

EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E FÍSICAS DO FÍLER NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS MÁSTIQUES BETUMINOSOS

Maya Sheidaei

Technology and Society, Lund University, Lund, Sweden. maya.sheidaei@tft.lth.se

Vítor Antunes

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Tel: 218443000 Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. vantunes@lneec.pt

Ana Cristina Freire

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Tel: 218443000 Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. acfreire@lneec.pt

RESUMO: Este estudo investiga as propriedades dos mastiques fabricados com betume 70/100, três fíleres de diferentes origens (granito, quartzo-granito e diorito) e um fíler ativo de origem industrial à base de cal com diferentes proporções volumétricas de fíler/betume (F/B_v) (40%, 50% e 60%). Inicialmente, foram avaliadas as características físicas e geométricas dos fíleres. A sua influência no comportamento dos mastiques foi depois avaliada através de ensaios convencionais de penetração (PEN) e da determinação da temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola ($T_{R\&B}$), bem como de ensaios de varrimento de frequência a diferentes temperaturas com o Reómetro de Corte Dinâmico (DSR). Embora os diferentes componentes minerais dos fíleres não tenham mostrado uma correlação forte com o comportamento do mástico, as diferenças na distribuição granulométrica e nos vazios de Rigden explicam os diferentes efeitos de aumento da rigidez. O granito, com partículas mais finas, apresentou a menor resistência à deformação permanente, enquanto o diorito, com partículas mais grossas, apresentou a maior resistência ao corte com relações volumétricas de F/B de 40% e 60%. O quartzo-granito apresentou a maior dependência da relação volumétrica F/B e a interação mais forte com o betume a 50% F/B a temperaturas mais baixas, salientando a importância de selecionar a proporção adequada de fíler, em vez da sua natureza quando as características são semelhantes.

PALAVRAS-CHAVE: Betume; Módulo de corte complexo; Reómetro de corte dinâmico; Fíler; Reologia de mástico; Temperatura de amolecimento

1. Introdução

O fíler pode ser definido como o conjunto de partículas finas que passam num peneiro de 0,063 mm e podem ser obtidas a partir de rochas naturais trituradas, produtos industriais ou resíduos (Chen et al., 2022). O preenchimento de vazios, o impacto no endurecimento e a importância das características do fíler adicionado às misturas betuminosas são reconhecidos há muitos anos (Rigden, 1947). Apesar de representarem apenas entre 4% a 15% da massa da mistura betuminosa, as propriedades do mástico (fíler + betume) são cruciais para o desempenho do pavimento, como a resistência ao envelhecimento oxidativo, a suscetibilidade à água, o fendilhamento por fadiga e a deformação permanente (Steineder & Hofko, 2023). Estudos anteriores

sugeriram que a rigidez relativa do mastique não é determinada apenas pela razão entre o fíler e o betume (F/B), mas pelas características do fíler e pela interação dos dois componentes (Antunes et al., 2015; Faheem & Bahia, 2010).

Diferentes estudos têm sido realizados sobre o efeito do tipo de fíler e das razões F/B na suscetibilidade dos mastiques betuminosas ao desgaste do pavimento (Al-Saffar, 2013; Zulkati et al., 2012). Foi demonstrado que as propriedades reológicas, o módulo complexo (G^*) e o fator de deformação ($G^*/\sin \delta$) dos mastiques betuminosos são influenciados pelo tipo de fíler e pela razão F/B (Cosme et al., 2016; Mukhtar et al., 2023).

Uma revisão das propriedades físicas e químicas dos fíleres minerais que influenciam o desempenho dos mastiques conclui que as duas características mais relevantes são a granulometria e a superfície específica (Chen et al., 2022). A literatura afirma que, à medida que o teor de partículas finas aumenta, o mesmo acontece com a área da superfície específica (SSA), pelo que se espera que mais betume seja adsorvido pelo fíler, o que implica que o efeito de endurecimento deve aumentar com a SSA. A ideia de que apenas o betume em excesso está livre para lubrificar o sistema fíler-betume e que o betume necessário para preencher os vazios no volume do fíler compactado é fixado pelo fíler foi desenvolvida por Rigden. Foi encontrada uma forte correlação entre o volume de vazios de Rigden e o poder de endurecimento do fíler (Bahia et al., 2010; P. S. Kandhal et al., 1998). No entanto, a SSA nem sempre explica a variação dos vazios de Rigden (RV) e pode não avaliar com exatidão as propriedades mecânicas dos mastiques betuminosos (Antunes et al., 2015; P. Kandhal, 1981).

As especificações mundiais para a formulação de misturas betuminosas, geralmente, apenas especificam a razão F/B e alguns parâmetros básicos para o fíler, tais como a origem e a granulometria. Por exemplo, a norma europeia EN 13043 especifica os efeitos geométricos, físicos e de aumento do ponto de amolecimento dos fíleres, entre outros requisitos. Na Suécia, a razão F/B é definida pela Administração Sueca dos Transportes depende do tipo de mistura betuminosa (Trafikverket, 2020). O tipo de mistura betuminosa é determinado por diferentes critérios, incluindo o volume de tráfego, a percentagem de tráfego pesado, a utilização de pneus com pregos e as condições climáticas (Trafikverket, 2020).

