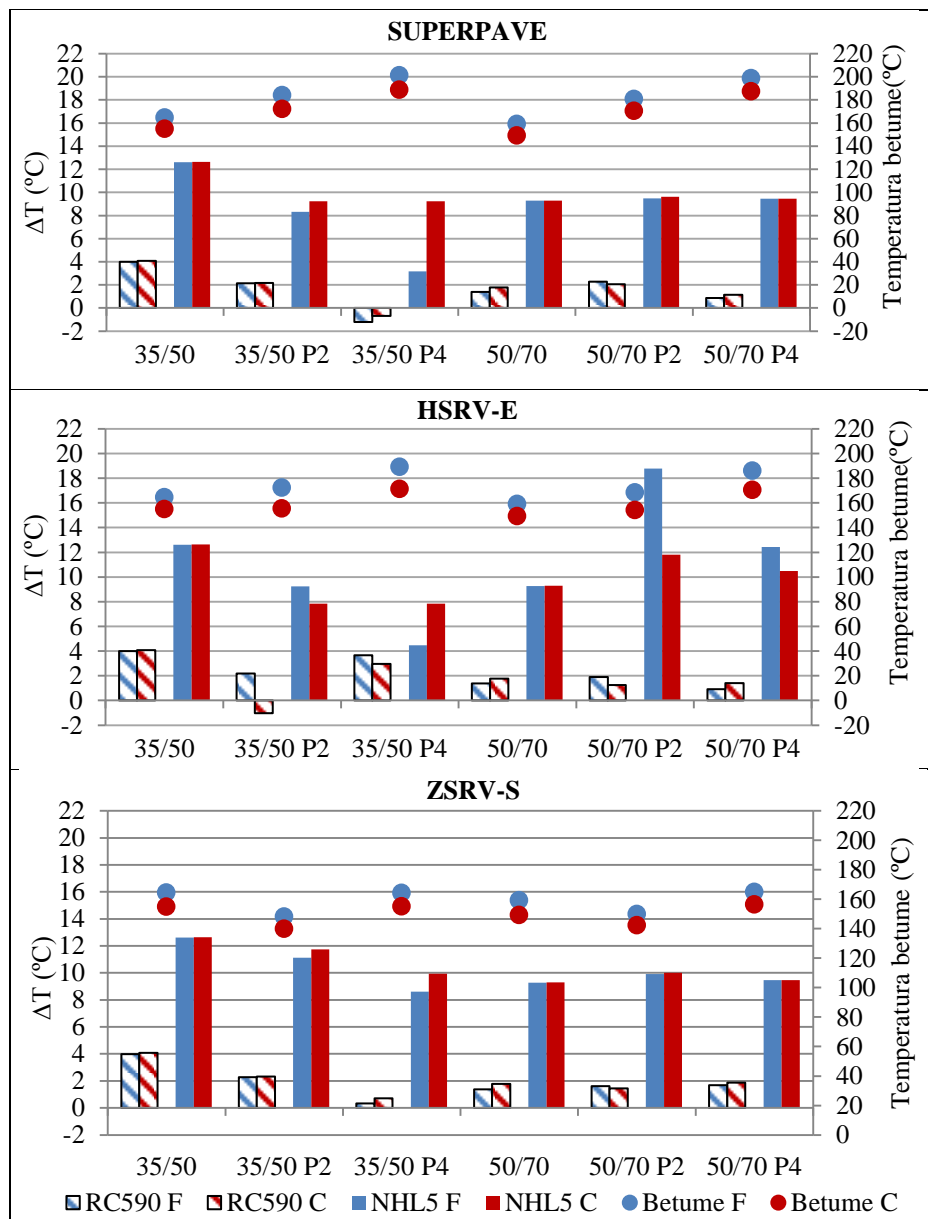


Figura 3. Variação das temperaturas de operação com o filer e o betume (especificações JAE)

4 CONCLUSÕES

As especificações atuais para os materiais de pavimentação não abordam adequadamente as condições de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados, ao qual acresce o efeito importante do filer. Este trabalho teve como objetivo o estudo da influência do filer e do SBS, enquanto aditivo modificador do betume, no comportamento do mastique a temperaturas elevadas. Apresenta-se o estudo reológico de 6 betumes (2 puros e 4 modificados com SBS) e de 24 mastiques (6 betumes, 3 fileres) com ensaios de penetração, da temperatura de amolecimento e da viscosidade dinâmica em condições variadas de temperatura/taxa de corte. Os mastiques foram fabricados com duas relações f/b diferentes, em conformidade com as especificações dos cadernos de encargos da ex-JAE e da EP.

