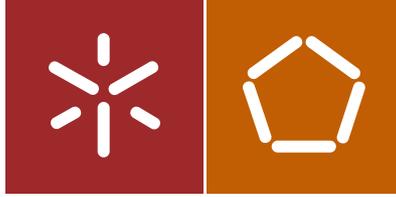




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Manuel da Silva Oliveira

Influência do filer e da borracha no
comportamento do mástique asfáltico



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Manuel da Silva Oliveira

Influência do filer e da borracha no
comportamento do mástique asfáltico

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

AGRADECIMENTOS

Um trabalho desta envergadura abarca uma grande necessidade de meios e condições propícias à realização dos trabalhos, aliados a uma colaboração e ajuda incondicional de vários intervenientes aos quais pretendo endereçar estas palavras de agradecimento.

Começo desde já por agradecer ao Laboratório de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho por toda a disponibilidade de equipamentos e materiais para a realização da dissertação.

Ao Professor Jorge Pais, o meu muito obrigado pela orientação que me foi transmitindo ao longo dos trabalhos, bem como pela disponibilidade que sempre apresentou para falar e debater assuntos para progredir no trabalho. Mais do que alguém que me transmitiu saber, foi alguém me ajudou a aprender a pensar.

Ao Eng. Carlos Palha e ao Eng. Hélder Torres por todo o apoio e pelos concelhos que me transmitiram, bem como a ajuda que sempre disponibilizaram na realização das partes práticas da dissertação.

A todos os colegas do Laboratório um agradecimento sincero por toda a ajuda prestada e por todos os bons momentos partilhados naquele espaço.

Tenho que agradecer a toda a minha família, mas em especial aos meus pais pela possibilidade que me deram de seguir um percurso académico que tanto ambicionei desde miúdo e que com esta etapa se revela mais próximo de alcançar. A toda a família um obrigado por me apoiarem e incentivarem sempre que foi necessário.

À Joana, pois sem ela possivelmente não teria conseguido. Pela motivação, pelo apoio incondicional e constante, pelo exemplo que sempre vi em ti e na tua capacidade de conquista a tudo o que te propões e pela paciência que sempre tiveste comigo, um obrigado muito especial.

Queria ainda deixar um agradecimento sentido a todos os amigos, em especial à Sara e ao Francisco, que sempre se foram preocupando e me foram motivando para que todo este trabalho tivesse o maior sucesso possível. Por todos os momentos vividos, desde os mais sérios às festas e saídas à noite, ou simplesmente a companhia para o café, o meu muito obrigado.

E porque nem só de trabalho vive o Homem, termino com um agradecimento particular ao Grupo dos Solteirões por todo o companheirismo e amizade demonstrado ao longo destes anos.

Influência do filer e da borracha no comportamento do mástique asfáltico

RESUMO

A constante atividade da sociedade obriga ao desenvolvimentos infraestruturas de transporte que permitam um eficaz movimentos de pessoas e mercadorias, a custos cada vez menores, tanto em termos de construção como de manutenção ao longo do seu ciclo de vida. Associado às infraestruturas de transporte encontram-se os pavimentos, os quais devem ser mais resistentes e duradouros, o que pode ser assegurado pela utilização de misturas betuminosas com cada vez melhor desempenho, podendo atuar quer ao nível dos ligantes quer ao nível da sua composição.

O presente estudo tem como objetivo estudar o comportamento do mástique asfáltico perante a utilização de diferentes tipos de betume e filer, bem como para o caso de utilização de betume-borracha. Para a realização deste trabalho utilizou-se 2 tipos de borracha (criogénica e ambiental) e 3 tipos de filer (pó calcário, cimento e cal hidráulica), incorporados nos 2 tipos de betume mais utilizados em Portugal (35/50 e 50/70).

O comportamento mecânico do mástique foi avaliado recorrendo a ensaios relacionados com o comportamento, nomeadamente: penetração com agulha, temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola, viscosidade com recurso a um viscosímetro brookfield e resiliência. Foi feita avaliado o comportamento reológico dos mástiques recorrendo a um reómetro dinâmico de corte.

Os resultados obtidos permitiram perceber a forma como o tipo de filer, o betume e o tipo de borracha influencia o comportamento do mástique.

Palavras-Chave: Mástique asfáltico, Filer, Borracha, Comportamento

Influence of the filler and rubber on the behavior of the asphalt mastic

ABSTRACT

Constant demands of society make it utterly necessary for it to occur a development of transportation infrastructures so as to allow an effective flow of people and goods with smaller costs, whether in terms of construction as well as in terms of maintenance during its life cycle. Associated to transportation infrastructures are pavements and those ought to be more resistant and lasting, which can be ensured through the use of bituminous mixtures with an increasingly better performance, being able to perform both with binders and its composition.

This paper aims at studying the behavior of asphaltic mastic facing the use of different types of bitumen and filler as well as the case of the use of rubber bitumen. For this paper were used two types of rubber (cryogenic and ambient) and three types of filler (limestone filler, cement and hydraulic lime) incorporated in the two most used types of bitumen in Portugal (35/50 and 50/70).

The mechanical behavior of the mastic was evaluated through performance related tests, namely, needle penetration, softening temperature with the ring and ball method, viscosity using a Brookfield viscometer and resilience. The rheological behavior of the mastics was done using a dynamic shear rheometer.

Results obtained allowed to understand the way the kind of filler, bitumen and rubber influences the behavior of the mastic.

Keywords: Asphalt mastic, Filler, Rubber, Behavior

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento temático	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Conteúdo da dissertação	3
2	ESTADO DA ARTE SOBRE COMPORTAMENTO DO MÁSTIQUE.....	5
2.1	Introdução às misturas betuminosas	5
2.2	Comportamento do mástique	13
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	21
3.1	Plano de ensaios.....	21
3.2	Materiais	22
3.2.1	Betume Asfáltico	22
3.2.2	Filer.....	22
3.2.3	Borracha.....	23
3.3	Métodos Experimentais	24
3.3.1	Processo de produção.....	24
3.3.2	Ensaio realizados	30
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	34
4.1	Introdução	34
4.1	Betume-borracha.....	34
4.2	Betume + filer	45
4.3	Betume-borracha + filer.....	54
4.4	Comparação entre mástiques	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5.1	Conclusões	77
5.2	Trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tráfego em Istambul - Turquia (cidade mais congestionada do mundo)	5
Figura 2 - Rodeira de pequeno raio num pavimento	6
Figura 3 - Fendilhamento em forma de pele de crocodilo.....	7
Figura 4 - Processo de produção de misturas betuminosas em central contínua (Asphalt Institute, 1998)	8
Figura 5 - Filer calcário	11
Figura 6 - Borracha ambiental (esquerda) e criogénica (direita).....	13
Figura 7 - Incorporação de filer ao betume, criando um mástique.....	15
Figura 8 - Curvas granulométricas das borrachas utilizadas	23
Figura 9 - Processo de produção do betume-borracha	25
Figura 10 - Produção dos mástiques com betume + filer	27
Figura 11 - Produção dos mástiques com betume-borracha + filer.....	29
Figura 12 - Ensaio de penetração com agulha.....	30
Figura 13 - Ensaio de anel e bola: (a) Equipamento; (b) Amostras no final do ensaio.....	31
Figura 14 - Ensaio de resiliência	32
Figura 15 - Ensaio de viscosidade através do viscosímetro rotacional <i>Brookfield</i>	33
Figura 16 - Ensaio de reologia.....	33
Figura 17 - Penetração dos betumes-borracha.....	35
Figura 18 - Temperatura de amolecimento dos betumes-borracha	37
Figura 19 - Resiliência dos betumes-borracha	38
Figura 20 - Viscosidade dos betumes-borracha.....	40
Figura 21 - Módulo complexo dos betume-borracha	42
Figura 22 - Ângulo de fase dos betume-borracha	42
Figura 23 - Parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ dos betumes-borracha.....	43
Figura 24 - Módulo dissipativo dos betumes-borracha	44
Figura 25 - Componente elástica do módulo de corte dos betumes-borracha.....	44
Figura 26 - Penetração do betume + filer	45
Figura 27 - Temperatura de amolecimento dos betumes + filer.....	47
Figura 28 - Resiliência dos betumes + filer.....	49
Figura 29 - Viscosidade dos betumes + filer	51

Figura 30 - Módulo complexo dos mástiques betume + filer	51
Figura 31 - Ângulo de fase dos mástiques betume + filer	52
Figura 32 - Parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ dos mástiques betume + filer	53
Figura 33 - Módulo dissipativo dos mástiques betume + filer.....	53
Figura 34 - Componente elástica do módulo de corte dos mástiques betume + filer	54
Figura 35 - Penetração dos mástiques betume-borracha + filer.....	55
Figura 36 - Temperatura de amolecimento dos betumes-borracha + filer.....	56
Figura 37 - Resiliência dos betumes-borracha + filer	58
Figura 38 - Viscosidade dos betumes-borracha + filer	60
Figura 39 - Módulo complexo dos mástiques com betume-borracha + filer	61
Figura 40 - Ângulo de fase dos mástiques com betume-borracha + filer	61
Figura 41 - Parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ dos mástiques com betume-borracha + filer.....	62
Figura 42 - Módulo dissipativo dos mástiques com betume-borracha + filer	62
Figura 43 - Módulo elástico dos mástiques com betume-borracha + filer.....	63
Figura 44 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica.....	64
Figura 45 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica.....	65
Figura 46 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica	66
Figura 47 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental	67
Figura 48 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental.....	68
Figura 49 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental	69
Figura 50 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica.....	70
Figura 51 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica.....	71
Figura 52 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica	72
Figura 53 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental	73
Figura 54 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental.....	74
Figura 55 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de betume	9
Tabela 2 - Tipos de betume e suas propriedades e exigências de conformidade	10
Tabela 3 - Betumes-borracha produzidos na 1ª fase.....	24
Tabela 4 - Mástiques produzidos na 2ª fase: betume + filer.....	26
Tabela 5 - Mástiques produzidos na 3ª fase: betume-borracha + filer	28
Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de penetração	34
Tabela 7 - Variação dos resultados do ensaio de penetração em relação ao betume de origem.....	35
Tabela 8 - Resultados obtidos no ensaio de anel e bola	36
Tabela 9 - Variação dos resultados do ensaio de anel e bola em relação ao betume de origem.....	37
Tabela 10 - Resultados obtidos no ensaio de resiliência nos betumes-borracha.....	38
Tabela 11 - Variação dos resultados do ensaio de resiliência em relação ao betume de origem.....	39
Tabela 12 - Resultados obtidos no ensaio de viscosidade para os betumes-borracha.....	40
Tabela 13 - Resultados do ensaio de penetração do betume + filer	45
Tabela 14 - Variação da penetração do betume + filer em relação ao betume de origem.....	46
Tabela 15 - Temperatura de amolecimento dos betumes + filer	46
Tabela 16 - Variação da temperatura de amolecimento em relação ao betume de origem	47
Tabela 17 - Resiliência nos betumes + filer	48
Tabela 18 - Variação da resiliência do betume + filer em relação ao betume de origem.....	49
Tabela 19 - Viscosidade nos betumes + filer.....	50
Tabela 20 - Penetração dos mástiques betume-borracha + filer.....	55
Tabela 21 - Variação Penetração em relação ao betume de origem	55
Tabela 22 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume-borracha+filer.....	56
Tabela 23 - Variação da temperatura de amolecimento dos betumes-borracha + filer em relação ao betume de origem.....	57
Tabela 24 - Resiliência dos betumes-borracha + filer.....	57
Tabela 25 - Variação da resiliência dos betumes-borracha + filer em relação ao betume de origem.....	58
Tabela 26 - Viscosidade nos betumes-borracha + filer	59

Tabela 27 - Comparação entre os mástiques produzidos	63
Tabela 28 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica	64
Tabela 29 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica.....	65
Tabela 30 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica	66
Tabela 31 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental	67
Tabela 32 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental.....	67
Tabela 33 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental.....	68
Tabela 34 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica	69
Tabela 35 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica.....	70
Tabela 36 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica	71
Tabela 37 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental	72
Tabela 38 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental.....	73
Tabela 39 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental.....	74

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AR-35-CR	- Asphalt + rubber – B35/50 – cryogenic rubber
AR-50-CR	- Asphalt + rubber – B50/70 – cryogenic rubber
AR-35-AR	- Asphalt + rubber – B35/50 – ambient rubber
AR-50-AR	- Asphalt + rubber – B50/70 – ambient rubber
AF-35-LF	- Asphalt + filler – B35/50 – lime filler
AF-50-LF	- Asphalt + filler – B50/70 – lime filler
AF-35-CF	- Asphalt + filler – B35/50 – cement filler
AF-50-CF	- Asphalt + filler – B50/70 – cement filler
AF-35-HF	- Asphalt + filler – B35/50 – hidraulic filler
AF-50-HF	- Asphalt + filler – B50/70 – hidraulic filler
ARF-35-CR-LF	- Asphalt + rubber + filer – B35/50 - cryogenic rubber - lime filer
ARF-50-CR-LF	- Asphalt + rubber + filer – B35/50 - cryogenic rubber - lime filer
ARF-35-AR-LF	- Asphalt + rubber + filer – B35/50 - ambient rubber - lime filer
ARF-50-AR-LF	- Asphalt + rubber + filer – B35/50 - ambient rubber - lime filler

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

A rede rodoviária constitui a infraestrutura de transporte mais importante para o desenvolvimento de qualquer país. Esta rede, composta por uma base de estradas principais ligadas a vias de importância progressivamente menor, permite assegurar de forma adequada o acesso a qualquer ponto do território. Até nas outras redes de transporte, como as vias férreas, as ligações aéreas ou marítimas, por exemplo, é através da rede rodoviária que é possível completar a cobertura do território.