O objetivo deste trabalho é investigar a contribuição do fíler para o comportamento do mastique. Para tal, investigou-se os resultados do ensaio de penetração e da temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola e os parâmetros reológicos ($|G^*|$, δ), utilizando um Reómetro de Corte Dinâmico (DSR), de mastiques preparados com um betume puro de penetração nominal 70/100, três tipos de fíleres minerais e um fíler ativo à base de cal fabricado industrialmente com diferentes razões F/B.

2. Materiais

2.1 Betume

Neste estudo, foi utilizado um betume puro com penetração nominal 70/100. Apesar das propriedades do betume fornecidas na ficha técnica do fornecedor, a penetração, a temperatura de amolecimento e a massa volúmica foram determinadas em laboratório. Isto assegura uma comparação mais exata dos resultados obtidos para os mastiques relativamente ao betume. A Tabela 1 apresenta as propriedades do betume.

Tabela 1. Propriedades do betume

Propriedade	Norma	Betume 70/100
Penetração (0,1 mm)	EN 1426	72
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427	50,0
Índice de penetração (-)	EN 12595	-0,30
Massa volumica (g/cm ³)	EN 15326	1,019

2.2 Fíler

Foram selecionados quatro fíleres diferentes para este estudo, três de origem mineral e um produto industrial. Os fíleres foram obtidos em diferentes pedreiras na Suécia, sendo identificados como quartzo-diorito (D),

granito rico em quartzo (Q) e monzogranito (G). O fíler ativo à base de cal provém da incineração de lamas de fibras recicladas numa fábrica de papel de um município sueco. Desde 2003, as cinzas têm sido depositadas e descarregadas para utilização em aterros, estradas florestais e outras aplicações. A utilização deste tipo fíler ajuda a reduzir a pegada de carbono, com impactos económicos, uma vez que o preço dos direitos de emissão de gases com efeito de estufa na Europa aumentou consideravelmente de 25 euros por tonelada de CO_{2e} em 2019 para cerca de 85 - 90 euros por tonelada de CO_{2e} em 2024 (OCDE, 2024).

A composição química do fíler ativo à base de cal fabricado industrialmente, Nordkalk Terra E (LE), é a seguinte: óxido de cálcio CaO (40 - 70%), sílica SiO₂ (10 - 25%), óxido de alumínio Al₂O₃ (0 - 15%), óxido de ferro (III) Fe₂O₃ ($\geq 0 < 2\%$), pentóxido de fósforo P₄O₁₀ ($\geq 0 < 1\%$), com um valor de pH superior a 12.

A Figura 1 mostra os diferentes fíleres avaliados.

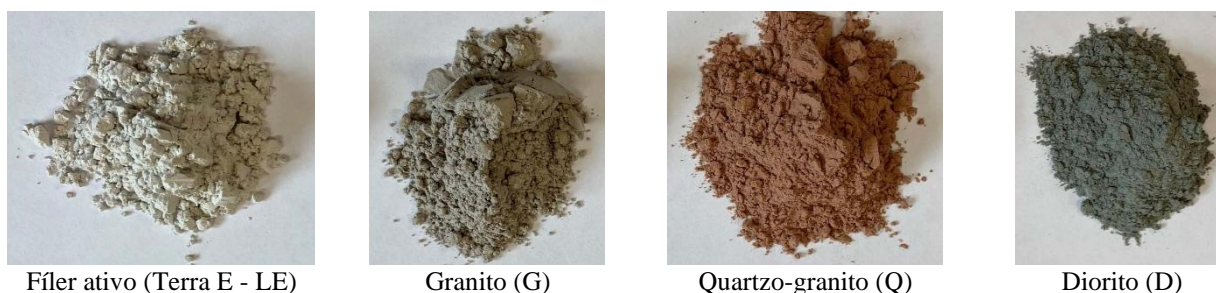


Figura 1. Fíleres avaliados

2.3 Produção de mástiques

Utilizando o betume e a massa correspondente de cada fíler com base nas razões fíler/betume mássicas (F/B_m), tendo estas sido obtidas através das razões volumétricas (F/B_v), conforme indicado na Tabela 2, foram produzidos 100 g de cada tipo de mastique. Em primeiro lugar, o fíler e o betume foram aquecidos a 150 °C durante 15 minutos para tornar fluído o betume, sendo o fíler aquecido adicionado posteriormente ao betume. A mistura fíler-betume foi mantida em estufa ventilada a 150 °C durante 15-20 minutos e misturada manualmente de forma consistente antes, durante e após o armazenamento em estufa ventilada, utilizando uma ferramenta metálica para garantir uma mistura homogénea antes de fabricar amostras para DSR, o ensaio de temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (variação da temperatura de amolecimento) e os ensaios de penetração.

