

INFLUÊNCIA DO FÍLER NO COMPORTAMENTO DE MASTIQUES BETUMINOSOS



V. ANTUNES
Eng.º Civil
FCT-UNL
Monte da Caparica,
Portugal
vitorfsantunes@
gmail.com



A.C. FREIRE
Investigadora Aux.
LNEC
Lisboa; Portugal
acfreire@lnec.pt



L. QUARESMA
Professor Aux. Conv.
FCT-UNL
Monte da Caparica;
Portugal
lmtq@fct.unl.pt

SUMÁRIO

No âmbito de uma dissertação de mestrado realizada em parceria entre a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) sobre a caracterização de fileres para a utilização em misturas betuminosas, foram avaliadas as propriedades destes materiais, de forma a validar as que apresentam maior influência no comportamento dos mastiques e das misturas betuminosas, tendo sido estudada uma metodologia alternativa de avaliação da capacidade de incremento da viscosidade do mastique betuminoso. De forma a avaliar o efeito do filer no incremento da viscosidade do mastique betuminoso, estes foram avaliados com recurso ao ensaio de determinação da temperatura de amolecimento, sendo posteriormente calculada a variação desta temperatura em relação ao betume original. Neste estudo além de serem estudados os fileres tradicionais, que se encontram contemplados nas especificações utilizadas a nível nacional para estes materiais, foram também avaliados materiais alternativos, dado o interesse verificado ao longo dos últimos anos em aumentar a reutilização de subprodutos industriais e de resíduos de construção e demolição.

PALAVRAS-CHAVE

Fileres alternativos, Mastiques betuminosos, Poder absorvente, Temperatura de amolecimento

ABSTRACT

As part of a master's thesis in partnership between the Faculty of Science and Technology of the New University of Lisbon (FCT-UNL) and the National Civil Engineering Laboratory (LNEC) on the characterization of fillers for use in bituminous mixtures were evaluated the properties of these materials, in order to validate that have greater influence on the behavior of asphalt mastics and mixtures, and was studied an alternative methodology for evaluating the capacity of increasing the viscosity of the bituminous mastic. In order to evaluate the effect of fillers on the viscosity increase of the bituminous mastic, they were evaluated using the test for determining the softening temperature, and subsequently, this temperature variation calculated in relation to the original bitumen. In this study, traditional fillers are studied, which are included in the specifications used nationally for these materials, and were also evaluated alternative materials due the interest occurred over the last few years to increase the reuse of industrial by-products and construction and demolition waste.

KEYWORDS

Absorbing capacity, Alternative fillers, Bituminous mastic, Softening temperature

1. Introdução

O desempenho de uma mistura betuminosa em serviço está diretamente relacionada com a resistência ao fendilhamento, às deformações permanentes e à perda de ligação entre o agregado e o masticue, além de outros fenómenos de deterioração de um pavimento betuminoso, dependendo todos estes das propriedades de coesão e adesão do masticue betuminoso [1-5].

O masticue betuminoso é formado pela mistura entre o ligante betuminoso e o fíler, sendo este último o principal responsável pelo comportamento do masticue, desde a produção da mistura betuminosa até à construção da camada betuminosa. Este é um material muito fino, podendo ser natural, proveniente do pó produzido na britagem de agregado, industrial (e.g. cimento Portland), e ainda proveniente de materiais reciclados como apresentado neste trabalho.

O fíler, nas misturas betuminosas, representa uma percentagem pequena do volume total da mistura, dependendo da quantidade de betume utilizado. Este material desempenha duas funções fundamentais na mistura betuminosa, referindo-se a contribuição a nível estrutural como complemento do esqueleto pétreo e a promoção da interação com o ligante betuminoso presente na mistura [5].

A primeira função passa pelo preenchimento dos vazios deixados pelos agregados mais grossos, aumentando assim o número de contactos entre as partículas de agregado, o que leva a um consequente incremento da resistência mecânica. A segunda função passa pela interação entre o fíler e o ligante betuminoso, expressa por fenómenos de absorção/adsorção, ficando o fíler a pertencer à matriz ligante, modificando as propriedades do betume [6].

Deste modo, as propriedades do fíler contribuem para uma melhoria do comportamento dos masticues e consequentemente das misturas betuminosas que os incorporam, alterando as seguintes propriedades: comportamento mecânico, teor ótimo em betume, durabilidade e trabalhabilidade [5].

Como tal é necessária a realização de estudos das propriedades físicas e mecânicas dos fileres de modo a avaliar quais as características que mais influenciam o comportamento dos masticues e consequentemente das misturas betuminosas. Dado que, comumente o fíler aplicado em misturas betuminosas é o fíler comercial, usualmente de origem calcária, pretendeu-se com este estudo efetuar uma avaliação de um maior número de tipos de fileres comparando as suas propriedades com as de um fíler comercial de modo a promover a sua utilização. A introdução de novos tipos de fileres aparece assim como uma vantagem dado que constitui uma alternativa ao fíler comercial, sempre que este não está disponível, ou quando o seu transporte até ao local de obra implica um maior investimento económico.