Existiu ao longo do século XX uma evolução enorme ao nível da construção e reabilitação da rede rodoviária, com especial foco nas últimas dezenas de anos, onde se tem verificado um desenvolvimento notório seja ao nível da conceção dos pavimentos, como nos materiais utilizados ou até nos métodos de dimensionamento e nas práticas construtivas.

O pavimento é um dos principais constituintes de uma estrada, estando sujeito a ação do tráfego e do clima, sofrendo degradações, as quais devem ser evitadas por forma a rentabilizar os investimentos feitos e também pelas questões de comodidade e segurança inerentes à circulação rodoviária.

Para isso é necessário melhorar o comportamento estrutural e funcional dos pavimentos, em especial das camadas betuminosas porque estas possuem uma influência determinante no desempenho estrutural e funcional dos pavimentos.

Estas camadas são constituídas por misturas betuminosa, as quais são constituídas por materiais granulares, misturados em central com uma determinada quantidade de ligante. Depois de realizada a mistura betuminosa, esta é levada para o local de aplicação, espalhada e compactada, constituindo assim uma camada do pavimento.

As misturas devem também possuir determinadas características próprias como a estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade.

Quanto à constituição das misturas betuminosas, estas contêm 3 componentes: agregados, ar e betume. O betume é obtido através da destilação do petróleo bruto, sendo um produto negro que apresenta boas qualidades adesivas. A sua consistência varia consoante a temperatura, ficando mole quando aquecido e endurecendo quando arrefece.

A mais frequente causa de degradação de um pavimento é sem dúvida o fendilhamento que resulta normalmente da fadiga dos materiais. Habitualmente o fendilhamento ocorre pelo mástique existente na mistura betuminosa, sendo que o mástique funciona de ligação aos agregados mais grossos, atingindo a mistura betuminosa o fendilhamento quando o mástique o atinge. Assim sendo, é importante compreender o comportamento do mástique de modo a melhor compreender o comportamento das misturas betuminosas.

Um modo de conferir às misturas betuminosas um melhor comportamento consiste na utilização de betumes modificados, os quais resultam da incorporação de aditivos como polímeros, resinas, endurecedores ou borrachas por exemplo, e que visam aumentar a sua flexibilidade e suscetibilidade térmica.

O estudo proposto neste trabalho pretende compreender melhor o comportamento do mástique de modo a melhorar o comportamento das misturas betuminosas, avaliando-se o desempenho do mástique para diferentes tipos de filer e de borracha, no caso da utilização de betume modificado com borracha.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é compreender de que forma diferentes tipos de filer e diferentes borrachas, ao serem incorporados no betume, influenciam o comportamento do mástique, avaliando-se este comportamento através de ensaios baseados no desempenho, nomeadamente penetração, temperatura de amolecimento, resiliência e viscosidade, e comportamento reológico.

Com o desenvolvimento deste trabalho pretende obter-se resultados que permitam analisar a influência das diferentes variáveis em estudo (betume, borracha e filer) no comportamento do mástique.

Os resultados do comportamento reológico dos mástique permitem a sua utilização na modelação do comportamento de misturas betuminosas, recorrendo à diferenciação dos agregados e do mástique e assim extrapolar os resultados para uma previsão de comportamento dos pavimentos.

1.3 Conteúdo da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo este primeiro dedicado a uma introdução ao trabalho, apresentando-se também os objetivos a atingir.

O capítulo 2 é dedicado ao estado da arte onde é feita uma breve introdução aos pavimentos, às misturas betuminosas e seus componentes para enquadrar o mástique, em relação ao qual é feita uma apresentação dos estudos que referem o seu comportamento.

No terceiro capítulo é feita uma descrição dos materiais utilizados neste trabalho e a razão da sua escolha. É também exposto de forma pormenorizada os métodos de ensaio utilizados, quer sejam os métodos referentes ao processo de produção, quer sejam dos ensaios realizados para avaliação do comportamento do mástique.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos na realização deste trabalho, bem como uma análise aos mesmos.

No quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, referindo-se também os trabalhos futuros que podem ser realizados.

2 ESTADO DA ARTE SOBRE COMPORTAMENTO DO MÁSTIQUE

Neste capítulo é realizado uma introdução às misturas betuminosas, enquadrada pelas patologias mais frequentes dos pavimentos rodoviários, pelas principais características das misturas betuminosas, pelo betume asfáltico, pelo filer e pela borracha.

Após esta descrição, é realizada uma síntese do conhecimento sobre o comportamento do mástique asfáltico quando aplicado em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários.

2.1 Introdução às misturas betuminosas

Um dos efeitos da evolução das sociedades é o aumento do tráfego, ligeiro e pesado, como se pode ver na Figura 1, e por forma a melhor conseguir dar resposta a estas exigências do quotidiano surge a necessidade de produzir melhores estradas e consequentemente melhores pavimentos rodoviários. Para que isso seja possível impõe-se a constante melhoria do desempenho das novas misturas betuminosas, de modo a aumentar a sua capacidade resistente e período de vida das estradas.



Figura 1 - Tráfego em Istambul - Turquia (cidade mais congestionada do mundo)

Esta exigência leva ao desenvolvimento dos betumes modificados, principalmente com polímeros, com borracha, entre outros, sendo estes ligantes o resultado de uma reação química

que lhes confere características diferenciadoras em relação aos betumes convencionais, como sejam o garantir uma maior coesão e tenacidade à mistura e uma maior resistência à fadiga, maior elasticidade, maior resistência ao envelhecimento e às deformações plásticas, boa adesividade com os agregados e baixa suscetibilidade térmica.

Entre os principais tipos de patologias que surgem nos pavimentos importa referir as deformações e o fendilhamento. Estes tipos de degradações estão diretamente ligados ao comportamento dos ligantes utilizados nas misturas betuminosas e como tal é importante estudar o seu comportamento de modo a maximizar as suas capacidades resistentes.

No que diz respeito às deformações, aquelas que são diretamente relacionadas com o ligante utilizado são as rodeiras de pequeno raio, como se verifica na Figura 2, as quais demonstram a baixa capacidade da mistura resistir às cargas do tráfego perante condições de temperatura elevadas.



Figura 2 - Rodeira de pequeno raio num pavimento

No que diz respeito ao fendilhamento, como o que se verifica na Figura 3, sabe-se que este normalmente ocorre pelo betume e não pelos agregados. Assim, é importante que o ligante a ser utilizado para a produção de misturas betuminosas tenha uma boa adesividade com os agregados e que não seja frágil por forma a evitar o aparecimento de fendas.

As fendas mais usuais devidas a problemas com o ligante são as fendas isoladas e ramificadas (conhecida como pele de crocodilo) e a desagregação.



Figura 3 - Fendilhamento em forma de pele de crocodilo

As misturas betuminosas são utilizadas para a realização das camadas mais nobres de um pavimento rodoviário e desta forma desempenham sem dúvida um papel fulcral no desempenho e durabilidade de um pavimento.

A sua constituição contempla um conjunto de materiais granulares devidamente quantificados e doseados, dependendo da camada a executar, e misturados em central com uma determinada quantidade de betume (ligante) previamente definida.

Depois de produzida a mistura, esta é encaminhada para o local de aplicação, espalhada e compactada, gerando assim uma camada de pavimento.

A Figura 4 apresenta o processo de produção de misturas betuminosas em central, neste caso contínua, onde se podem observar a sequência dos processos de produção.

Existem várias características fundamentais que uma mistura betuminosa deve ter como seja a estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade. Cada uma destas características é influenciada pelos diferentes constituintes da mistura, pelo que a seguir se explica mais em pormenor os componentes das misturas betuminosas.

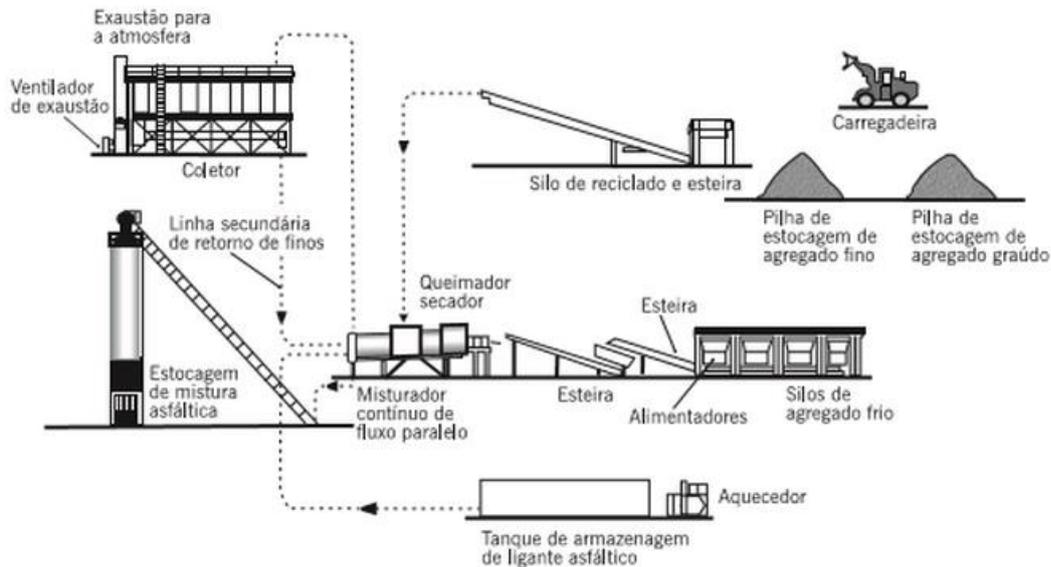


Figura 4 - Processo de produção de misturas betuminosas em central contínua (Asphalt Institute, 1998)

O betume asfáltico é o ligante mais utilizado na produção de misturas betuminosas para aplicação em pavimentos rodoviários. Este material apresenta cor negra e é composto por hidrocarbonetos saturados. Apresenta boas qualidades adesivas e é um termoplástico com boa consistência à temperatura ambiente, ficando mole quando aquecido e endurece após arrefecer.

A sua origem provem da destilação direta ou fracionada do petróleo bruto e a sua composição varia mediante a origem do betume, fazendo com que a sua caracterização química seja extramente complexa de definir. Pode, no entanto, separar-se os betumes em dois conjuntos moleculares:

- Asfaltenos: componente mais sólida do betume em que o aumento das sua quantidade torna o betume mais duro;
- Maltenos: podem dividir-se em três subconjuntos:
 - Resinas: principal responsável pela adesividade do betume e funcionam como dispersante dos asfaltenos no betume;
 - Aromáticos: maior constituinte do betume e apresentam características viscosas;

- Saturados: onde se enquadram os componentes orgânicos presentes no betume e apresentam um comportamento mais oleoso.

Existem diferentes tipos de betume, apresentados na Tabela 1, sendo que a sua nomenclatura advém do resultado do ensaio de penetração à temperatura de 25°C.

Tabela 1 - Tipos de betume

Tipos de betume							
10/20	20/30	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220	250/300

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois tipos de betume: o betume 35/50 e o betume 50/70 por serem os dois tipos de betume mais utilizados atualmente em Portugal para a produção de misturas betuminosas.