Tabela 2. Razões fíler/betume volumétricas e mássicas

Mastiques ID	Fíler(s)/Betume Razão volumétrica (%)	Fíler(s)/Betume Razão mássica
G29_40	29% granito / 71% = 40%	50,9 / 49,1 = 1,04
Q29_40	29% quartzo-granito / 71% = 40%	51,2 / 48,8 = 1,05
D29_40	29% diorito / 71% = 40%	53,2 / 46,8 = 1,14
G33_50	33% granito / 67% = 50%	56,4 / 43,6 = 1,30
Q33_50	33% quartzo-granito / 67% = 50%	56,7 / 43,3 = 1,31
D33_50	33% diorito / 67% = 50%	58,7 / 41,3 = 1,42
G37_60	37% granito / 63% = 60%	60,9 / 39,1 = 1,55
Q37_60	37% quartzo-granito / 63% = 60%	61,1 / 38,9 = 1,57
D37_60	37% diorito / 63% = 60%	63,0 / 37,0 = 1,70
G24LE5_40	(24% granito + 5% fíler ativo) / 71 = 40%	51,3 / 48,7 = 1,05
Q24LE5_40	(24% quartzo-granito + 5% fíler ativo) / 71 = 40%	51,5 / 48,5 = 1,06
D24LE5_40	(24% diorito + 5% fíler ativo) / 71 = 40%	53,1 / 46,9 = 1,13
G19LE10_40	(19% granito + 10% fíler ativo) / 71 = 40%	51,6 / 48,4 = 1,07
Q19LE10_40	(19% quartzo-granito + 10% fíler ativo) / 71 = 40%	51,8 / 48,2 = 1,07
D19LE10_40	(19% diorito + 10% fíler ativo) / 71 = 40%	53,0 / 47,0 = 1,13

3. Metodologia experimental

3.1 Caracterização dos fíleres

Foram determinadas as seguintes propriedades geométricas e físicas do fíler: granulometria, forma das partículas, massa volúmica (SG), área da superfície específica (SSA), vazios do fíler seco compactado (Vazios de Rigden - RV) e teor de água. A SG foi determinada utilizando o método do picnómetro (EN1097-7), que é utilizada para calcular os vazios de Rigden e misturar o mastique em proporções volumétricas. A SSA e a granulometria foram medidas utilizando um medidor de difração a laser (Malvern' Mastersizer 3000) (ISO13320). O volume de vazios do fíler seco compactado (RV) foi determinado utilizando o equipamento Rigden (EN1097-4).

3.2 Caracterização dos mastiques

As razões volumétricas entre o fíler e o betume foram seleccionadas com base no intervalo F/B_m de 1:1,0 a 1:1,5, especificado pela Administração Sueca dos Transportes para corresponder ao intervalo de razão mássica F/B de uma mistura betuminosas com uma dimensão máxima de agregado de 11 mm e um betume puro de penetração nominal 70/100 (ABT 11 70/100), sendo esta uma das misturas betuminosas mais utilizadas na Suécia. O F/B volúmico de 60%, que excede o intervalo F/B mássico de 1:1,5, foi seleccionado para corresponder à razão volumétrica F/B para o ensaio de variação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola ($\Delta T_{R\&B}$) de acordo com a norma EN 13179-1.

Os mastiques foram avaliados através do ensaio de penetração (EN 1426) e do ensaio da determinação da temperatura de amolecimento (EN 1427). O ensaio de penetração da agulha foi efetuado a 25 °C como uma medida relativa da alteração da propriedade relacionada com a variação da rigidez ao adicionar os diferentes fíleres com diferentes concentrações ao betume. O $\Delta T_{R\&B}$ representa a diferença entre as temperaturas de amolecimento do betume e do mastique.

Sobre o betume 70/100 e as quinze razões volumétricas F/B, foram realizados dois ensaios de varrimento de frequência utilizando um reómetro de corte dinâmico (DSR) MCR302 da Anton Paar com o software RheoCompass, de acordo com a norma EN 14770. Um dos ensaios, no intervalo de temperatura de 40 °C a -10 °C, utilizando pratos planos de geometria paralela com um diâmetro de 8 mm (PP08) e uma espessura de amostra de 2 mm, e o outro ensaio foi realizado, no intervalo de 40 °C a 90 °C, utilizando pratos planos de geometria paralela com um diâmetro de 25 mm (PP25) e uma amostra de 1 mm de espessura. Para garantir a permanência na gama viscoelástica linear, foram realizados ensaios de varrimento de amplitude (A-sweep) a cada temperatura de ensaio. Os limites de amplitude de deformação para PP08 e PP25 foram fixados em 0,1% (0,001 mm/mm) e 1%, respetivamente. Foi utilizada uma gama de frequências de 0,1 a 100 rad/s (0,0159 a 15,9 Hz) para recolher 10 e 16 pontos do padrão de rampa logarítmica para cada temperatura constante. No entanto, apenas um dos resultados, com 10 frequências seleccionadas, é aqui representado, uma vez que era quase idêntico aos resultados do segundo teste de repetição com 16 pontos. Os ensaios foram efetuados em intervalos de 10 °C, permitindo que o material permanecesse à temperatura de ensaio durante 15 minutos, com uma tolerância de 0,2 °C. Por conseguinte, foi efetuada um varrimento entre -10 e 90 °C.

Os parâmetros DSR, o módulo complexo e o ângulo de fase foram modelados utilizando o modelo 2 Spring-2 Parabolic-1 Dashpot (2S2P1D) de Di Benedetto (Benedetto et al., 2007) e o princípio da sobreposição tempo-temperatura (TTSP) para representar a resposta viscoelástica linear dos materiais ensaiados.