Para além desta razão, devido às crescentes preocupações de reciclagem e valorização de resíduos, e tendo em consideração a meta proposta, na Diretiva 2008/98/EC, para o ano 2020 de 70% de materiais valorizados [7] foram introduzidos neste estudo fileres provenientes de resíduos de construção e demolição e de subprodutos industriais, entre os quais se destaca o fíler de RCD, o fíler de pó de tijolo, o fíler recuperado e as cinzas volantes.

Alguns destes tipos de resíduos, enquanto agregados reciclados, são usados como agregados grossos, com considerável resistência mecânica, podendo ser aplicados em camadas não ligadas de base de pavimentos, conforme apresentado no estudo realizado no âmbito do projeto de investigação SUPREMA – Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infraestruturas Rodoviárias [8]. No entanto, no processo de britagem para a obtenção destes materiais é, usualmente, produzida uma quantidade considerável de material com dimensões inferiores que podem ser obtidas através de um processo de despoeiramento e utilizadas como fíler.

Com este propósito, o estudo desenvolvido apresentou como objetivos principais a introdução de novos materiais de origem não tradicional como substitutos do fíler comercial; a avaliação das respetivas propriedades físicas, mecânicas e geométricas, comparando-as com as do fíler comercial; e ainda verificar quais as propriedades que produzem maior influência no comportamento do masticue betuminoso [5].

Assim, como principais tarefas desenvolvidas tendo em vista os objetivos apresentados, refere-se uma adequada seleção de diferentes tipos de fileres, em função da origem e com a definição das metodologias de caracterização laboratorial a serem realizadas, tendo em conta a normalização existente e a realização de ensaios de caracterização geométrica, física e mecânica dos diferentes tipos de fileres selecionados, além da posterior avaliação da introdução destes fileres em mastiques betuminosos.

2. Programa Experimental

2.1 Materiais

Para este estudo foram selecionados 9 fileres de diferentes origens, divididos em três classes: materiais de fabrico industrial, materiais provenientes da britagem de agregados e materiais provenientes de materiais reciclados. Quanto aos primeiros foram utilizados os seguintes materiais: cal hidratada (CHi) do tipo H100 da Lusical S.A. (do tipo CL-90S [9] com mais de 93% de Ca(OH)_2), cal hidráulica (CH) do tipo NHL5 de acordo com a norma NP EN 459-1 [9] e cimento de Portland Tipo I 52,5R (CP), ambos estes últimos da SECIL S.A..

A segunda classe de fileres é composta por um filer calcário (FC), sendo este um filer comercial para o qual o meio técnico nacional possui uma elevada experiência de utilização, cumprindo as especificações técnicas definidas no Caderno de Encargos Tipo Obra da Infraestruturas de Portugal (CETO) [10], constituindo assim uma referência para comparação dos resultados experimentais obtidos no estudo. Foi também estudado um filer recuperado de origem basáltica (FR), recolhido pelo sistema de recolha de finos da central de produção de mistura betuminosa e um filer de areia de rio de origem siliciosa (FAR), tendo sido este produzido em laboratório por um processo de britagem, tendo sido todo o material passado no peneiro de abertura de malha 0,125 mm, eliminando-se o material retido.

Os materiais provenientes de materiais reciclados são originários em subprodutos industriais e resíduos de construção e demolição, em particular cinzas volantes (CV), filer de pó de tijolo (FPT) e filer de RCD (FRCD), sendo que estes dois últimos foram obtidos em laboratório por britagem de materiais, conforme o processo utilizado para a obtenção do FAR, o primeiro por britagem de resíduos de telhas e o último de uma amostra de betão britado usado no âmbito do projeto SUPREMA [8].

Os restantes fileres, com exceção dos materiais que sofreram um processo de britagem em laboratório, foram utilizados conforme entregues pelos produtores/fornecedores para que não fosse necessário proceder a alterações do método de produção destes materiais, com consequentes implicações em investimentos financeiros, por parte dos mesmos.

Foram também utilizados 3 diferentes tipos de ligantes betuminosos, sendo estes um betume de penetração nominal 35/50, um betume de penetração nominal 50/70 e um betume modificado com polímeros do tipo PMB 45/80-65. Além destes, foi também estudado um betume (de penetração nominal 35/50), modificado com 0,3% de um promotor de adesividade, sendo este ligante designado como 35/50A. Este último betume apresentou uma redução da temperatura de amolecimento face ao original, tendo sido obtido o valor de 54,0°C. Na Tabela 1 são apresentados os resultados para algumas das propriedades dos ligantes betuminosos utilizados.

Tabela 1 – Propriedades dos ligantes betuminosos

Propriedade	Norma	Unidades	Betume		
			35/50	PMB 45/80-65	50/70
Penetração a 25°C	EN 1426	0,1mm	43	51	66
Temperatura de amolecimento (método do anel e bola)	EN 1427	°C	55,5	71,6	53,3
Índice de Penetração	EN 12595	-	-0,3	-	0,3

2.2 Métodos de ensaio

Foram realizados diversos ensaios sobre os fileres e mastiques betuminosos. Os ensaios realizados sobre os fileres permitiram avaliar as propriedades físicas, geométricas e mecânicas dos diferentes materiais, possibilitando assim aferir quais as propriedades dos fileres que apresentam maiores efeitos sobre o comportamento do mástico betuminoso, em particular do seu poder endurecedor. Os ensaios sobre os mastiques permitiram avaliar o comportamento do mástico pela introdução de determinado filer num determinado betume.