Apesar do betume ser caracterizado pelo valor da penetração, existem outras propriedades que importa quantificar nos betumes, as quais são apresentadas na Tabela 2, correspondendo às exigências de conformidade dos betumes.

Atualmente, todos os betumes comercializados são obrigados a deter marcação CE e como tal necessitam de respeitar todas as características identificadas na legislação vigente.

Importa ainda referir que das propriedades apresentadas na Tabela 2, as consideradas mais importantes na caracterização de um betume são a temperatura de amolecimento e a penetração a 25°C, pois através destas duas propriedades é possível estabelecer correlações e determinar assim a viscosidade de um betume ou a temperatura do betume para determinada consistência.

Segundo Santana (1995), o filer é descrito como sendo um material constituído por partículas minerais provenientes dos agregado grossos e/ou finos utilizados na mistura betuminosa (filer recuperado), ou de outras fontes, como por exemplo, pó calcário, cal hidráulica e cimento Portland (filer comercial) que pode melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e

de sensibilidade à água das misturas betuminosas, desde que obedecidos os limites definidos para a granulometria e a plasticidade

Tabela 2 - Tipos de betume e suas propriedades e exigências de conformidade

Propriedades [Condições de ensaio]		Tipos de betume e exigência de conformidades								
		Tipos	10/20	20/30	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Penetração (0,1mm) [25°C, 100g, 5s]	Mín.	10	20	35	50	70	100	160	250	
	Máx.	20	30	50	70	100	150	220	330	
Temperatura de amolecimento método de anel e bola (°C)	Mín.	63	55	50	46	43	39	35	30	
	Máx.	76	63	58	54	51	47	43	38	
Viscosidade cinemática (mm ² /s) [135° C]	Mín.	1000	530	370	295	230	175	135	100	
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)	Mín.	99	99	99	99	99	99	99	99	
Temperatura de inflamação (°C)	Mín.	250	240	240	230	230	230	220	220	
Resistência ao endurecimento	Varição da massa (%,±)	Máx.	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	1.0	1.0
	Penetração (% p.o.) [25°C, 100g, 5s]	Mín.	60	55	53	50	46	43	37	35
	Temperatura de amolecimento	Mín.	65	57	52	48	45	41	37	32
	Aumento da temperatura de amolecimento (°C)	Máx.	8	10	11	11	11	12	12	12

Analisando a norma EN 13043, o filer é o agregado cuja maior parte passa no peneiro com malha de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir como principais funções o preenchimento dos vazios entre os agregados das misturas betuminosas e aumentar a resistência da mistura betuminosa à desagregação.

O filer quando misturado com o ligante betuminoso confunde-se com este devido à sua estrutura e dimensão que é visível através da Figura 5 formando assim um meio contínuo mais viscoso. Por conseguinte, é possível incorporar uma maior quantidade de ligante nas misturas betuminosas, o que lhes confere melhores propriedades estruturais e funcionais, aumentando assim a sua capacidade resistente e durabilidade.



Figura 5 - Fíler calcário

O fíler confere às misturas betuminosas capacidades de compactação e de impermeabilização. As características físicas e químicas deste material influenciam também o comportamento das misturas betuminosas.

Este material pode ser natural, artificial, de origem inorgânica e mineral, podendo ser agrupado em dois grandes grupos:

- Fíler de recuperação ou recuperado;
- Fíler comercial.

O fíler recuperado tem origem na recuperação da parte mais fina que é libertada aquando da mistura e secagem dos agregados no processo de produção da mistura betuminosa.

O fíler comercial advém da exploração de pedreiras, sendo a parte mais fina que lá se produz, sendo comercializado como os outros agregados de granulometria maior.

Presentemente considera-se um terceiro grupo onde se poderá enquadrar o fíler recuperado dos resíduos de construção e demolição (RCD), como por exemplo pó de tijolo.

A relação entre a quantidade de fíler e de betume, o tipo de ligação entre eles, e principalmente as características do tipo a utilizar, têm uma influência significativa no comportamento das misturas betuminosas, o que justifica a importância dada ao seu estudo no presente trabalho.

Em Portugal utiliza-se principalmente filer de 2 origens: granítica e calcária. As partículas de filer calcário apresentam uma forma aproximadamente esférica, o que permite uma melhor organização no esqueleto da mistura, mas oferece uma baixa resistência estrutural. Já o filer granítico exibe maior resistência estrutural mas as partículas que o compõem apresentam forma mais alongada e irregular o que não contribui para a trabalhabilidade das misturas betuminosas.

Analisando a irregularidade geométrica do filer, esta revela-se de grande importância, pois quanto maior for a atividade superficial do filer maior a sua superfície específica, originando o aumento da viscosidade e da temperatura de amolecimento do mástique onde é utilizado. Consequentemente isto leva à diminuição da penetração e ductilidade do mástique. O mesmo acontece quando se aumenta a proporção filer/betume na maioria dos mástiques.

Um dos principais modos de modificação dos betumes para melhorar o desempenho das misturas betuminosas recorre à utilização de granulado de borracha reciclada de pneus usados.

Existem principalmente dois modos de obtenção de granulado de borracha de pneus: o granulado de borracha obtido por moagem à temperatura ambiente e o granulado de borracha obtido por moagem a temperatura criogénica. Ambas as borrachas são resultado da reciclagem de pneus usados, material altamente poluente e com esta utilização permite-se dar uma utilidade final a estes resíduos e levando assim a uma redução do impacto ambiental produzido por este material. A diferença entre as duas borrachas é apresentada na Figura 6.

A borracha ambiental advém de um processo mecânico que consiste na trituração mecânica dos pneus onde esta é fragmentada numa série de trituradoras e moinhos, sendo o aço retirado através de separação magnética e o têxtil separado por diferença de densidade. No final do processo, o granulado de borracha é dividido, consoante a sua granulometria, através de crivos com diferentes dimensões de malha e a parte mais fina é utilizada nas misturas betuminosas.

Já para a produção da borracha criogénica, o processo caracteriza-se pelo arrefecimento criogénico dos polímeros constituintes da borracha, por ação do azoto líquido, sendo depois submetidos a forças de alto impacto.



Figura 6 - Borracha ambiental (esquerda) e criogénica (direita)

O processo de granulação, por alto impacto em moinhos de martelos (sem desenvolvimento de fricção, esforços de corte ou atrito no material) é assim realizado em atmosfera inerte, numa fração de segundo e a baixíssima temperatura. Deste modo, o processo criogénico não degrada química nem termicamente as cadeias moleculares dos polímeros de borracha, e as suas propriedades elásticas (absorção de impactos e recuperação elástica) mantêm-se inalteradas.

Ao contrário do que acontece na borracha ambiental, a borracha criogénica apresenta uma granulometria mais uniforme onde os grânulos apresentam uma morfologia do tipo cubóide, de faces lisas, praticamente sem poros, com aspeto brilhante, como se fossem encapsulados por uma película reluzente.

2.2 Comportamento do mástique

Numa dissertação onde o tema a ser estudado é a influência da incorporação de materiais no betume, criando assim mástiques e analisando as suas propriedades, é fundamental desenvolver uma ampla pesquisa sobre o comportamento do mástique para que assim os resultados obtidos sejam mais facilmente compreendidos e interpretados. Nesse sentido, este subcapítulo revela-

se de grande importância e servirá de base para muitos dos assuntos analisados ao longo da dissertação.

O comportamento do mástique é uma temática que tem vindo a ser estudada por diversos investigadores e da qual se encontram diversas publicações sobre estudos desenvolvidos na área. Vários autores apresentam diferentes definições para o mástique betuminoso, sendo que os conceitos principais presentes em todas elas referem que o mástique é uma mistura de filer e de betume como ilustra a Figura 7.

Será este mástique que posteriormente irá envolver e ligar os agregados mais grossos das misturas betuminosas, além de preencher os espaços vazios existentes no “esqueleto” mineral da mistura betuminosa de modo a garantir-lhes compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade, bem como outras características já referenciadas.

Existem características que são típicas dos betumes e que se refletem nos mástiques que tem esses mesmos ligantes como base. As componentes viscoelásticas e a variação do seu comportamento com a temperatura apresentam variações similares.

Cooley Jr *et al.* (1997) e Craus *et al.* (1978) apontam que a variação da penetração, da temperatura de amolecimento, da viscosidade e da ductilidade pode ser utilizada para analisar o “endurecimento” no ligante devido à relação direta que existe entre estas características e o ligante.

Sadd *et al.* (2002) e You & Buttlar (2005) consideram que uma mistura betuminosa é constituída por dois materiais distintos, nomeadamente os agregados grossos e o mástique. O mástique, constituído pelo ligante e a fração fina da mistura gera uma matriz com um comportamento viscoso e plástico que envolve e junta os agregados mais grossos.

Resumidamente, o mástique é o aglutinante das misturas betuminosas e as suas propriedades dependem essencialmente dos seguintes aspetos:

- Do tipo e da quantidade dos seus componentes;
- Das propriedades reológicas do ligante;
- Da forma e estrutura do filer utilizado.



Figura 7 - Incorporação de filer ao betume, criando um mástique

Existem várias vantagens na utilização de mástiques para a produção de misturas betuminosas, entre as quais se destacam uma melhor resistência no material de preenchimento dos espaços vazios entre os agregados. No entanto, importa ter em atenção que mástiques muito rígidos dão origem a misturas betuminosas e pavimentos muito frágeis e rúpteis, principalmente a baixas temperaturas onde podem surgir fissuras de origem térmica.

Sabendo de antemão que as principais patologias dos pavimentos são as deformações permanentes e a fissuração, importa tentar mitigar estes efeitos e para isso o estudo do comportamento adequado dos materiais que compõem as misturas e a sua interação revelam-se primordiais.

Já é conhecida desde há muito tempo a importância que o filer desempenha nas misturas betuminosas com o preenchimento de vazios e funcionando como parte ativa do mástique, sendo que deve ser bem calibrada a sua dosagem pois este influencia a lubrificação dos agregados maiores. Assim, as respostas mecânicas e condições de trabalhabilidade são então altamente influenciadas pela qualidade do mástique.

A rigidez e fadiga são duas particularidades fortemente ligadas à qualidade dos mástiques, sendo que uma elevada rigidez permite ao pavimento apresentar uma boa resistência à deformação permanente e capacidade para suportar um estado de tensão superior em qualquer gama de temperatura e permite ainda uma maior oposição ao surgimento de fissuras.

Focando ainda mais no papel do filer nas misturas betuminosas, Santana (1995) refere que este material é altamente afetado pela sua granulometria e pelas características superficiais, pois ao ser utilizado como material de enchimento dos vazios entre os agregados, este age como material ativo através da interface filer – betume, não podendo ser considerado então como material inerte, ao contrario do que é apresentado em definições de vários documentos normativos.

Enquanto Craus *et al.* (1978) consideram que as capacidades de adsorção do filer são a componente mais importante para a sua caracterização, Kavussi & Hicks (1997) acrescentam que para além disso, o tipo de filer, a sua natureza e a concentração na mistura são também fatores importantes.

Motta & Leite (2000) também refere que a granulometria do filer é muito importante pois quanto mais fino este for, menor deve ser a relação filer-ligante pois isto levará a um aumento da espessura de recobrimento das partículas dos agregados. Isto conduz a uma alteração das condições de trabalhabilidade e comportamento da mistura, sendo que quanto mais fino for o filer, maior será o efeito repercutido.

Com todas estas referências e conclusões é importante reter que a caracterização do filer através de normas é algo que deve ser feito pois o aumento de material fino na mistura conduz a uma melhoria da graduação e da trabalhabilidade das misturas até determinado ponto. Ultrapassado esse valor, quanto maior a percentagem de finos, pior a estabilidade e trabalhabilidade, pois ocorre uma redução do contacto entre os agregados grossos e diminui a capacidade de compactação.

Estes fatores de falta ou excesso de filer foram estudados e de modo a serem evitados McGennis *et al.* (1994) estabeleceram a razão entre o filer mineral e o ligante betuminoso, recorrendo ao seu peso. Esta razão designada por *dust proportion* recomenda valores entre 0,6 e 1,8 para todos os tipos de misturas.