4. Discussão de resultados

4.1 Propriedades dos fíleres

A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas dos fíleres estudados. O granito (G) tem a maior superfície específica e o diorito (D) apresenta a menor superfície específica. No entanto, o granito (G) tem o menor RV

e o diorito (D) tem o maior valor de RV. Isto confirma que os vazios de Rigden podem ser explicados por outros fatores para além da superfície específica, tais como a forma e o tamanho das partículas, a estrutura da superfície e a granulometria (Antunes et al., 2015). O resultado do RV prevê que três fíler terão efeitos de aumento de rigidez no mástique semelhante, por ordem decrescente, como se segue: diorito (D), quartzo-granito (Q) e granito (G).

Tabela 3. Propriedades dos fíleres

Fíler (ID)	Superfície específica (m ² /g) ISO 13320:2020	Vazios de Rigden (%) EN 1097-4	Teor em água (%) EN 1097-5	Massa volúmica (Mg/m ³) EN 1097-7
Granito (G)	0,500	38	0,18	2,64
Quartzo-granito (Q)	0,408	39	0,12	2,67
Diorito (D)	0,252	40	0,09	2,89
Fíler ativo (LE)	Não disponível	65	1,13	2,85

A Figura 2 apresenta as distribuições da dimensão das partículas ponderadas em volume utilizando o Malvern Laser Diffraction Sizer. Nos gráficos de distribuição cumulativa e de frequência, Dv(50), D[4,3] e Span são medidas normalmente utilizadas avaliar os fíleres. O Dv(50) é conhecido como a mediana ponderada por volume e descreve a tendência central da distribuição do tamanho das partículas. Por exemplo, para o granito (G), um Dv(50) de 15,9 µm (0,0159 mm) indica que 50% das partículas em volume são mais pequenas do que 15,9 µm, enquanto os outros 50% são maiores. O $D[4,3] = (\sum n_i D_i^4) / (\sum n_i D_i^3)$ é o diâmetro médio ponderado em volume obtido diretamente na medição do tamanho das partículas a partir da difração laser, em que n_i é a frequência de ocorrência de partículas na i-gésima classe de tamanho logaritmicamente espaçada, com um diâmetro médio geométrico D_i . A consistência da uniformidade do tamanho das partículas aumenta com a diminuição do valor de $Span = (Dv(90) - Dv(10)) / Dv(50)$. O granito (G) tem o maior teor de partículas mais finas (<0,02 mm), enquanto o diorito (D) tem o maior teor de partículas mais grossas (>0,02 mm). No entanto, de acordo com (Brown et al., 1997), a percentagem de fíler com dimensão inferior a 0,02 mm não tem qualquer influência no aumento de rigidez do mástique. Shao et al. (2005) também observaram que o efeito dos mastiques betuminosos no desempenho do pavimento é mais dependente do tamanho médio das partículas e da densidade do que da percentagem de partículas inferiores a 0,02 mm e da composição mineral. O diorito (D) tem o valor de span mais baixo (2,45), indicando que inclui mais partículas de dimensão muito semelhante, bem como o maior grão, resultando numa maior porosidade, ou seja, o RV mais elevado (40%). O granito (G) apresenta o maior valor de span (3,20) e o maior teor de partículas mais finas, o que conduziu a um fíler denso e graduado com o menor RV (38%).

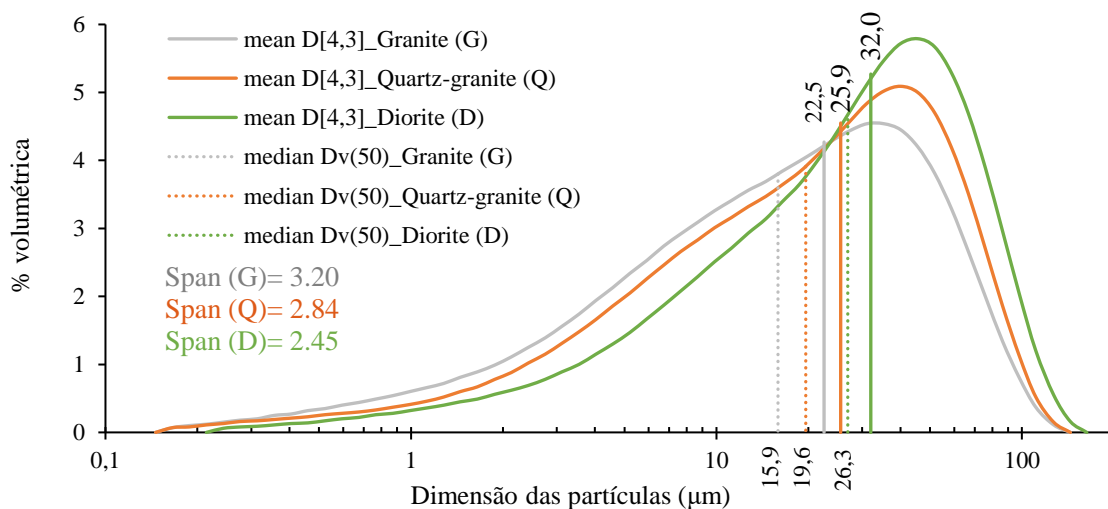


Figura 2. Distribuições da dimensão das partículas ponderadas em volume
11.º Congresso Rodoferroviário Português – <http://11crp.crp.pt>

4.2 Penetração e temperatura de amolecimento do mastique

A Figura 3 ilustra o $\Delta T_{R\&B}$, avaliação da alteração da temperatura de amolecimento pela adição do fíler ao betume 70/100. Verifica-se que a temperatura de amolecimento aumenta rapidamente para o D a partir de F/B_v de 40%, no entanto, o $\Delta T_{R\&B}$ aumenta mais lentamente para o G. Isto pode indicar um aumento da ligação fíler-betume para o D com o aumento da percentagem de fíler, o que pode ser devido às suas partículas maiores que começam a aproximar-se umas das outras sem terem betume suficiente para as cobrir e as ligar entre elas, tendo mais betume adsorvido na superfície das partículas de fíler devido ao maior RV do D. Isto também pode ser um efeito da dimensão das partículas. Para o G é necessário mais betume para cobrir a superfície específica mais elevada, enquanto para o D, com superfície específica mais reduzida, haverá um excesso de betume, no entanto, as partículas maiores e mais oblatas são menos propensos a mover-se, o que contradiz o facto de haver mais betume no volume livre.