2.2.1 Ensaio sobre fileres

A determinação das propriedades físicas passou pela avaliação do teor em água (w) realizada segundo a norma NP EN 1097-5 [11], da massa volúmica (MV) de acordo com a norma NP EN 1097-7 [12] e da superfície específica (SE) segundo a norma NP EN 196-6 [13], dado que existe uma relação direta entre esta propriedade e a quantidade de finos existentes na amostra. Existe também uma relação de proporcionalidade direta entre esta e a quantidade de betume adsorvido pela mesma quantidade de filer. Além destas propriedades foi ainda determinado o valor do azul-de-metileno (VAM) de acordo com a norma NP EN 933-9 [14], os vazios do filer seco compactado ou vazios de Rigden (VR) de acordo com a norma NP EN 1097-4 [15]. Esta propriedade tem sido apresentada como a que apresenta maior relação com o efeito endurecedor do filer sobre o mástico [16, 17]. Sendo, ainda, esta propriedade considerada como referência nas especificações nacionais para os materiais a aplicar em misturas betuminosas [10]. Foi também determinado o valor do número de betume (NB) ou viscosidade aparente que é determinado segundo a norma NP EN 13179-2 [18], resultando que, quanto maior o valor do NB maior será capacidade de endurecimento do filer.

Relativamente às propriedades geométricas do filer foram determinadas as dimensões e a geometria das partículas dos materiais. De forma a determinar a primeira propriedade recorreu-se ao ensaio de determinação da granulometria, realizando-se este de acordo com a norma EN 933-10 [19]. Foi assim avaliada a distribuição da dimensão das partículas de filer com recurso a 3 dimensões de abertura da malha de 2,0 mm, 0,125 mm e 0,063 mm, e a um sistema de jacto de ar o que facilita o processo de peneiração. Para a geometria das partículas, devido à finura do material, foi necessário recorrer a uma observação ao microscópio eletrónico de varrimento (MEV) de acordo com a norma ASTM E 986 [20], sendo necessária a preparação da amostra com recurso a uma solução alcoólica para se obter uma dispersão correta das partículas. A classificação da forma das partículas de filer foi realizada com base nos critérios apresentados na Tabela 2 [21].

Tabela 2 – Descrição de formas comuns das partículas, adaptado de [21]

Forma	Descrição
	Esférica
	Acicular Em agulha
	Angular Arestas agudas
	Cristalina Superfícies dos cristais visíveis
	Dendrítica Crescimento cristalino ramificado
	Fibrosa Com fibras, regulares ou não
	Floculada Forma de placa
	Granulosa Isométrica irregular
	Irregular Sem simetria
	Nodular Conjunto de formas arredondadas

2.2.2 Ensaio sobre mastiques

De forma a avaliar o efeito dos fileres sobre o betume recorreu-se a dois métodos de ensaio: o ensaio de determinação do poder absorvente (PA) e o ensaio de determinação da variação da temperatura de anel e bola (ΔT_{ab}). O primeiro ensaio compreende a avaliação da capacidade do filer absorver o betume, sendo este realizado segundo a norma NF P 98-256-1 [22]. Neste teste o filer é continuamente adicionado a uma amostra de betume, sendo misturado à mão até que a mistura se torne friável e quebradiça, perdendo o aspeto viscoso. O poder absorvente (PA) é expresso como a massa do filer adicionada durante o ensaio, sendo esta multiplicado por um fator de normalização da massa volúmica das partículas do filer para o valor de 2,65Mg/m³. A partir da determinação do poder absorvente é possível determinar a razão volumétrica filer/betume máxima (f/b_{max}) pela equação (1), onde ρ_b é a massa volúmica do betume, que corresponde à quantidade máxima de filer que se pode adicionar a uma determinada quantidade de betume, sem que esta perca a trabalhabilidade.

$$f/b_{max} = \frac{\rho_b \times PA}{15 \times 2.65} \quad (1)$$

A temperatura de amolecimento do mastique é realizada pelo método do anel e bola, segundo a norma EN 1427 [23]. O valor da variação de temperatura anel e bola (ΔT_{ab}) resultada da diferença entre o resultado obtido para o mastique e o resultado obtido para o betume. Este ensaio permite avaliar o incremento de viscosidade provocado pela adição de filer ao betume, ou seja o aumento da rigidez devido à introdução do filer. Segundo o CETO da Infraestruturas de Portugal [10] o valor de ΔT_{ab} deverá variar entre os 12°C e os 16°C.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de massa volúmica, granulometria, valor de azul-de-metileno, superfície específica, e índice de vazios de *Rigden* obtidos para cada um dos fileres, sendo também apresentados os requisitos presentes no CETO da IP [10]. Da comparação dos valores obtidos para cada um dos fileres estudados verificou-se que a nível da granulometria e do valor do azul-de-metileno todos os fileres cumprem os requisitos apresentados no CETO. Relativamente ao teor em água todos os fileres cumprem o especificado, com exceção da cal hidratada que não cumpre o requisito apresentado na especificação, no entanto como estes materiais são aquecidos para a incorporação em misturas betuminosas a quente, este parâmetro perde expressão.