Um dos aspetos estudados sobre a incorporação de filer é a sua mais-valia para aumentar a uniformidade das misturas e diminuir a sua suscetibilidade térmica, pois além de preencher os vazios, o filer aumenta a viscosidade e o ponto de amolecimento e reduz a penetração do ligante. Outra vantagem é também o aumento da resistência aos esforços de corte (bastante frequentes em zonas de viragem como cruzamentos, rotundas e curvas apertadas) e da resistência à tração aquando da flexão decorrente da passagem dos veículos.

O comportamento dos mástiques também depende da origem do filer e nesse sentido foram estudados diferentes tipos de filer por diferentes autores. Motta & Leite (2000) estudou pó calcário, cimento Portland e pó de pedra, sendo o primeiro o de granulometria menor, o segundo de tamanho intermédio e o último de granulometria maior.

De referir que no estudo desenvolvido, o filer calcário foi o que apresentou melhores resultados em termos de módulo e resistência à tração, comparativamente com os outros 2 tipos de filer utilizados. Até nos resultados mecânicos, a mistura que apresentou maior rigidez foi a de filer calcário pois ao ser de granulometria baixa permitiu uma maior incorporação de agregado fino no ligante.

Souza *et al.* (1998) utilizou como filer o pó proveniente das fábricas de serragem de rocha granítica e fez uma comparação com misturas que utilizavam cal e cimento Portland. No final da análise apercebeu-se que as misturas que utilizavam a cal como filer eram as que apresentavam maior estabilidade mas que também era a mistura com um teor de betume maior (6%). Teve ainda como conclusões que aumentando o teor de filer também aumenta a resistência à tração, mas o teor de ligante de projeto só se altera se for alterado o teor em filer, ou seja, o teor de betume de projeto não varia com a alteração do tipo de filer utilizado.

Existem ainda outros tipos de filer como a areia do campo, a cal hidratada e o carbonato de magnésio que foram estudados por Souza *et al.* (1998) e Soares & Cavalcante (2001), mas sem resultados de maior e muito similares aos anteriormente descritos.

Existiu apenas um outro tipo de filer que apresentou excelentes características, melhores que as obtidas com a cal. Este estudo foi feito por Farias (2005) que utilizou como filer o resultante da britagem de solidificações lateríticas que são o resultante de uma rocha característica das regiões tropicais, formada essencialmente por hidróxidos de ferro e alumínio. Os resultados obtidos foram francamente positivos no que respeita à resistência à tração e à fadiga das misturas.

Até este ponto e em suma do que até agora foi referido neste subcapítulo, é de referir que os estudos desenvolvidos no âmbito dos mástiques caracterizam-se pela análise do filer, a relação filer-ligante e o tipo de ligação entre o filer e o ligante para avaliar a sua influência no comportamento das misturas betuminosas, concluindo-se que o mástique e os seus constituintes, em especial o filer, apresentam influência significativa no comportamento das misturas.

O mástique apresenta uma enorme influência na estrutura da mistura betuminosa em um nível macroestrutural, o que permite através da sua análise prever o comportamento das misturas. A utilização de filer nas misturas betuminosas prende-se essencialmente pelo interesse aumentar a rigidez das mesmas e assim conduzir a um melhor desempenho dos pavimentos.

A utilização de mástiques muito rígidos podem ser aconselháveis para determinado tipo de pavimentos e situações, mas uma rigidez excessivamente elevada leva a que mistura se torne altamente frágil e quebradiça, o que resulta num mau desempenho nos pavimentos a baixa temperatura. Este será sem dúvida o pior dos efeitos da utilização de filer.

Foi anteriormente referido e segundo Kavussi *et al.* (1997), aquando da incorporação de filer no betume, as propriedades físicas e químicas seriam alteradas e importava estudar essas mesmas alterações pois os fileres apresentam diferentes propriedades que dependem essencialmente do seu tipo, natureza e concentração na mistura. A melhor forma de realizar esse mesmo estudo é através da sua análise reológica.

A incorporação de filer nos ligantes, segundo Bahia (1995), resulta num aumento do módulo complexo e redução do ângulo de fase, que se deve essencialmente à natureza rígida do mineral utilizado. Essas alterações são bem diferentes das que ocorrem a quando da incorporação de polímeros ou borracha moída que apresentam módulo complexo menor que os ligantes betuminosos a baixas temperaturas ou intermédias. Esse mesmo autor afirma que a incorporação de filer se faz sentir de forma mais positiva nas temperaturas altas, mas a baixas temperaturas o filer aumenta ainda mais essa rigidez o que já não é assim tão positivo.

Anderson *et al.* (1992) confirmaram isso mesmo ao analisar as propriedades reológicas do mástique, principalmente no que toca ao módulo complexo e ao ângulo de fase onde verificaram que nas temperaturas baixas e intermédias o efeito da integração do filer no ligante era pouco expressivo. Já nas temperaturas altas verificou-se um aumento mais significativo na rigidez e a elasticidade também aumenta com a adição de filer, segundo aquilo que se consegue recolher pela análise na redução dos valores do ângulo de fase.

Uma outra conclusão destes mesmos autores foi que, mesmo com módulos elevados a baixas temperatura, a resistência à tração também aumentou, o que revela que o incorporar de filer nos ligantes é algo benéfico. No entanto, essa incorporação deve ser controlada pois se for excessiva pode conduzir a uma fraca trabalhabilidades das misturas e torna-las excessivamente rígidas.

Assim, importa procurar e conjugar a adição de substâncias e materiais nos betumes para produzir mástiques para serem utilizados em misturas betuminosas e que conduzam a pavimentos mais eficazes e com um período de vida útil maior.

Uma das formas de conseguir isso mesmo poderá ser incorporando borracha em conjunto com o filer, pois principalmente a baixas temperatura apresentam comportamentos opostos e que se compensam um ao outro e a temperaturas mais altas, ambos os constituintes levam o ligante a obtenção de resultados animadores. De referir que isto não passa de uma proposta e opinião pessoal, tendo em conta uma analogia preliminar decorrente da elaboração do estado de arte.

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo apresenta-se o plano de ensaios a realizar para estudar a influência do tipo de filer e de borracha no mástique asfáltico, seguindo-se a descrição e caracterização dos materiais utilizados e dos métodos de ensaio realizados em laboratório.

3.1 Plano de ensaios

O plano de ensaios desenvolvido neste trabalho consistiu na avaliação do comportamento de mástique recorrendo a ensaios relacionados com o desempenho, nomeadamente:

1. Penetração
2. Temperatura de amolecimento
3. Viscosidade
4. Resiliência

Foi ainda avaliado o comportamento reológico dos mástiques através do seu módulo e ângulo de fase ao corte.

Os mástiques utilizados consideraram 3 diferentes tipos de filer e dois tipos de betume de acordo com o descrito a seguir.

Tipos de filer:

1. Filer de pó calcário
2. Cimento Portland
3. Cal hidráulica

Tipos de betume:

1. Betume 35/50
2. Betume 50/70

Com os materiais acima indicados foram produzidos 2 tipos de mástique, nomeadamente:

1. Mástiques produzidos com betume + filer

2. Mástiques produzidos com betume-borracha + filer

O betume-borracha utilizado neste trabalho contemplou o uso dos seguintes tipos de borracha:

Tipos de granulado de borracha

1. Borracha ambiental
2. Borracha criogénica

3.2 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste estudo foram o betume asfáltico, o filer e a borracha (proveniente da reciclagem de pneus usados). A seguir faz-se uma descrição de cada destes materiais.

3.2.1 Betume Asfáltico

Para o desenvolvimento dos trabalhos foram escolhidos 2 tipos de betume convencional: o betume 35/50 e o betume 50/70. Estes são os betumes mais usados para a produção de misturas betuminosas em Portugal, o que desde logo justifica a escolha deste tipo de ligantes para o desenvolvimento do estudo.

Em anexo encontram-se as fichas técnicas de cada um dos betumes utilizados.

3.2.2 Filer

Foram utilizados 3 tipos de filer para o desenvolvimento deste trabalho: filer calcário, cimento Portland e cal hidráulica. A utilização destas 3 soluções prende-se essencialmente com o objetivo deste trabalho, nomeadamente o estudo da influência do tipo de filer no comportamento do mástique.

O filer calcário usado foi obtido através da moagem fina de calcário e apresenta características inertes ao nível da reação química com o betume e todos os constituintes de uma mistura betuminosa.

O cimento utilizado foi o cimento Portland 32,5 R cinzento. Segundo a sua ficha técnica é constituído essencialmente por clínquer, que advém da mistura, moagem e cozedura da matéria que lhe dá origem (calcários, margas e brita de rochas). Este material oferece uma vasta gama de aplicações, entre as quais a de inerte para preenchimento de espaços vazios.

A cal hidráulica também advém de uma rocha mãe, o calcário, e segundo a ficha técnica do material é apropriada para a estabilização de solos e como substituto do filer nos pavimentos betuminosos. A cal hidráulica utilizada tem a designação de HL 5.

3.2.3 Borracha

As borrachas utilizadas neste trabalho foram a ambiental e criogénica, provenientes da reciclagem de pneus usados.

A borracha ambiental, segundo a ficha técnica, apresenta uma granulometria que varia entre os 0,0 mm e os 0,8 mm. Já a borracha criogénica, apresenta uma granulometria entre 0,60 mm e 1,40 mm.

Ambas as borrachas são reconhecidas como sendo de excelente qualidade, limpas de aço, fibras têxteis e outros inertes e as suas curvas granulométricas são apresentadas na Figura 8.

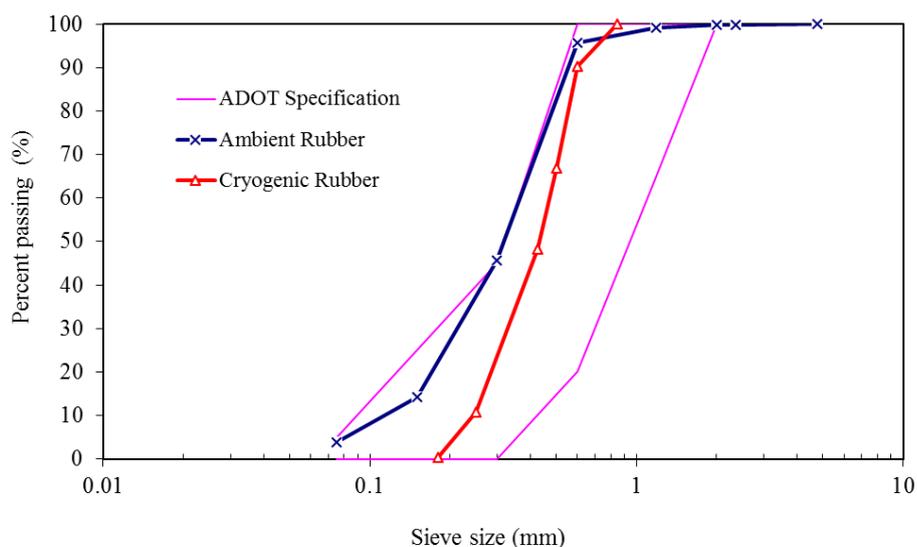


Figura 8 - Curvas granulométricas das borrachas utilizadas

3.3 Métodos Experimentais

Neste capítulo é apresentado o processo de produção dos mástiques e em seguida os ensaios realizados para a sua caracterização.

3.3.1 Processo de produção

Depois de definidos os materiais a utilizar foi necessário definir os processos de produção dos mástiques o qual contemplou três fases distintas, nomeadamente:

- Primeira fase: Betume-borracha
- Segunda fase: Mástique com betume e filer
- Terceira fase: Mástique com betume-borracha e filer

Na primeira fase foram produzidos 4 betumes-borracha, como indicado na Tabela 3, utilizando-se as seguintes siglas:

- AR: Asphalt-Rubber
- 35: Betume 35/50
- 50: Betume 50/70
- CR: Criogenic Rubber
- AR: Ambient Rubber

Tabela 3 - Betumes-borracha produzidos na 1ª fase

<i>Betume-Borracha</i> (<i>nomenclatura</i>)	<i>Betume (tipo)</i>	<i>Borracha (tipo)</i>
AR-35-CR	B35/50	Criogénica
AR-50-CR	B50/70	Criogénica
AR-35-AR	B35/50	Ambiente
AR-50-AR	B50/70	Ambiente

Os betumes-borracha foram produzidos por processo húmido, com uma percentagem de borracha de 19%, adicionada ao betume após este ser aquecido até 180°C (Figura 9 (a)) e estar a ser homogeneizado com recurso a uma misturadora.