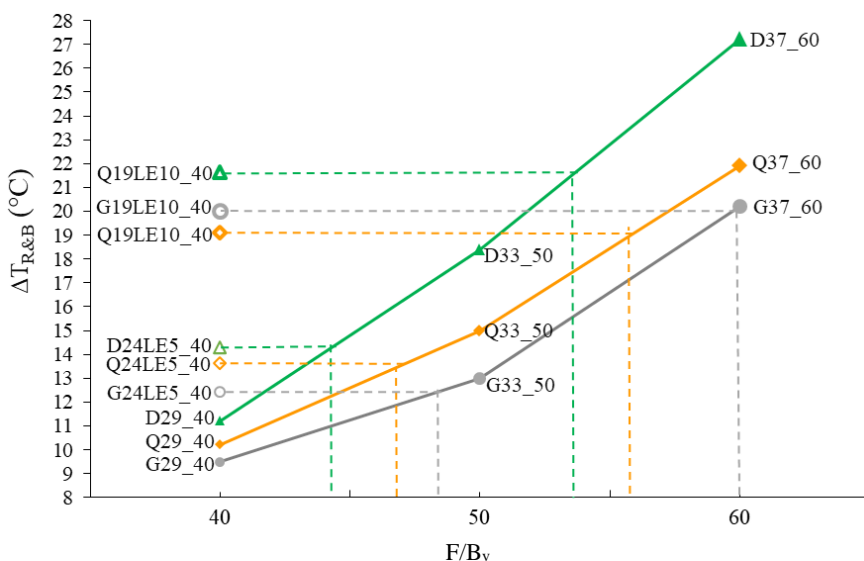


Figura 3. Temperatura de amolecimento dos mastiques com diferentes tipos de fíler e razões F/B_v

A Figura 4 mostra o resultado da alteração da propriedade relacionada com a alteração de rigidez ao adicionar os diferentes fíleres ao betume que possui um valor de penetração de 72×10^{-1} mm. O G apresentou um poder endurecedor mais reduzido enquanto o D mostra um mais elevado, de acordo com os resultados do ensaio de penetração. Os valores de penetração diminuem mais rapidamente para o G quando a relação F/B_v aumenta, quando comparados com os outros dois fíleres. Dado que os mastiques com G tendem a ter mais partículas finas, a agulha pode atravessá-lo com mais dificuldade durante o ensaio.

De acordo com os resultados obtidos, apresentados na Figura 3 e na Figura 4, alguns resultados da temperatura de amolecimento ($\Delta T_{R\&B}$) não se encontram alinhados com os resultados da penetração, no que diz respeito à rigidez introduzida pelos diferentes fíleres. As temperaturas de amolecimento comparativamente mais baixas do que o esperado, foram medidas para as seguintes mástiques, quando se consideram os resultados do ensaio de penetração: o Q29_40 comparado com o D29_40, o G24LE5_40 comparado com o Q24LE5_40, o G19LE10_40 comparado com o D19LE10_40, e o G37_60 comparado com o Q37_60. Esta temperatura de amolecimento ligeiramente mais baixa pode ser explicada pelo facto de as partículas dos mastiques mencionados tenderem a separar-se do betume mais facilmente porque são mais densas devido à possível aglomeração entre partículas que pode acontecer quando o teor de partículas mais finas é mais elevado e, no caso do fíler ativo LE, também pelas interações físico-químicas mais fracas do G24LE5 e do G19LE10 do que os respetivos fíleres comparados Q24LE5 e D19LE10, permitindo que a esfera de aço atravessasse o mastique betuminoso mais facilmente. Essas temperaturas de amolecimento mais baixas também se podem dever aos mastiques Q29_40 e G37_60, conterem fíleres com maior volume de partículas mais finas e maior superfície específicas quando comparadas com, D29_40 e Q37_60, respetivamente, a serem revestidas com betume, o

que induz a formação de um mastique betuminoso com menor resistência à passagem da esfera de aço durante o ensaio de anel e bola.

O aumento da temperatura de amolecimento e a diminuição dos valores de penetração quando os fíleres foram parcialmente substituídas por LE para F/B de 40%, era esperado, devido às interações físico-químicas com o betume. No entanto, o efeito do endurecimento do LE varia com o tipo de fíler mineral e a percentagem de LE. Para um teor de 5% de LE, o mastique que inclui o quartzo-granito (Q) (Q24LE5_40) sofreu um elevado aumento de rigidez, no entanto, com um teor de 10% de LE, o mastique que contém o granito (G) (G19LE10_40) endureceu significativamente em comparação com os outros fíleres. Um estudo realizado por (Pereira et al., 2018) também indica resultados semelhantes. Os resultados dos ensaios de temperatura de amolecimento e penetração mostram efeitos de endurecimento comparáveis. No entanto, os graus relativos de rigidez entre os fíleres diferem, particularmente no caso do fíleres industriais à base de cal.