Relativamente aos requisitos impostos para o índice de vazios de *Rigden* apenas quatro dos nove fileres estudados (CV, FC, FR e FAR), apresentam valores compreendidos nos limites definidos no caderno de encargos, sendo que os restantes apresentam valores superiores a estes limites. Contudo, no estudo considerou-se que estes limites não deveriam ser assumidos como eliminatórios, considerando outros países definem limites diferentes para esta propriedade, como é o caso da Alemanha onde são propostos valores entre 28% e 55% [24].

Os resultados obtidos para os fileres alternativos aproximam-se dos fileres de origem natural, no caso das cinzas volantes, e dos materiais comerciais (cimento de Portland e cal hidráulica), no caso dos fileres provenientes dos RCD e dos materiais cerâmicos. Refere-se ainda que a cal hidratada revelou valores bastante superiores à média dos restantes materiais no que diz respeito à superfície específica e ao índice de vazios de *Rigden*, o que indica que se trata de um material com um elevado poder rigidificante quando introduzido no betume.

Quanto ao VAM registado para os fileres estudados verifica-se que em todos eles os valores obtidos são abaixo dos requisitos definidos nas especificações.

De forma complementar a avaliação geométrica das partículas de filer, além da sua dimensão, foi também realizada a observação dos fileres ao microscópio eletrónico de varrimento (MEV) de forma a ser possível avaliar a forma e a textura das mesmas. Na Figura 1 apresentam-se as captações realizadas ao MEV com diferentes graus de ampliação. Os graus de ampliação aplicados para a observação não foram iguais para todos os fileres, visto que alguns dos materiais apresentavam o deslocamento das partículas, sobre o filtro utilizado, devido ao efeito provocado pela ampliação. As captações foram ordenadas por ordem crescente de irregularidade, tanto de forma como de textura.

Tabela 3 – Determinação da massa volúmica (MV), granulometria, teor em água (w), valor do azul-de-metileno (VAM), superfície específica (SE) e índice de vazios de *Rigden* (VR)

Filer	MV [Mg/m ³]	Granulometria (% passada)			w [%]	VAM [g/1000g]	SE [m ² /kg]	VR [%]
		#0,063 mm	#0,125 mm	#2,0 mm				
CH ^(a,b,e)	2,72	79	93	100	0,79	1,7	671	52
CHI ^(a,b,e)	2,32	100	100	100	1,36	1,7	2122	71
CP ^(a,b,e)	3,29	99	100	100	0,21	1,7	431	45
CV ^(a,e)	2,51	93	100	100	0,00	1,7	346	36
FC ^(a,b,e)	2,72	80	93	100	0,05	3,3	563	36
FR ^(a,b,e)	2,87	85	93	100	0,36	5,0	347	38
FRCD ^(a)	2,63	82	100	100	0,87	5,0	525	40
FPT ^(a)	2,71	87	100	100	0,22	3,3	650	45
FAR ^(d)	2,64	84	100	100	0,00	3,3	380	36
Intervalo de resultados	2,32-3,29	79-100	93-100	100	0,00-1,36	1,7-5,0	346-2122	36-71
CETO IP^d	--	70-100	85-100	100	≤1	≤10	--	28-38

^(a)[5], ^(b)[6], ^(c)[25], ^(d)[10]

Na Tabela 4 é apresentada a descrição da forma e textura das partículas de cada um dos fileres estudados, de uma forma sucinta. Da observação da tabela é possível verificar que os fileres podem ser agrupados em 4 grupos, conforme a irregularidade das partículas que os constituem. No primeiro grupo podem ser agrupadas as cinzas volantes, o filer recuperado, o filer de areia de rio e o cimento de Portland, cujas partículas apresentam uma textura superficial totalmente lisa ou lisa a pouco rugosa; o segundo grupo é composto pelo filer calcário e o filer de RCD cujas partículas apresentam uma textura superficial lisa a rugosa; o terceiro grupo reúne a cal hidráulica e o filer de pó de tijolo sendo que as partículas apresentam uma textura superficial rugosa; e sendo o quarto grupo constituído apenas pela cal hidratada cujas partículas apresentam uma forma e textura muito irregular, sendo consideradas como amorfas.