Essa mesma misturadora serviu para misturar da forma homogénea o betume e a borracha durante um tempo de digestão de 30 minutos a uma velocidade de 250 rotações/minuto (Figura 9(b) e (c)). Depois de produzido o betume-borracha, foram colhidas a mostras para os ensaios de penetração, resiliência, anel e bola, viscosidade e reologias (Figura 9 (d)).

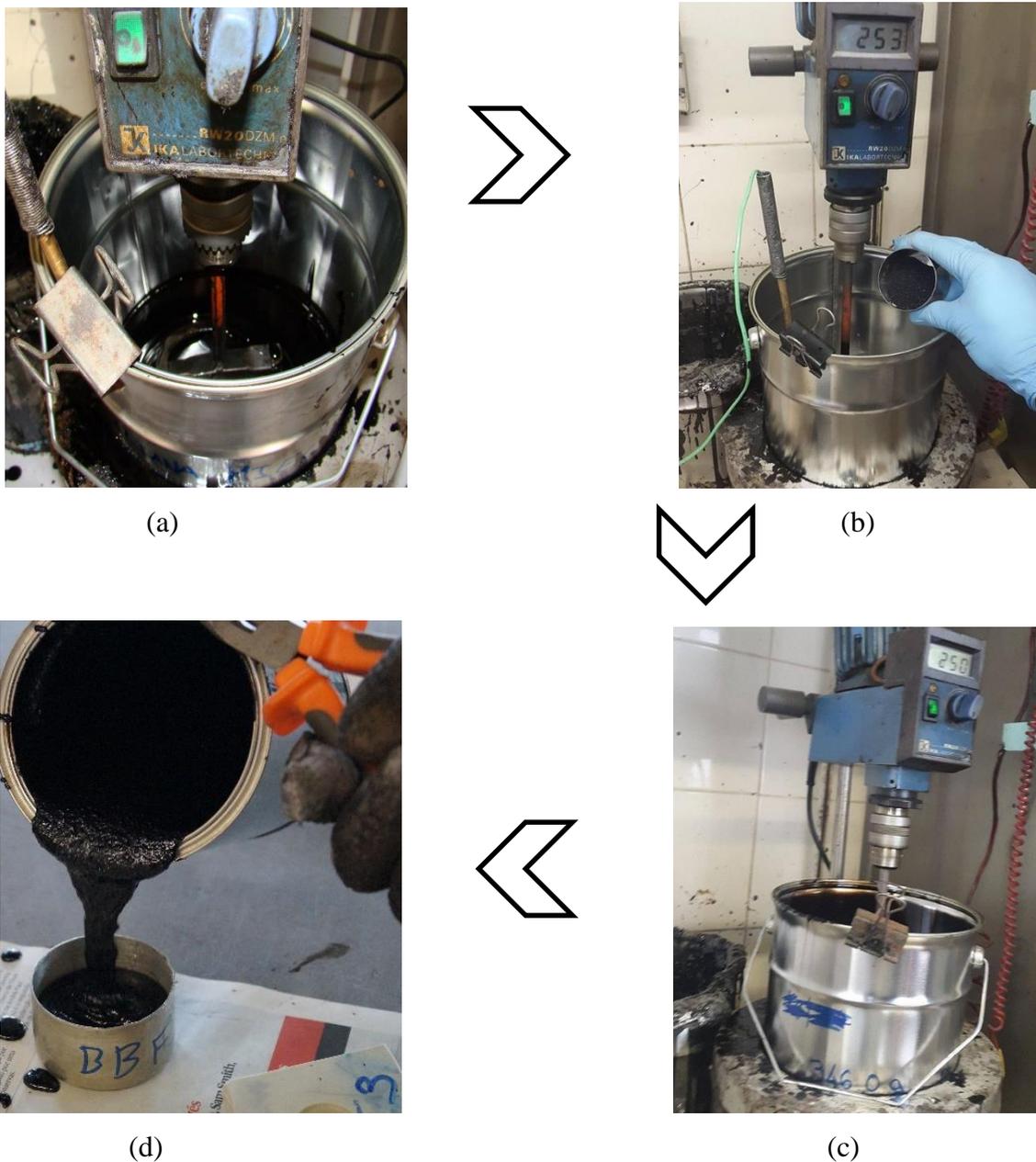


Figura 9 - Processo de produção do betume-borracha

De referir que as percentagens adotadas e os tempos utilizados, bem como as rotações tem por base metodologias adotadas em estudo similares e foram impostas à partida dessa forma por entender serem as mais corretas para o processo de produção adoptado. O mesmo acontece nas fases seguintes.

Na segunda fase do trabalho foram produzidos 6 novos mástiques, como apresentado na Tabela 4, utilizando-se as seguintes siglas em adição às já referidas para o betume-borracha:

- AF: Mástique (Asphalt + Filler)
- LF: Pó calcário (Limestone Filler)
- CF: Cimento (Portland Cement Filler)
- HF: Cal hidráulica (Hydraulic Lime Filler)

Tabela 4 - Mástiques produzidos na 2ª fase: betume + filer

<i>Betume + Filer</i> (<i>nomenclatura</i>)	<i>Betume</i> (<i>tipo</i>)	<i>Filer</i> (<i>tipo</i>)
<i>AF-35-LF</i>	B35/50	Pó calcário
<i>AF-50-LF</i>	B50/70	Pó calcário
<i>AF-35-CF</i>	B35/50	Cimento
<i>AF-50-CF</i>	B50/70	Cimento
<i>AF-35-HF</i>	B35/50	Cal hidráulica
<i>AF-50-HF</i>	B50/70	Cal hidráulica

Os mástiques resultantes da mistura de betume e filer foram produzidos para uma relação filer/betume igual a 1.

O betume foi aquecido a 160°C e homogeneizado com recurso a uma misturadora (Figura 10 (a)) que serviu também para misturar o betume com o filer (Figura 10 (b)). O tempo de mistura foi de 1 minuto e à velocidade de 300 rotações/minuto (Figura 10 (c)).

Depois de produzidos os mástiques foram colhidas amostras (Figura 10 (d)) para os ensaios de penetração, resiliência, anel e bola, viscosidade e reologia.

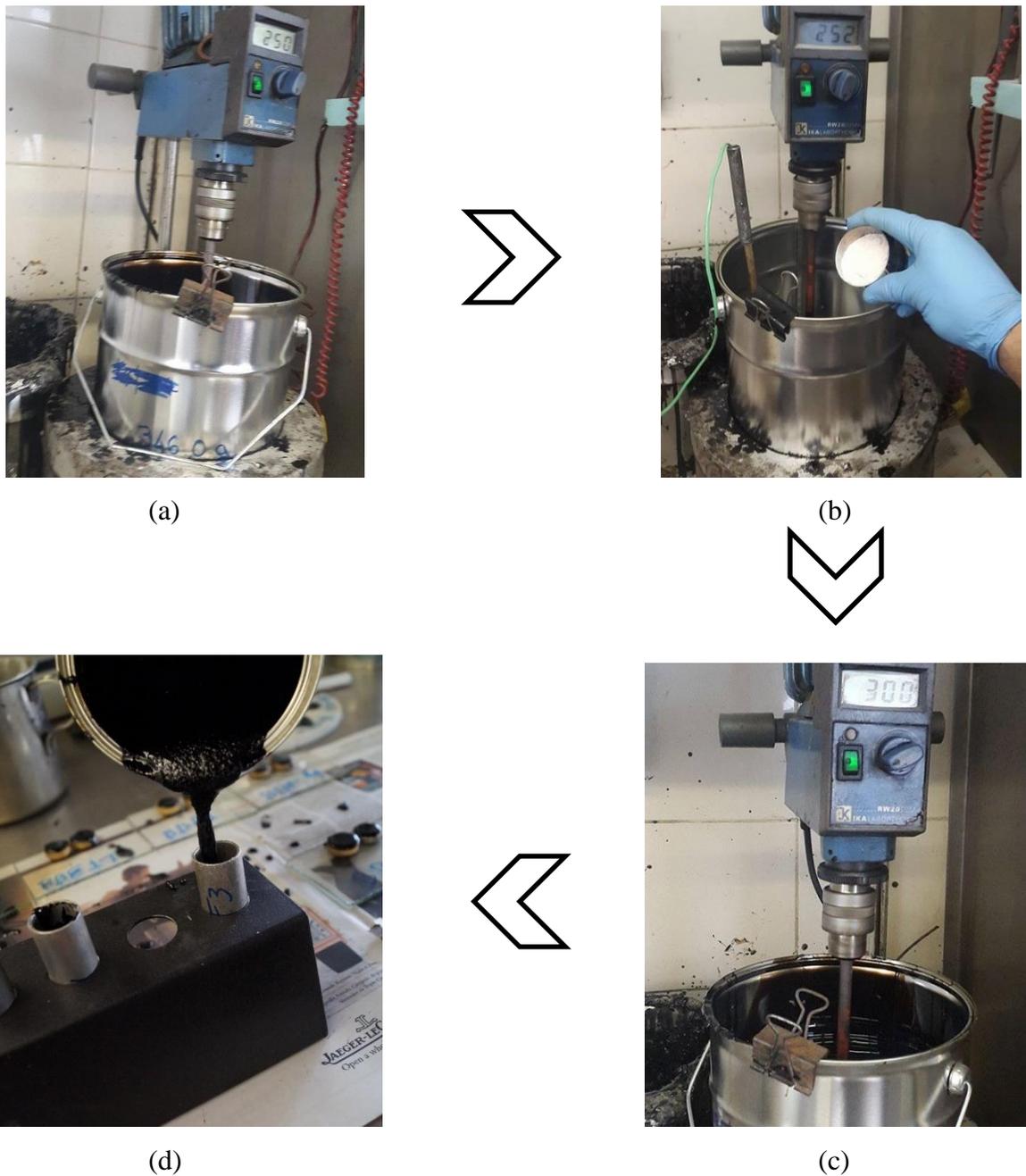


Figura 10 - Produção dos mástiques com betume + filler

Na terceira fase foram produzidos mais 4 mástiques, como apresentado na Tabela 5, utilizando-se as seguintes siglas em adição às já referidas para o betume-borracha:

- ARF: Mástique (Asphalt-Rubber + Filler)

Em termos de filer, por uma questão de tempo de produção e por não ser notória a mais valia de outro tipo, nesta fase apenas foi utilizado o filer de pó calcário, devendo o estudo com os outros filer ser objeto de futuro trabalho.

Tabela 5 - Mástiques produzidos na 3ª fase: betume-borracha + filer

<i>Betume-borracha +</i>			
<i>Filer</i> <i>(nomenclatura)</i>	<i>Betume (tipo)</i>	<i>Borracha (tipo)</i>	<i>Filer (tipo)</i>
<i>ARF-35-CR-LF</i>	B35/50	Criogénica	Pó calcário
<i>ARF-35-AR-LF</i>	B35/50	Ambiente	Pó calcário
<i>ARF-50-CR-LF</i>	B50/70	Criogénica	Pó calcário
<i>ARF-50-AR-LF</i>	B50/70	Ambiente	Pó calcário

O betume-borracha para estes mástiques foi produzido como indicado na 1ª fase, ou seja, com uma percentagem de borracha de 19%, à temperatura de 180°C e para um tempo de digestão de 30 minutos a 250 rotações/minuto. A relação filer/betume-borracha utilizada para a produção dos mástiques desta 3ª fase foi de 1, tal como já tinha acontecido para os mástiques da 2ª fase, sendo o tempo de mistura de 1 minuto, representativo do processo de produção das misturas betuminosas em central. Na

Figura 11 apresenta-se o processo de produção realizado.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 11 - Produção dos mástiques com betume-borracha + filer

3.3.2 Ensaio realizados

A avaliação do comportamento dos mástiques foi realizado recorrendo a ensaios baseados no comportamento utilizados para caracterizar o betume asfáltico, nomeadamente:

- Penetração com agulha;
- Temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola;
- Resiliência;
- Viscosidade.

Além destes ensaios, os mástiques foram caracterizados em termos reológicos através de ensaio de corte.

O ensaio de penetração com agulha permite avaliar indiretamente a rigidez e a viscosidade do mástique. Para a realização do ensaio foi seguida a Norma EN 1426.

Os resultados obtidos representam a profundidade (em décimos de milímetro) que uma agulha sob a ação de um certo peso (100gf) penetra uma amostra de betume durante 5 segundos a 25°C. Em cada ensaio são realizadas três medições e o valor final é dado pela média desses valores arredondado à unidade. O ensaio foi realizado com recurso ao penetrómetro apresentado na Figura 12.