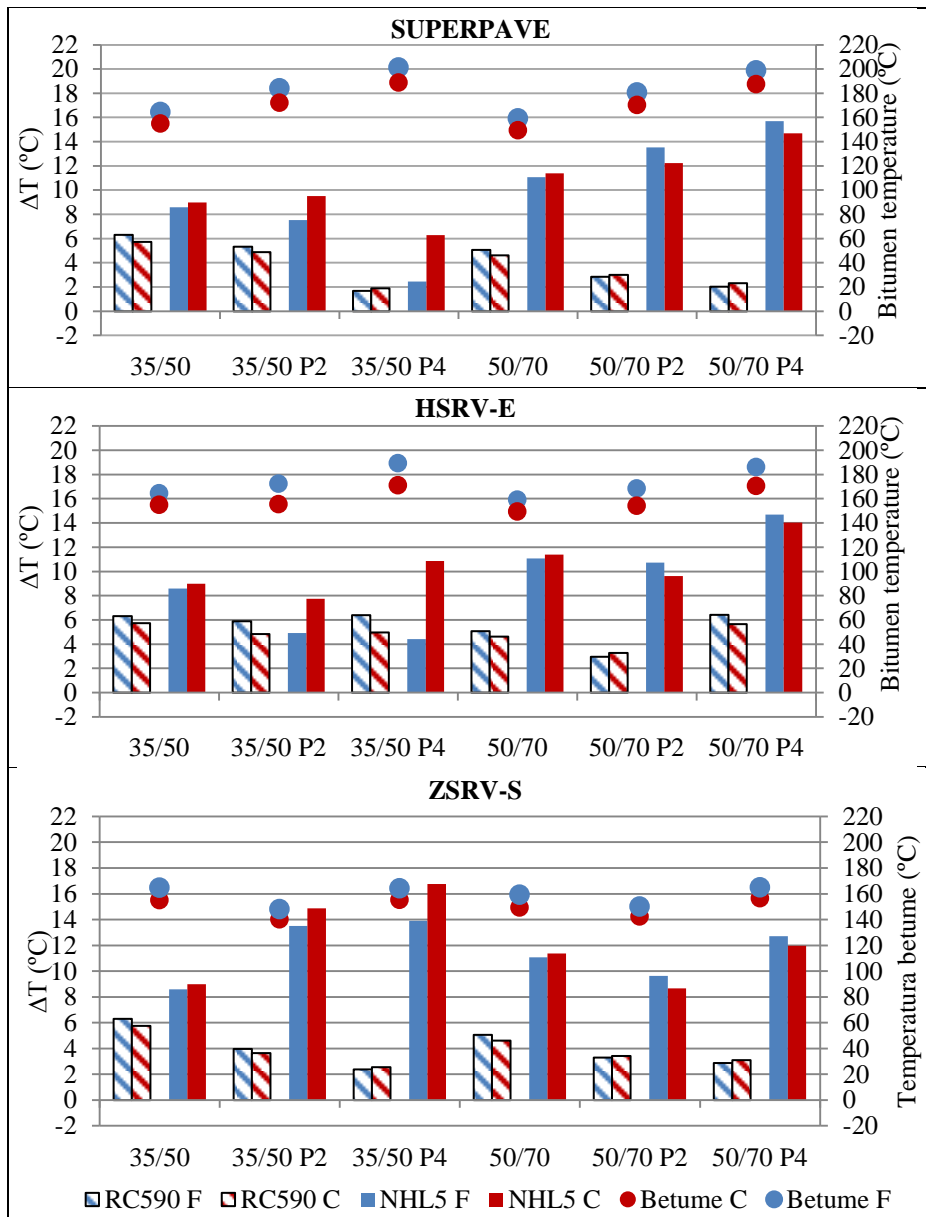


Figura 4. Variação das temperaturas de operação com o fíler e o betume (especificações EP)

Os resultados mostram que o comportamento do masticue é muito dependente da combinação fíler-betume. O betume da classe de penetração 50/70 apresentou forte reação com o polímero ao contrário do betume 35/50 pelo que os betumes modificados 50/70 apresentaram maiores viscosidades as altas temperaturas que os 35/50 modificados. No entanto, com a adição dos fíleres, os masticues com betumes 35/50 apresentaram viscosidades superiores aos equivalentes com betumes 50/70. A cal hidráulica natural NHL5 tem um poder de endurecimento muito elevado relativamente aos fíleres calcários. A diferença granulométrica dos dois fíleres calcários influencia apenas ligeiramente o comportamento.