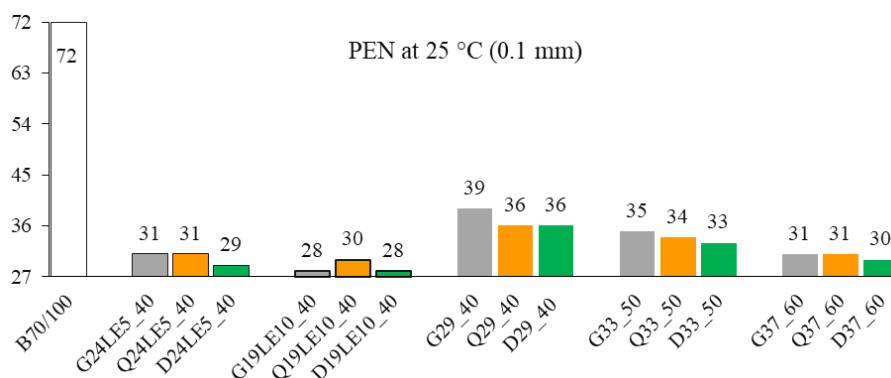


Figura 4. Penetração dos mastiques com diferentes tipos de fíler e razões F/B

4.3 Propriedades reológicas dos mastiques

A Figura 5 mostra as curvas mestras para o módulo complexo e o ângulo de fase para um $F/B_v=40\%$. A Figura 5(a) mostra que o D29_40 tem um $|G^*|$ ligeiramente mais elevado (curva mestra de rigidez deslocada para cima) do que os outros fíleres na ausência de LE, mas todos os três se sobrepõem. Quando os fíleres minerais são parcialmente substituídos por 5% de LE, o Q+LE tem um $|G^*|$ mais elevado do que os outros, no entanto, não apresentando uma elevada variação. Quando existe uma substituição parcial por 10% de LE, observa-se uma tendência semelhante à substituição por 5% de LE, no entanto, com 10% de LE, o Q+LE verifica-se um maior aumento de rigidez quando compara com as outras combinações em todas as frequências. A substituição parcial de fíler mineral por LE leva a um maior endurecimento do mastique para todos os três tipos, visível pelo deslocamento ascendente das curvas. As propriedades viscosas e elásticas de um material são medidas pelo ângulo de fase (δ), que varia de 0° para materiais perfeitamente elásticos a 90° para materiais completamente viscosos. A Figura 5(b) mostra uma diminuição do ângulo de fase (deslocações para baixo na curva mestra) para o Q+LE em comparação com o D+LE e o G+LE a frequências entre 10^{-4} e 10^2 , ou seja, o Q+LE tem um comportamento ligeiramente mais elástico. No entanto, as curvas mestras dos ângulos de fase a F/B_v de 40% para os três tipos de fíleres (Q29_40, D29_40 e G29_40) sobrepõem-se. A substituição parcial de cargas com LE leva a um comportamento mais elástico do mastique para todos os três tipos de fíler, notável pelo deslocamento para baixo das curvas de ângulo de fase.

A Figura 6(a) mostra as curvas mestras de $|G^*|$ dos mastiques com F/B_v de 50%. As curvas de $|G^*|$ para os três fíleres estão próximas umas das outras, mas alteraram a classificação com base nos seus valores $|G^*|$ para as diferentes frequências. A Figura 15(b) mostra as curvas de ângulo de fase. O Q tem uma maior variação no comportamento viscoso ao longo das frequências do que os outros fíleres com F/B_v de 50%.

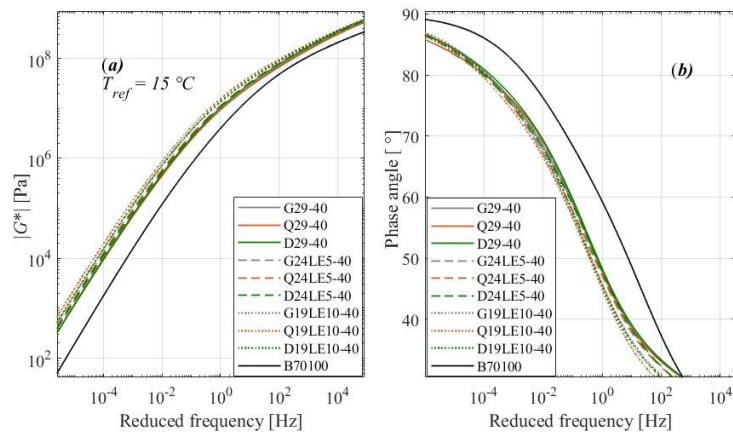


Figura 5. Curvas mestras do $|G^*|$ (a) e do ângulo de fase (b) para $F/B= 40\%$ e filler substituído com 5% e 10% de LE