Figura 12 - Ensaio de penetração com agulha

Com o ensaio de anel e bola determina-se a temperatura de amolecimento do mástique e uma indicação da deformabilidade do mástique a alta temperatura. Com estas informações, consegue avaliar-se a consistência do ligante a uma determinada temperatura e assim identificar o intervalo de temperaturas em que se consegue fabricar e aplicar em obra o mástique sem este entrar em regime plástico.

O ensaio consiste na colocação de uma esfera de aço com um peso normalizado sobre as amostras de mástique colhidas previamente para uns anéis próprios. Estes são colocados em água que vai sendo aquecida em 5°C/minuto (Figura 13 (a)), fazendo amolecer a mostra até que a esfera e o mástique tocam na base do suporte (Figura 13 (b)).

Nesse momento é registada a temperatura a que se encontra a água. Para a realização do ensaio é necessário a preparação de dois provetes e o resultado do ensaio é dado pela média dos dois resultados. Todo este procedimento é estabelecido pela Norma EN 1427.



(a)



(b)

Figura 13 - Ensaio de anel e bola: (a) Equipamento; (b) Amostras no final do ensaio

Quanto ao ensaio de resiliência, este permite avaliar a capacidade de recuperação do mástique após a deformação devida à aplicação de uma carga. A norma que estabelece esse procedimento experimental é a EN 13880-3.

Este ensaio consiste na aplicação de uma deformação a um provete de mástique durante um intervalo de tempo, avaliando-se a recuperação elástica após remoção da deformação. Este ensaio permite, de uma forma indireta, conhecer a capacidade de recuperação às deformações permanentes. O equipamento utilizado encontra-se representado na Figura 14.

O ensaio da viscosidade avalia a viscosidade, ou seja, a resistência ao corte do mástique, tendo-se utilizado um viscosímetro rotacional *Brookfield*, patente na Figura 15, que se baseia em rodar um *spindle* dentro de uma amostra de mástique, medindo-se a força exercida entre a parede deste e o mástique.

As temperaturas analisadas com este ensaio foram os 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170 e 180°C.



Figura 14 - Ensaio de resiliência



Figura 15 - Ensaio de viscosidade através do viscosímetro rotacional *Brookfield*

Quanto ao ensaio de reologia, este permite avaliar o comportamento do mástique quando sujeito a ações mecânicas como material isolado e prever o seu desempenho na aplicação de misturas betuminosas. Com isto é possível caracterizar o comportamento viscoelástico do mástique e assim conhecer o módulo complexo e ângulo de fase.

O ensaio foi realizado num reómetro dinâmico de corte (DSR ou *dynamic shear rheometer*) como mostra a Figura 16 e de acordo com a norma EN 14770 tendo-se utilizado duas gamas de temperaturas: as baixas (19, 25, 37 e 40°C) e as altas (46, 52, 58, 64, 70, 76, 82 e 88°C).

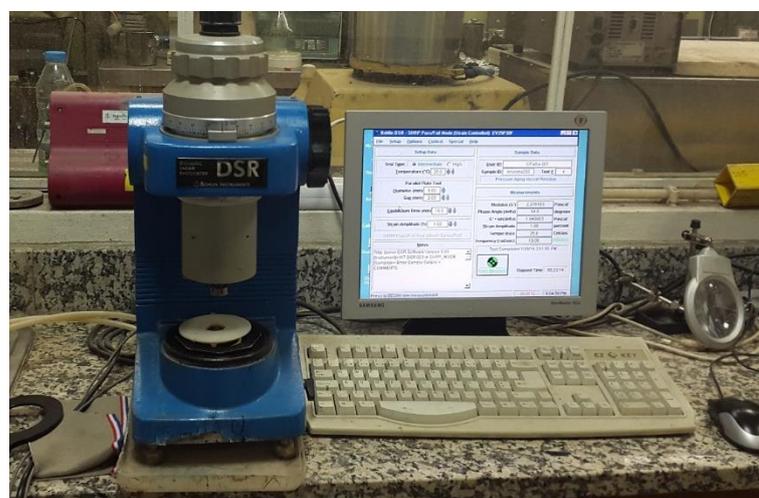


Figura 16 - Ensaio de reologia

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos durante o processo experimental. A apresentação dos resultados está dividida em 3 partes, correspondentes às 3 fases enunciadas anteriormente:

- Betume-borracha;
- Betume + filer;
- Betume-borracha + filer.

A apresentação dos resultados é complementada com uma análise dos 5 ensaios realizados, nomeadamente: penetração com agulha, temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola, resiliência, viscosidade e reologia.

De modo a permitir uma comparação dos mástiques obtidos com betume + filer, são apresentados também os resultados para os mesmos ensaios dos betume convencionais.

4.1 Betume-borracha

Os resultados dos ensaios de penetração com agulha são apresentados na Tabela 6, onde se indica os valores de cada uma das 3 medições realizadas e a média desses valores.

Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de penetração

<i>Betume-Borracha</i>	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>	<i>Média</i>
<i>AR-35-CR</i>	20	19	20	20
<i>AR-50-CR</i>	27	26	27	27
<i>AR-35-AR</i>	16	17	17	17
<i>AR-50-AR</i>	26	26	26	26
<i>C35/50</i>	36	36	36	36
<i>C50/70</i>	54	53	53	53

Na Figura 17 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio de penetração para os betumes-borracha e na Tabela 7 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

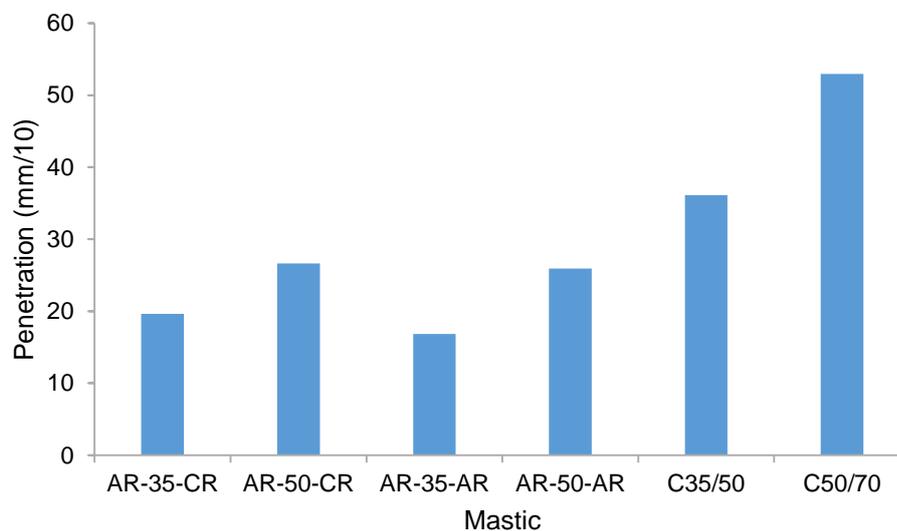


Figura 17 - Penetração dos betumes-borracha

Tabela 7 - Variação dos resultados do ensaio de penetração em relação ao betume de origem

<i>Betume-Borracha</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>AR-35-CR</i>	- 45.7
<i>AR-50-CR</i>	- 49.7
<i>AR-35-AR</i>	- 53.4
<i>AR-50-AR</i>	- 51.0

Analisando os resultados obtidos verifica-se que as variações ocorridas no betume-borracha se revelou maior na borracha ambiental do que na criogénica. Tal comportamento já era espectável tendo em conta que o processo de produção da borracha criogénica potencia a conservação das propriedades da mesma.

Uma outra análise que se pode realizar é o facto de quanto mais mole for o betume de origem, maior é a variação do resultado obtido. Tais valores eram também expectáveis, tendo em conta que um betume mais mole é mais suscetível a essas alterações a quando da incorporação de outros materiais.

Importa referir que a variação apresentada em percentagem é um valor negativo, ou seja, como é visível no gráfico de barras, a penetração nos betumes modificados foi menor.

Os resultados dos ensaios de anel e bola são apresentados na Tabela 8, onde se indica os valores de cada uma das 2 medições realizadas e a média desses valores.

Tabela 8 - Resultados obtidos no ensaio de anel e bola

<i>Betume-Borracha</i>	<i>1ª Bola</i>	<i>2ª Bola</i>	<i>Média</i>
<i>AR-35-CR</i>	73	73	73
<i>AR-50-CR</i>	68	68	68
<i>AR-35-AR</i>	80	81	80
<i>AR-50-AR</i>	72	73	72
<i>C35/50</i>	55	55	55
<i>C50/70</i>	51	51	51

Na Figura 18 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio e na Tabela 9 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

Analisando os resultados obtidos no ensaio de anel e bola verifica-se que neste caso a variação entre os betumes modificados e os de origem é menor.

À semelhança do ensaio de penetração, a variação é menor nos betumes onde se incorporou borracha criogénica do que nos que incorporou borracha ambiental. Neste ensaio, essa diferença é ainda mais visível e atesta a coerência dos resultados expectáveis com a incorporação de borracha no betume.

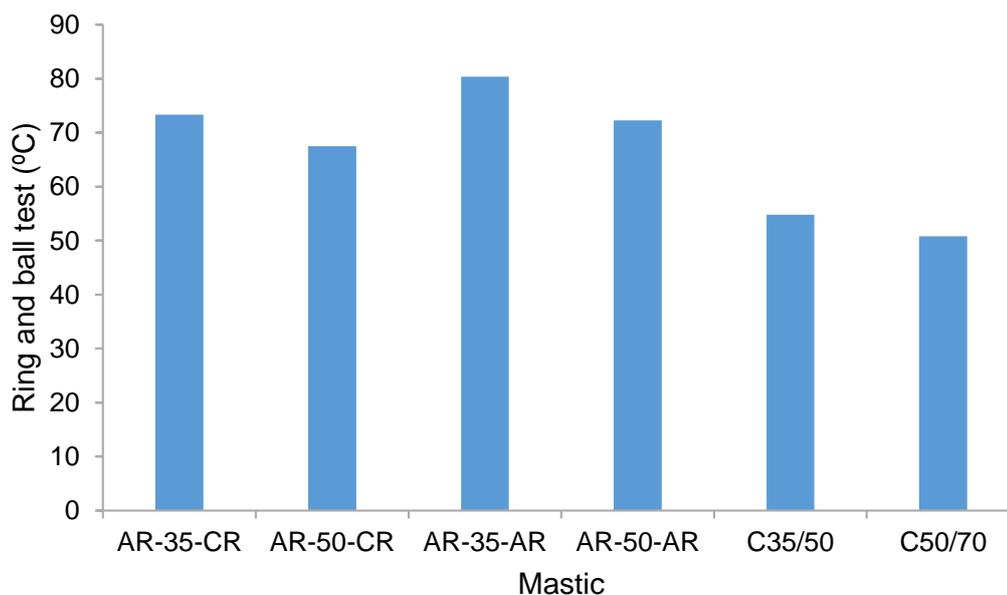


Figura 18 - Temperatura de amolecimento dos betumes-borracha

Tabela 9 - Variação dos resultados do ensaio de anel e bola em relação ao betume de origem

<i>Betume-Borracha</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>AR-35-CR</i>	+ 33.9
<i>AR-50-CR</i>	+ 32.9
<i>AR-35-AR</i>	+ 46.7
<i>AR-50-AR</i>	+ 42.3

Neste ensaio a diferença entre betumes, aquando da utilização do mesmo tipo de borracha, é mais reduzida e isso deve-se ao comportamento do betume aquando de um aumento de temperatura.

Sobre os resultados dos ensaios de resiliência, estes são apresentados na Tabela 10, onde se indica os valores das medições realizadas e o seu valor em percentagem.