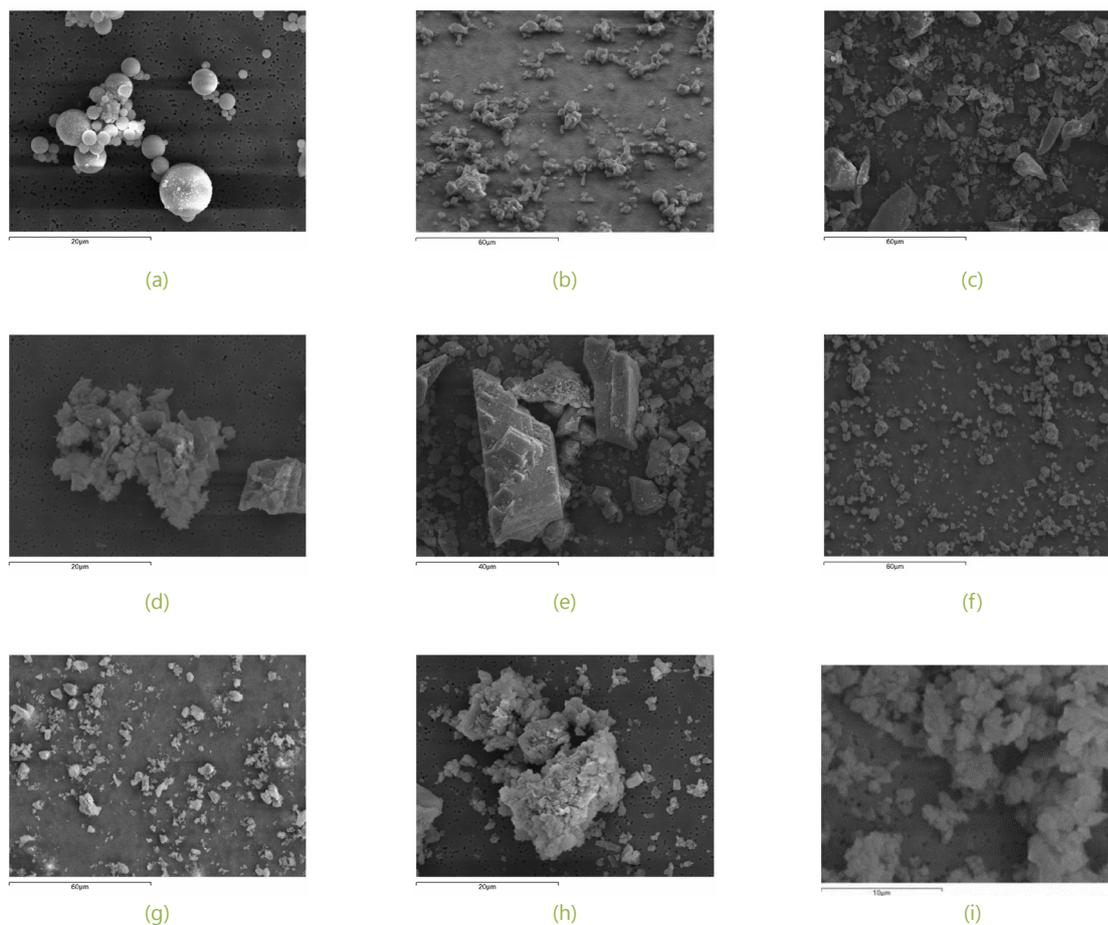


Figura 1: Fotografias obtidas por observação ao MEV: a) CV ampliação 3000x; b) FR ampliação 2000x; c) FAR ampliação 1000x; d) CP ampliação 3000x; e) FRCD ampliação 2000x; f) FC ampliação 1000x; g) FPT ampliação 1000x; h) CH ampliação 3000x; i) CHi ampliação 3500x

Ao analisar comparativamente a geometria das partículas apresentada na Tabela 4 e na Figura 1 com os resultados obtidos para a superfície específica dos fileres, verifica-se que os valores para a SE aumentam conforme aumenta a irregularidade das partículas, tanto ao nível da textura superficial como ao nível da forma. Esta tendência é também verificada para o índice de vazios de *Rigden* dos materiais, no entanto para esta propriedade constata-se que existe também a influência da dimensão das partículas. Na Figura 2a é apresentada a relação obtida entre a superfície específica e o índice de vazios de *Rigden*, verificando-se que estes apresentam uma correlação linear positiva.

Tabela 4 – Avaliação da geometria das partículas de filer

Filer	Geometria das partículas	
	Forma	Textura superficial
CH ^(a,b,c)	Granulosa a nodular	Rugosa
CHi ^(a,b,c)	Nodular	Amorfo
CP ^(a,b,c)	Angular	Lisa a pouco rugosa
CV ^(a,c)	Esférica	Lisa
FC ^(a,b,c)	Angular e granulosa	Lisa a rugosa
FR ^(a,b,c)	Angular, granulosa e algumas esféricas	Lisa a pouco rugosa
FRCD ^(a)	Angular e granulosa	Lisa a Rugosa
FPT ^(a)	Angular	Rugosa
FAR ^(a)	Angular	Lisa a pouco rugosa

^a[5], ^b[6], ^c[25]

Na Tabela 5 são apresentados os resultados do número do betume, do poder absorvente e da correspondente razão volumétrica f/b_{max} de cada um dos fileres. Ambos os ensaios permitem determinar capacidade de absorção dos fileres a aplicar em misturas betuminosas, sendo assim possível verificar a razão filer/betume passível de utilização sem comprometer a trabalhabilidade da mistura e/ou mástique. Além disso são ainda apresentados nesta tabela os resultados de variação de temperatura anel e bola obtidos para mastiques produzidos com uma razão volumétrica normalizada de filer/betume (f/b) de 0,6, sendo para alguns esta relação reduzida para metade no caso dos mastiques produzidos com cal hidratada (CHI) e no caso dos mastiques produzidos com o betume PMB 45/80-65 e os restantes materiais comerciais (CP e CH).

Verifica-se que o número do betume e o poder absorvente, e consequente a razão volumétrica máxima filer/betume, dos fileres são inversamente proporcionais. Os resultados obtidos para a razão f/b_{max} variam entre os 0,36 e os 1,56, verificando-se uma grande influência do tipo de filer na viscosidade do mástique. Os fileres que apresentam maior índice de vazios de *Rigden*, e consequentemente maior superfície específica (Figura 2a), apresentam um maior número de betume e um menor poder absorvente. Na Figura 2b apresenta-se as relações entre a razão volumétrica filer/betume máxima, o número do betume e a razão volumétrica filer/betume máxima.