As temperaturas de fabrico e compactação, determinadas com o método tradicional e 2 métodos alternativos desenvolvidos para betumes modificados, apresentam variações de até 10°C com alteração do fíler enquanto com a adição de SBS a variação pode atingir 25 a 35°C relativamente aos masticues com betumes não modificados.

As novas especificações dos materiais de pavimentação da EP, com a consideração do índice de vazios de Rigden dos fíleres, podem ser consideradas um avanço na formulação das misturas betuminosas. No entanto, os resultados não mostraram haver uma alteração das diferenças de comportamento entre mastiques com diferentes fíleres. Recomenda-se a realização de mais estudos com utilização de outros fíleres e betumes e a análise da integração das propriedades do betume na formulação da relação fíler/betume.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eurocalcio e à Secil pelo fornecimento dos fíleres utilizados no fabrico dos mastiques betuminosos.

6 REFERÊNCIAS

1. V. Bardini, L. Klinsky, and J.F. Jr., A Importância do Fíler para o Bom Desenvolvimento de Misturas Asfálticas, *Minerva*, 7(1) 71-78, 2009.
2. B.S. Underwood and Y.R. Kim, Experimental investigation into the multiscale behaviour of asphalt concrete, *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4) 357-370, 2011.
3. A. Faheem, *Modeling of asphalt mastic in terms of filler-bitumen interaction*, University of Madison-Wisconsin, USA, 2009.
4. H. Silva, *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique. Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas*, Universidade of Minho, 2005.
5. EP, *Caderno de Encargos Tipo Obra*, in 15.03 - *Pavimentação*, Estradas de Portugal, S.A., Portugal, 2009.
6. JAE, *Caderno de Encargos Tipo Obra*, in 15.03 - *Pavimentação*, Junta Autónoma de Estradas, Portugal, 1998.
7. L. Quaresma and M.d.L. Antunes, *Fíler granítico em misturas betuminosas*, in 62/02-NRP, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, 2002.
8. EAPA, *Asphalt in Figures 2011*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, 2012.
9. Y.R. Kim, *Modeling of Asphalt Concrete*, McGraw-Hill Professional, 2008.
10. Eurobitume, *European Bitumen Consumption Statistics 2011*, Eurobitume, Brussels, Belgium, 2012.
11. R. Micaelo, et al., Asphalt Compaction Study, *Road Materials and Pavement Design*, 12(3) 461-491, 2011.
12. J. Read and D. Whiteoak, *The Shell Bitumen Handbook*, 5th ed. London, Thomas Telford, 460,2003.
13. Y. Yildirim, J. Ideker, and P.E.D. Hazlett, Evaluation of Viscosity Values for Mixing and Compaction Temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(545-553), 2006.
14. A.F.R. Santos, *Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados*, Universidade Nova de Lisboa, 2011.
15. H.A. Barnes, J.F. Hutton, and K. Walters, *An Introduction to Rheology*, Amsterdam, Elsevier, 1989.
16. H. Bahia, *Test Methods and Specification Criteria for Mineral Filler Used in HMA*, in *NCHRP Project 9-45*, University of Wisconsin-Madison USA, 2010.
17. EUROCALCIO, *Fichas técnicas de produto*, Eurocalcio - Calcários e Inertes, SA, Fátima, Portugal, 2010.
18. SECIL, *Fíler comercial - Cal hidráulica natural NHL5 (Declaração de Conformidade CE)*, Secil Martingança, SA, Maceira, Portugal, 2010.
19. F. Branco, P. Pereira, and L.P. Santos, *Pavimentos Rodoviários*, 1ª ed. Coimbra, Almedina, 388,2006.
20. G.D. Airey, Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens, *Journal of Materials Science*, 39(3) 951-959, 2004.
21. CEN, *NP EN 14023 - Betumes e ligantes betuminosos. Quadro de especificações de betumes modificados com polímeros*, in *European Committee for Standardization* 2011.
22. G.D. Airey and D. Westwood, High temperature viscosity of polymer and filler modified binder systems, *Proc. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress* Vienna, Austria 2004.