Tabela 10 - Resultados obtidos no ensaio de resiliência nos betumes-borracha

<i>Betume-Borracha</i>	<i>P (0.1 mm)</i>	<i>F (0.1 mm)</i>	<i>Resiliência (%)</i>
<i>AR-35-CR</i>	1	48	53
<i>AR-50-CR</i>	1	67	34
<i>AR-35-AR</i>	0	40	60
<i>AR-50-AR</i>	1	47	54
<i>C35/50</i>	5	95	10
<i>C50/70</i>	7	101	6

Na Figura 19 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio e na Tabela 11 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

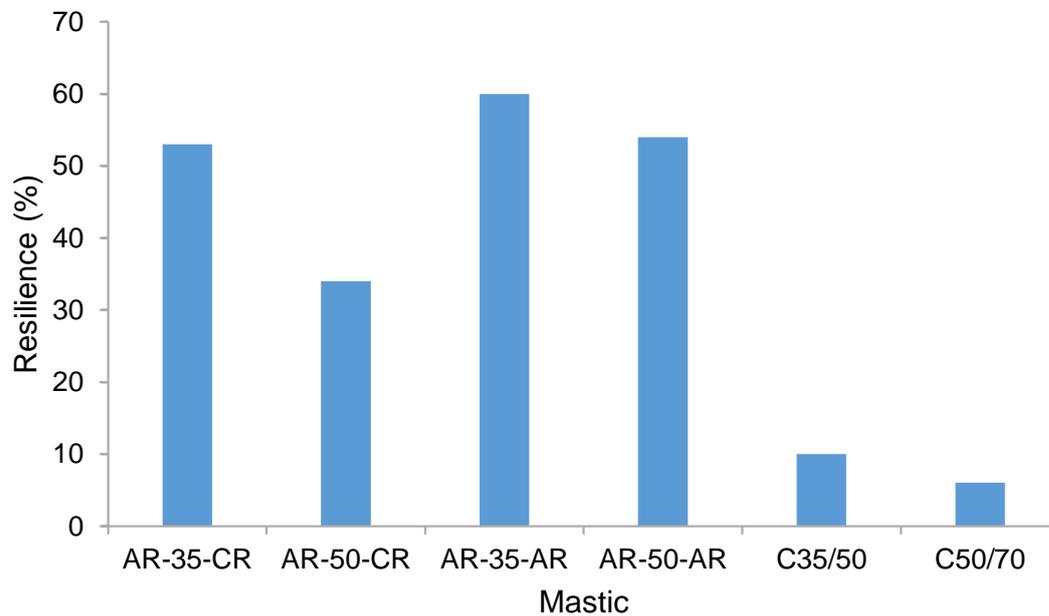


Figura 19 - Resiliência dos betumes-borracha

Tabela 11 - Variação dos resultados do ensaio de resiliência em relação ao betume de origem

<i>Betume-Borracha</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>AR-35-CR</i>	+ 430
<i>AR-50-CR</i>	+ 467
<i>AR-35-AR</i>	+ 500
<i>AR-50-AR</i>	+ 800

O ensaio de resiliência, como já foi referido anteriormente, permite a analisar a capacidade do betume recuperar de uma deformação imposta.

Os resultados mostram um grande aumento da capacidade resiliente dos ligantes a quando da incorporação da borracha, particularmente com a borracha ambiental. É exatamente a borracha que confere ao betume esta aptidão pois a borracha é um material elástico e tem por competência intrínseca a capacidade de voltar ao seu estado inicial depois de aplicada uma força.

Mais se nota que ao contrário do que aconteceu nos ensaios anteriores, desta vez é a borracha ambiental que apresenta melhores resultados, para ambos os betumes.

Como também era previsível, a capacidade resiliente faz-se denotar ainda mais no betume mais mole.

Os resultados do ensaio de viscosidade são apresentados na Tabela 12, onde se indica a viscosidade dos mástiques para a gama de temperaturas analisada.

Na Figura 20 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio de viscosidade, comparativamente aos ligantes de origem.

Tabela 12 - Resultados obtidos no ensaio de viscosidade para os betumes-borracha

<i>Viscosidade (cP)</i>						
<i>Temp. (°C)</i>	<i>C35/52</i>	<i>C50/72</i>	<i>AR-35-CR</i>	<i>AR-50-CR</i>	<i>AR-35-AR</i>	<i>AR-50-AR</i>
<i>100</i>	6850	4196	211857	96679	215479	85881
<i>110</i>	3194	2052	103000	48179	108547	47405
<i>120</i>	1655	1085	31271	17236	54357	16264
<i>130</i>	918	618	16757	9300	30286	10114
<i>140</i>	541	377	9529	4711	7507	3404
<i>150</i>	334	240	4863	2700	4360	1897
<i>160</i>	219	163	2962	1673	2983	954
<i>170</i>	150	113	1783	1084	1791	892
<i>180</i>	108	80	1211	754	1399	901

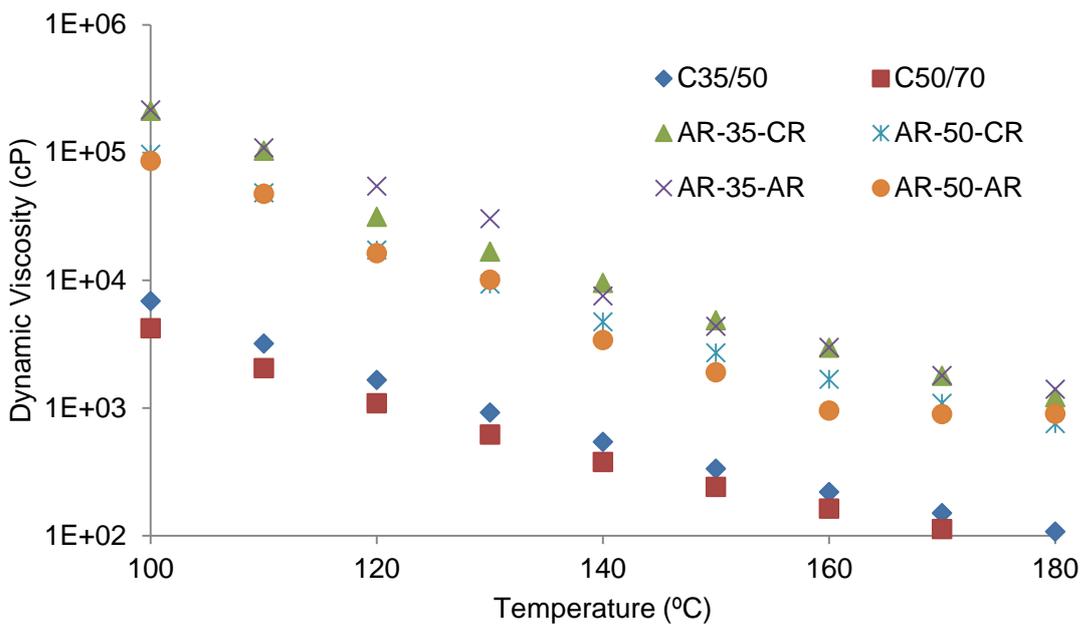


Figura 20 - Viscosidade dos betumes-borracha

Como se pode verificar, o comportamento de todos os ligantes é bastante similar à medida que se varia a temperatura, denotando-se que todos os betumes sofreram um aumento considerável da viscosidade em relação aos betumes base. Este aumento tem a vantagem de permitir

incorporar mais ligante nas misturas betuminosas e deste modo aumentar a sua resistência à fadiga. Em contrapartida, o aumento da viscosidade acarreta problemas de produção das misturas betuminosas.

Nos betumes-borracha produzidos identificou-se como temperatura de referência os 180°C (temperatura de produção de misturas betuminosas). Verifica-se que os valores obtidos para a viscosidade são muito próximos, principalmente para o mesmo tipo de borracha e não tão dependentes do tipo de betume. Isso mostra a forte influência da borracha na viscosidade do ligante.

É também identificável que o betume com melhor resultado na viscosidade a 180°C é o betume B50/70 com borracha criogénica e esse, em conjunto com a mesma borracha mas com betume B35/50, são os que apresentam menor viscosidade. Isto permite que sejam os mais próximos dos betumes originais e usualmente utilizados nas misturas betuminosas.

Os ensaios dinâmicos de corte permitiram obter o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ). No entanto, a combinação destas duas variáveis permite obter a componente elástica e a dissipativa do módulo de corte bom com a componente $G^*/\sin(\delta)$ que está relacionada com a deformação permanente das misturas betuminosas.

Os resultados do módulo complexo dos betume-borracha são apresentados na Figura 21, onde se verifica que existe um aumento considerável do módulo de rigidez para altas temperaturas dos mástiques, zona onde esse mesmo módulo é mais baixo no ligante de origem. Já nas temperaturas mais baixas verifica-se o contrário, com exceção do betume-borracha AR-35-AR que apresenta um módulo mais elevado que o betume de origem em quase todas as temperaturas.

Em conclusão, pode afirmar-se que a incorporação da borracha levou a um aumento do módulo dinâmico de corte do betume-borracha, o que se reflete num aumento da capacidade resistente à deformação permanente das misturas betuminosas.

No caso do ângulo de fase (Figura 22), este traduz o desfasamento entre a aplicação de uma deformação à amostra e a resposta da mesma.

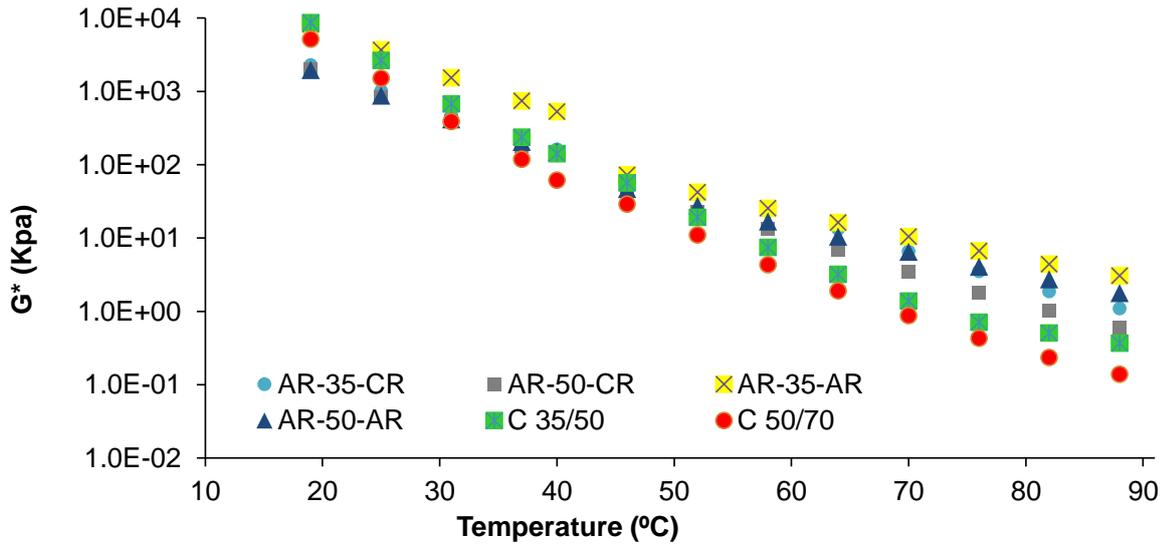


Figura 21 - Módulo complexo dos betume-borracha

Nos betumes-borracha em estudo verifica-se um decréscimo do ângulo de fase de todos os mástiques em relação aos ligantes de base. O ligante que apresentou uma menor variação, em relação ao betume de origem, ao longo de toda a gama de temperatura analisada foi o AR-50-CR.

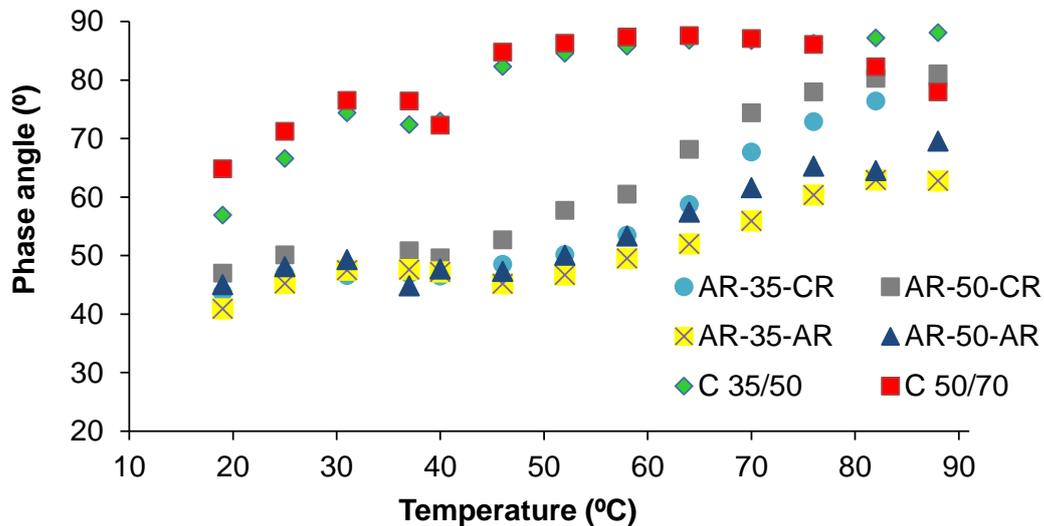


Figura 22 - Ângulo de fase dos betume-borracha

O parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ para os betume-borracha analisados é apresentado na Figura 23, sendo possível verificar que nas temperaturas altas (a partir dos 50°C) o valor da deformação permanente dos mástiques é superior ao do ligante que lhes deu origem. No que toca às temperaturas mais baixas esta tendência já se altera, havendo mesmo mástiques com valores inferiores aos dos ligantes de origem como se pode ver aos 19°C e 25°C.