Tabela 5 – Avaliação do número de betume (NB), poder absorvente (PA) e variação de temperatura anel e bola (ΔT_{ab})

Filer	NB	Ligante betuminoso											
		35/50			PMB 45/80-65			35/50A			50/70		
		PA	f/b_{max}	ΔT_{ab}	PA	f/b_{max}	ΔT_{ab}	PA	f/b_{max}	ΔT_{ab}	PA	f/b_{max}	ΔT_{ab}
CH ^(a,b,c)	48	29	0,76	17,6	27	0,71	2,9*	35	0,91	27,2	35	0,91	27,1
CHI ^(a,b,c)	120	21	0,53	12,1*	14	0,36	26,1*	21	0,53	23,7*	21	0,53	21,5*
CP ^(a,b,c)	40	35	0,92	19,5	32	0,84	5,3*	39	1,00	28,1	34	0,88	29,5
CV ^(a,c)	23	59	1,43	6,7	57	1,48	4,6	63	1,64	11,2	63	1,64	10,6
FC ^(a,b,c)	28	55	1,41	10,6	47	1,21	7,8	58	1,52	12,0	58	1,52	12,2
FR ^(a,b,c)	30	44	1,15	10,0	44	1,15	7,6	50	1,29	13,8	50	1,29	12,3
FRCD ^(a)	36	44	1,15	11,7	36	0,94	9,1	42	1,10	15,8	48	1,25	14,8
FPT ^(a)	36	35	0,85	14,2	35	0,91	7,8	41	1,06	18,1	41	1,06	19,0
FAR ^(a)	26	60	1,56	10,2	54	1,40	7,5	60	1,56	12,4	54	1,40	12,3

^a[5], ^b[6], ^c[25]. * f/b de 0,3 enquanto que os restantes apresentam um f/b de 0,6

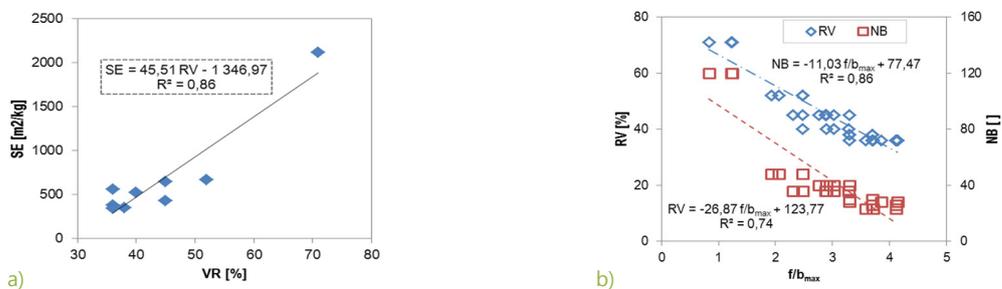


Figura 2: a) Relação entre o índice de vazios de *Rigden* (VR) e a superfície específica (SE);
 b) Relação entre a relação mássica máxima filer/betume e o índice de vazios de *Rigden* e o número de betume (NB)

As especificações utilizadas a nível nacional [10] adotam a expressão determinada num estudo realizado no *Belgium Road Research Center* [26] para a previsão da variação da temperatura anel e bola (ΔT_{ab}), sendo esta determinada em função do índice de vazios de *Rigden* (IVR) e da razão volumétrica filer/betume utilizada (f/b) como se pode observar na equação (2).

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

Com base na equação (2) foram calculados os valores de ΔT_{ab} previstos para as razões de fíler utilizadas em cada um dos mastiques, tendo em consideração o índice de vazios de *Rigden* de cada um dos fíleres. Na Figura 3a apresenta-se uma comparação dos resultados de ΔT_{ab} determinados com base na equação (2) e os resultados medidos nos ensaios. Desta é possível constatar que, de um modo geral as variações de temperatura anel e bola calculadas sobrestimam o incremento de viscosidade registado em cada um dos mastiques. Isto pode dever-se a que a equação foi criada com base num estudo realizado com um betume da classe 60/70 tradicional, o que faz com que esta equação possa estar condicionada pelo tipo de betume do estudo, betume que a nível nacional não é utilizado, nem se encontra especificado na normalização europeia. Além disto, esta expressão apenas toma em consideração o valor do índice de vazios de *Rigden* do fíler, no entanto no caso do fíler calcário (FC) e das cinzas volantes (CV) que possuem valores iguais para esta propriedade, apresentam valores diferentes para a razão volumétrica máxima fíler/betume e para os ΔT_{ab} registados.

Assim, num outro estudo [25] é apresentada a expressão (3), onde a ΔT_{ab} depende do tipo de betume utilizado, pela constante "a" e da razão entre o f/b utilizado e o f/b_{max} determinado pelo ensaio do poder absorvente, não dependendo apenas do índice de vazios de *Rigden* como na equação (2).

$$\Delta T_{ab} / a = 1737,6 \times \left(\frac{f}{b} \right) / \left(\frac{f}{b_{max}} \right) - 460,0 \quad (3)$$

Com base nesta equação foram calculados novos valores para o ΔT_{ab} , sendo os mesmos comparados com os medidos nos ensaios, conforme apresentado na Figura 3b. Como é possível observar na figura através desta expressão é possível prever valores de ΔT_{ab} com uma melhor aproximação do que através da equação (2). No entanto, no caso do betume 35/50 os resultados são ligeiramente sobrestimados.