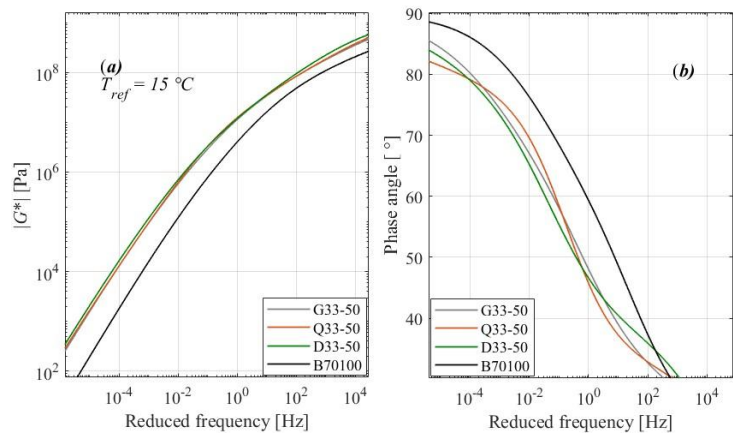


Figura 6. Curvas mestras do $|G^*|$ (a) e do ângulo de fase (b) para $F/B= 50\%$

A Figura 7 apresenta as curvas mestras para o módulo complexo e o ângulo de fase para um $F/B_v=60\%$. A classificação observada é quase semelhante à de F/B de 40% com uma resposta mais rígida. A frequências mais baixas, para o diorito (D), observa-se uma ligeira deslocação para cima na curva mestra $|G^*|$ e, para o quartzo-granito (Q), um comportamento viscoso mais forte (deslocações para cima na curva mestra δ).

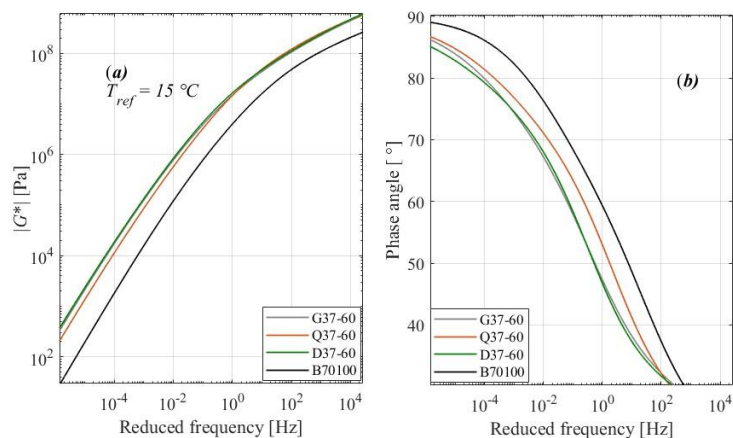


Figura 7. Curvas mestras do $|G^*|$ (a) e do ângulo de fase (b) para $F/B= 60\%$

No geral, os resultados apresentados nas Figuras 5, 6 e 7 indicam que a adição de mais filler leva a um maior efeito no aumento de rigidez, com todas as curvas mestras de $|G^*|$ a deslocarem-se para cima e as curvas mestras de ângulo de fase a deslocarem-se para baixo. Para as curvas mestras de ângulo de fase, existem

algumas diferenças no padrão de classificação ao longo das frequências apresentadas, especialmente na ausência de LE, mostrando que o atributo de ângulo de fase é afetado mais pelo F/B do que pelo tipo fíler. Além disso, as curvas mestras em cada teor de F/B sobrepõem-se bem, especialmente para 40% e 50%, com uma variação de cerca de $\pm 3^\circ$. A explicação para estas diferenças na classificação pode ser atribuída à interação fíler-betume e à compatibilidade do fíler com o betume, o que resultou numa viscoelasticidade variável. Além disso, observa-se uma variação ligeiramente superior entre os mastiques nas frequências mais baixas do que nas mais altas, devido à maior diferença de viscoelasticidade entre o betume e o fíler a temperaturas mais elevadas (frequências mais baixas).

5. Conclusões

Este estudo apresenta parte dos resultados de um estudo laboratorial desenvolvido para investigar as propriedades de mastiques preparados com um betume nominal puro 70/100, três tipos de fíler minerais (granito, diorito e quartzo-granito) e um fíler ativo Terra E (LE) fabricado industrialmente em três diferentes proporções volumétricas de fíler/betume (F/B_v) (40%, 50% e 60%). As propriedades geométricas e físicas dos fileres, tais como a granulometria, a forma das partículas, a massa volúmica, superfície específica e os vazios de Rigden, foram relacionadas com os resultados dos ensaios convencionais de penetração (PEN) e de temperatura de amolecimento ($T_{R\&B}$), bem como com o ensaio do Reómetro de Corte Dinâmico (DSR), através da realização de varrimento de frequências a diferentes temperaturas.