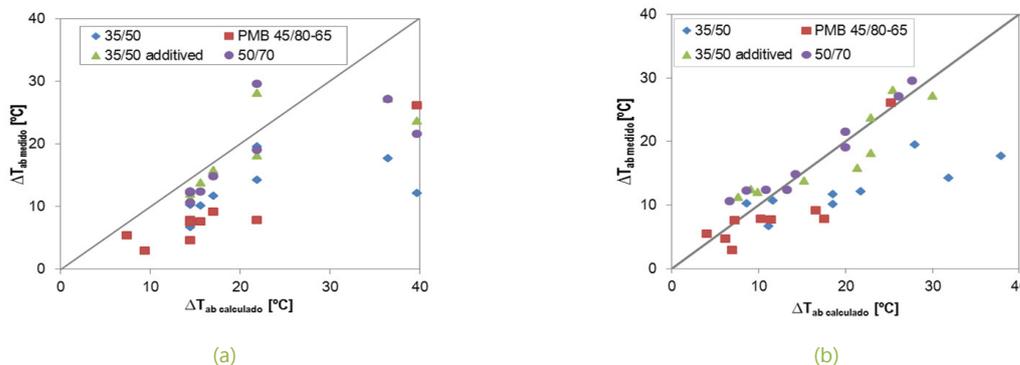


Figura 3: a) Comparação entre ΔT_{ab} medida nos ensaios e calculada pela equação (2); b) Comparação entre ΔT_{ab} medida nos ensaios e calculada pela equação (3)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente artigo foram apresentados os principais resultados laboratoriais da caracterização física, geométrica e mecânica de um conjunto de 9 fíleres, nomeadamente cal hidráulica, cal hidratada, cimento *Portland*, cinzas volantes, fíler calcário, fíler recuperado, fíler de RCD, fíler de pó de tijolo e fíler de areia de rio. Após a obtenção destes resultados os fíleres foram misturados com quatro betumes com diferentes propriedades de forma a avaliar o efeito dos diferentes fíleres nos mastiques betuminosos.

Dos materiais em estudo considerou-se que o filer calcário, dada a elevada experiência na sua utilização no fabrico de misturas betuminosas, constituiria o material de referência. A seleção dos materiais teve como objetivo a introdução de novos tipos de fileres como alternativas ao filer de referência, sendo de realçar o interesse na utilização de fileres provenientes de subprodutos industriais e de resíduos de construção e demolição, de modo a que seja possível aumentar a percentagem de materiais valorizados contribuindo para a tangibilidade da meta proposta para o ano 2020 de 70% dos materiais valorizados.

Da caracterização efetuada sobre as amostras de filer estudadas, bem como da análise comparativa dos resultados obtidos podem tecer-se as seguintes considerações:

- i) Todos os fileres cumprem os requisitos quanto ao fuso granulométrico, valor de azul-de-metileno, teor em água, com exceção de um deles (CHi) que apresenta um teor em água superior ao preconizado; considera-se contudo que este parâmetro perde significado uma vez que o filer é sujeito a temperaturas elevadas quando da sua incorporação em central para fabrico da mistura betuminosa.
- ii) Apenas as cinzas volantes, o filer calcário, o filer recuperado e o filer de areia de rio cumprem o critério relativo ao índice de vazios de *Rigden* apresentado no CETO. No entanto, considera-se que o filer de RCD e o filer pó de tijolo, além do cimento Portland, dada a experiência na sua utilização, devem ser considerados para misturas ponderais de fileres ou totais tendo em atenção o definido na bibliografia.
- iii) A cal hidratada apresenta um elevado poder rigidificante, sendo necessário para todos os mastiques produzidos com este material utilizar metade da razão f/b.
- iv) O valor característico de superfície específica de cada filer é influenciado pela textura superficial das partículas de filer, aumentando com a rugosidade superficial das mesmas.
- v) A relação volumétrica filer/betume não é apenas influenciada pelas propriedades intrínsecas do filer, mas sim, também pelo tipo de betume, apesar de menor expressão.
- vi) O ensaio da determinação do poder absorvente é uma alternativa válida e eficaz, e que deve ser introduzido nas especificações do filer, para determinar o efeito do filer no mástico betuminoso, sendo um ensaio bastante simples e de fácil execução.
- vii) Os valores de ΔT_{ab} determinados pela equação proposta nas especificações nacionais apresentam variações consideráveis quando comparados com os resultados medidos nos ensaios; os resultados obtidos pela expressão que utiliza o f/b_{max} obtido pelo ensaio de poder absorvente, permitem obter resultados de ΔT_{ab} mais próximos dos medidos nos ensaios.

Os fileres alternativos, cinzas volantes, filer de RCD e filer de pó de tijolo, apresentam viabilidade de utilização como alternativas aos fileres comumente utilizados, apresentados muitas vezes propriedades semelhantes e em alguns casos capacidades de incremento de viscosidade semelhante aos produtos comerciais, podendo assim contemplados como substitutos destes para relações ponderais de fileres.

O ensaio de poder absorvente apresenta-se como um bom indicador da capacidade de endurecimento do masticue, pela adição do filer, permitindo prever de uma forma mais fiável as variações de temperatura de amolecimento. Como trabalhos futuros pretende-se continuar estudos, avaliando propriedades reológicas e mecânicas do masticue de forma a ser possível definir um intervalo ótimo de variação de temperatura anel e bola que deverá se obter no masticue para se obter um melhor comportamento do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela disponibilização das instalações e pelos meios facultados que permitiram a realização do estudo e ainda às empresas LUSICAL - Companhia Lusitana de Cal S.A., Secil - Companhia Geral de Cal e Cimentos S.A., Paraíso da Pedra, CEPISA e PROBIGALP pela disponibilização das amostras para ensaio.

REFERÊNCIAS

- [1] F. M. Jakarni, "Adhesion of Asphalt Mixtures [PhD Thesis]," 2012.
- [2] J. Read and D. Whiteoak, *The Shell Bitumen Handbook*, 5th ed. London: Thomas Telford, 2003.
- [3] D. Little and J. Epps, "The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt." National Lime Association, USA, 2006.
- [4] Y. Kim, *Modeling of Asphalt Concrete*. McGraw-Hill Professional, 2008.
- [5] V. Antunes, "Influência do Filer no Comportamento de Mastiques Betuminosos [Dissertação de Mestrado]," FCT-UNL, 2013.
- [6] V. Antunes, A. C. Freire, L. Quaresma, and R. Micaelo, "Influence of the geometrical and physical properties of filler in the filler-bitumen interaction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 76, pp. 322–329, Feb. 2015.
- [7] E.-E. P. and Council, "Waste Framework Directive 2008/98/EC of 19 November," 2008.
- [8] A. C. Freire, J. Neves, A. Roque, I. Martins, M. L. Antunes, and G. Faria, "Use of Construction and Demolition Recycled Materials (C&DRM) in Road Pavements Validated on Experimental Test Sections," in *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities 2nd International Conference*, 2013, pp. 91–96.
- [9] IPQ, "NP EN 459-1:2011/Errata 1:2012 - Cal de construção; Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade." Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2012.
- [10] EP, "Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03 - Pavimentação. Características dos materiais." Estradas de Portugal, S.A., Almada, Portugal, 2012.
- [11] IPQ, "NP EN 1097-5:2011. Test for mechanical and physical properties of aggregates - Part 5: Determination of the water content by drying in a ventilated oven," Caparica, 2011.
- [12] IPQ, "NP EN 1097-7:2012. Determination of the particle density of filler - Pycnometer method." Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2012.
- [13] IPQ, "NP EN 196-6:2010. Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness." Instituto Português da Qualidade, Caparica, p. 2010.
- [14] IPQ, "NP EN 933-9:2011. Tests for geometrical properties of aggregates - Part 9: Assessment of fines - Methylene blue test." Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2011.
- [15] IPQ, "NP EN 1097-4:2012. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 4: Determination of the voids of dry compacted filler." Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2012.

- [16] H. Bahia, F. Faheem, C. Hintz, I. Al-Qadi, G. Reinke, and E. Dukatz, *Test Methods and Specification Criteria for Mineral Filler Used in HMA. NCHRP Project 9-45*. USA: Transportation Research Board, 2010.
- [17] P. S. Kandal and F. J. Parker, *NCHRP Report 405 Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements*, Transporta. Washington, D.C.: NATIONAL ACADEMY PRESS, 1998.
- [18] IPQ, "NP EN 13179-2:2010. Tests for filler aggregate used in bituminous mixtures. Part 2: Bitumen number." Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2010.
- [19] CEN, "EN 933-10:2009. Test for geometrical properties of aggregates. Part 10: Assessment of fines - Grading of filler aggregates (air jet sieving)." European Committee for Standardization, Brussels, 2009.
- [20] ASTM, "ASTM E986 - 04 (2010). Standard Practice for Scanning Electron Microscope Beam Size Characterization." ASTM International, USA, 2010.
- [21] E. M. Pereira, "Análise granulométrica de cimentos por difracção de luz laser," Lisboa, 1995.
- [22] AFNOR, "NF P 98-256-1. Tests relating to pavements - Tests on constituents of bituminous mixtures - Part 1: Determination of fines particles absorbing capacity (in French)." AFNOR, France, 2005.
- [23] IPQ, "NP EN 1427:2010. Bitumen and bituminous binders - Determination of softening point: Ring and Ball method." Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2010.
- [24] FGSV, "TL Asphalt StB 07 - Technische Lieferbedingungen fuer Asphaltmischgut fuer den Bau von Verkehrsflaechenbefestigungen," Cologne, Germany, 2008.
- [25] V. Antunes, A. C. Freire, L. Quaresma, and R. Micaelo, "Effect of the chemical composition of fillers in the filler – bitumen interaction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 104, pp. 85–91, 2016.
- [26] L. Quaresma and M. Antunes, "Granitic filler in bituminous mixtures (in Portuguese). 62/02-NRP" Portugal, 2002.