As principais conclusões do estudo desenvolvido podem ser resumidas de seguida:

- O quartzo-granito (Q) proporciona a mais significativa melhoria da resistência à deformação permanente a temperaturas elevadas, seguido do diorito (D) e do granito (G). A dependência da relação F/B de Q é a mais elevada e requer maior cuidado ao selecionar a relação F/B ideal para a aplicação.
- O aumento de rigidez do mástico altera-se significativamente quando os fileres adicionados são substituídos parcialmente por LE. Por exemplo, D apresenta um efeito de rigidez ligeiramente superior ao do Q a F/B_v de 40%, no entanto, com a substituição parcial dos fileres por LE, esta classificação é alterada. Isto deve-se à variação do grau de interação entre o LE e os diferentes fileres minerais (fíler-fíler) e à variação da interação entre os diferentes fileres e o betume (fíler-betume).
- As diferenças observadas nas propriedades físicas e geométricas dos fileres minerais podem explicar o seu efeito de endurecimento e desempenho ligeiramente diferentes. Em geral, o aumento de rigidez aumentou com o aumento do valor de RV. Apesar da forte correlação observada entre SSA e RV, a revisão da literatura sugere que estas propriedades não são consistentes. A forte correlação pode dever-se ao número de fileres (apenas três) em análise. Além disso, a SSA não mostrou uma correlação com o aumento de rigidez dos fileres minerais. No entanto, a diferente distribuição granulométrica e o teor de partículas mais finas do fíler explicam a variação nas propriedades dos mastiques. Por exemplo, no caso do G, a temperatura de amolecimento mais baixa e a resistência à deformação podem ser devidos ao seu teor mais elevado de partículas mais finas, ao passo que a granulometria densa e a maior dimensão média das partículas do D e do Q contribuem para uma melhor resistência à deformação e um aumento de rigidez mais elevado.
- Os mastiques com fíler do tipo G são os menos resistentes à penetração entre os mastiques avaliados, possivelmente devido à granulometria mais fina do granito, que demonstra uma menor resistência à penetração do que os mastiques com fileres de granulometria média a grossa.
- O G, com um teor mais elevado de partículas mais finas e uma distribuição granulométrica mais alargada, parece estar presente em aglomerados, o que o torna menos elástico (maior fluidez) do que o Q e o D, que apresentam partículas mais angulosas, mais grosseiras e com maior uniformidade de tamanho entre si, contribuindo para um melhor comportamento de interbloqueio no mástico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Saffar, N. (2013). The effect of filler type and content on hot asphalt concrete mixtures properties. *Al-Rafidain Engineering*, 21(6), 88–100. <https://doi.org/https://doi.org/10.33899/rengj.2013.82394>
- Antunes, V., Freire, A. C., Quaresma, L., & Micaelo, R. (2015). Influence of the geometrical and physical properties of filler in the filler-bitumen interaction. *Construction and Building Materials*, 76, 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.008>
- Bahia, H., Faheem, F., Hintz, C., Al-Qadi, I., Reinke, G., & Dukatz, E. (2010). *Test Methods and Specification Criteria for Mineral Filler Used in HMA. NCHRP Project 9-45* (P. N. Editor, Ed.). Transportation Research Board.
- Benedetto, H. Di, Delaporte, B., & Sauzéat, C. (2007). Three-Dimensional Linear Behavior of Bituminous Materials: Experiments and Modeling. *International Journal of Geomechanics*, 7(2), 149–157. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2007\)7:2\(149\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(149))
- Brown, E. R., Haddock, J. E., Mallick, R. B., & Lynn, T. A. (1997). *DEVELOPMENT OF A MIXTURE DESIGN PROCEDURE FOR STONE MATRIX ASPHALT (SMA)*.
- Chen, Y., Xu, S., Tebaldi, G., & Romeo, E. (2022). Role of mineral filler in asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*, 23(2), 247–286. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826351>
- Cosme, R. L., Teixeira, J. E. S. L., & Calmon, J. L. (2016). Use of frequency sweep and MSCR tests to characterize asphalt mastics containing ornamental stone residues and LD steel slag. *Construction and Building Materials*, 122, 556–566. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.126>
- Faheem, A. F., & Bahia, H. U. (2010). Modelling of asphalt mastic in terms of filler-bitumen interaction. *Road Materials and Pavement Design*, 11, 281–303. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690335>
- Kandhal, P. (1981). Evaluation of baghouse fines in bituminous paving mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 50, 150–203.
- Kandhal, P. S., Lynn, C. Y., & Parker, F. (1998). Characterization Tests for Mineral Fillers Related to Performance of Asphalt Paving Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1638(1), 101–110. <https://doi.org/10.3141/1638-12>
- Mukhtar, N., Mohd Hasan, M. R., Osman, H., Mohd Zin, Z., Shariff, K. A., Nur, N. I., & Sani, A. (2023). Rheological and physicochemical characteristics of asphalt mastics incorporating lime kiln dust and dolomite powder as sustainable fillers. *Journal of Road Engineering*, 3(1), 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2023.01.001>
- OCDE. (2024). *Pricing Greenhouse Gas Emissions 2024*.
- Pereira, L., Freire, A. C., Sá da Costa, M., Antunes, V., Quaresma, L., & Micaelo, R. (2018). Experimental study of the effect of filler on the ductility of filler-bitumen mastics. *Construction and Building Materials*, 189, 1045–1053. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.063>
- Rigden, P. (1947). The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler-binder systems in relation to filler characteristics. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 66(9), 299–309.
- Steineder, M., & Hofko, B. (2023). Assessing the impact of filler properties, moisture, and aging regarding fatigue resistance of asphalt mastic. *Road Materials and Pavement Design*, 24(12), 2811–2826. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2172066>
- Trafikverket. (2020). *TDOK 2013:0529 Bitumenbundna lager*.
- Zulkati, A., Diew, W. Y., & Delai, D. S. (2012). Effects of Fillers on Properties of Asphalt-Concrete Mixture. *Journal of Transportation Engineering*, 138(7), 902–910. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000395](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000395)