Mais uma vez se verifica que o mástique que apresenta uma menor variação em relação aos ligantes de origem é o AR-50-CR.

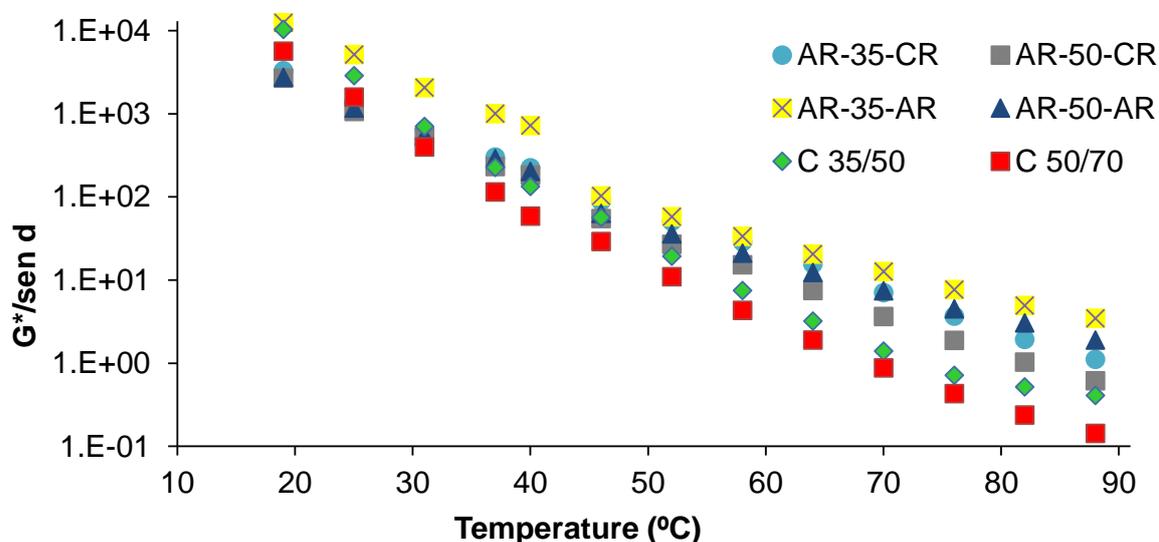


Figura 23 - Parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ dos betumes-borracha

Quanto ao módulo dissipativo apresentado na Figura 24, este permite avaliar a componente viscosa dos mástiques.

Analisando os resultados verifica-se uma certa semelhança com o que acontece com o parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ em que os valores dos mástiques são mais elevados que os dos ligantes nas temperaturas altas e o inverso nas temperaturas mais baixas em análise.

Novamente, o mástique que apresenta uma maior semelhança ao longo de toda a gama de temperaturas com o ligante de origem é o AR-50-CR.

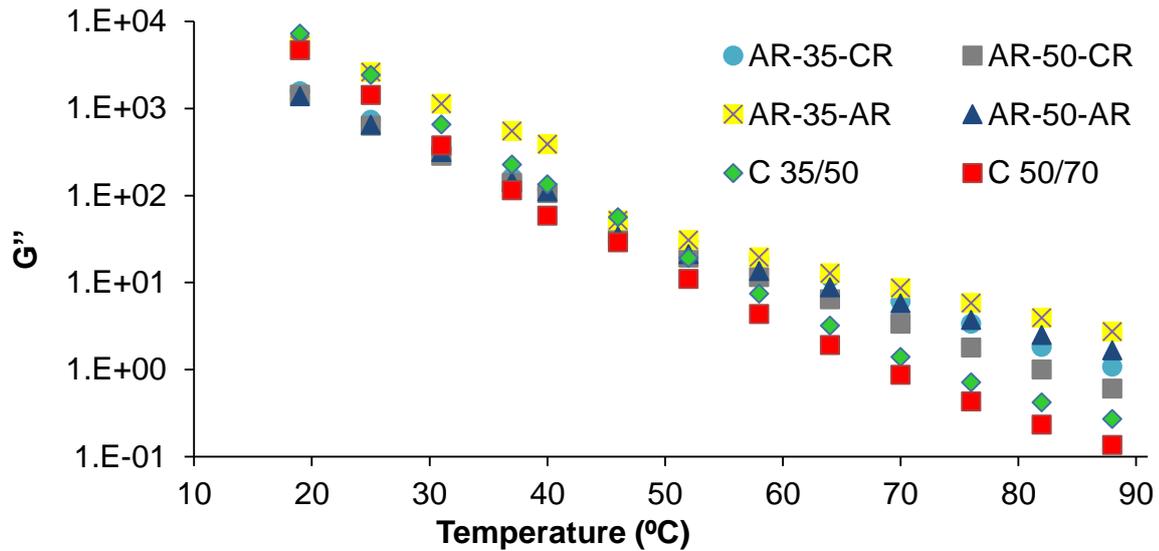


Figura 24 - Módulo dissipativo dos betumes-borracha

A componente elástica do módulo de corte (G') dos betumes-borracha é apresentada na Figura 25, verificando-se que os mástiques produzidos apresentam um módulo de superior aos betumes de origem em quase toda a gama de temperaturas analisadas. Como em todas as componentes analisadas com o ensaio de reologia, o ligante AR-50-CR é o que apresenta um desempenho mais próximo dos ligantes originais.

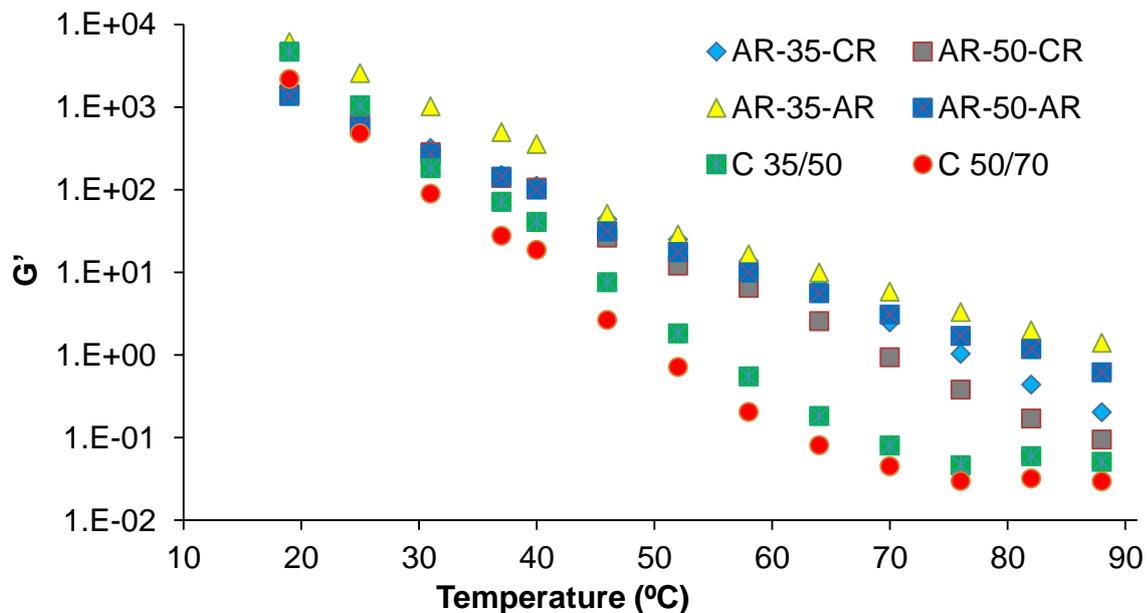


Figura 25 - Componente elástica do módulo de corte dos betumes-borracha

4.2 Betume + filer

Os resultados do ensaio de penetração com agulha para os mástiques com betume + filer são apresentados na Tabela 14, onde se indica os valores de cada uma das 3 medições realizadas e a média desses valores.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de penetração do betume + filer

<i>Betume + Filer</i>	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>	<i>Média</i>
<i>AF-35-LF</i>	21	22	21	21
<i>AF-50-LF</i>	28	28	28	28
<i>AF-35-CF</i>	23	23	23	23
<i>AF-50-CF</i>	34	35	34	35
<i>AF-35-HF</i>	14	15	15	15
<i>AF-50-HF</i>	21	22	20	21
<i>C35/50</i>	36	36	36	36
<i>C50/70</i>	54	53	53	53

Na Figura 26 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio de penetração para os betume + filer e na Tabela 14 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

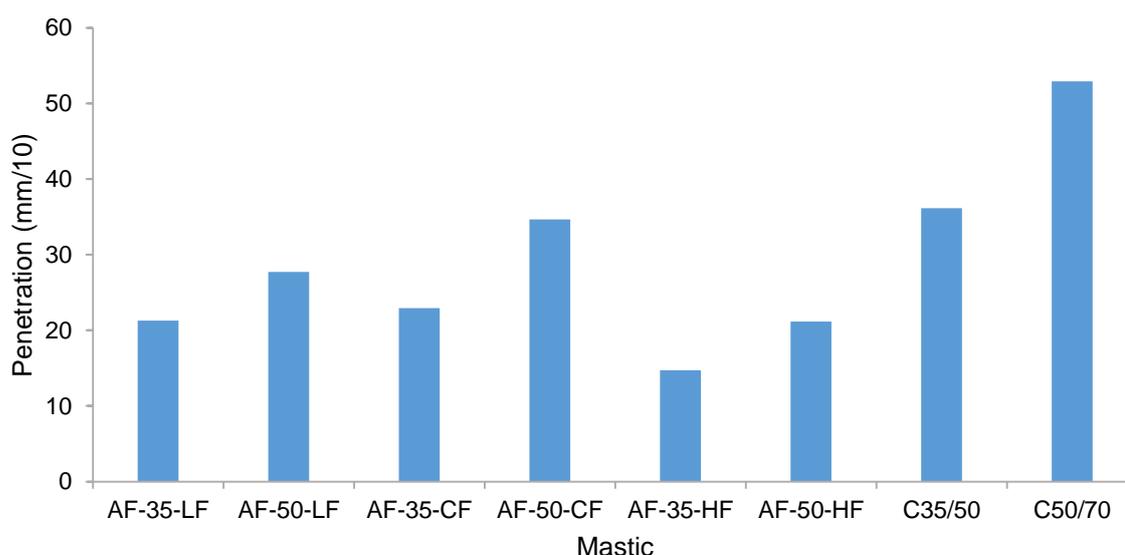


Figura 26 - Penetração do betume + filer

Tabela 14 - Variação da penetração do betume + filer em relação ao betume de origem

<i>Betume + Filer</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>AF-35-LF</i>	- 41.1
<i>AF-50-LF</i>	- 47.6
<i>AF-35-CF</i>	- 36.5
<i>AF-50-CF</i>	- 34.5
<i>AF-35-HF</i>	- 59.2
<i>AF-50-HF</i>	- 60.0

Os resultados obtidos permitem concluir que as variações ocorridas no ligante com a incorporação de filer se revelaram maiores na cal hidráulica e menos significativas no cimento, tendo o pó calcário uma variação intermédia em relação a estes.

Uma outra análise que se pode realizar é o facto de quanto mais mole for o betume de origem, maior é a variação do resultado obtido em quase todos os casos, como aconteceu com a adição de borracha. Tais valores eram também expectáveis, tendo em conta que um betume mais mole é mais suscetível a essas alterações aquando da incorporação de outros materiais.

Quanto aos resultados dos ensaios de anel e bola, estes são apresentados na Tabela 15, onde se indica os valores de cada uma das 2 medições realizadas e a média desses valores.

Tabela 15 - Temperatura de amolecimento dos betumes + filer

<i>Betume + Filer</i>	<i>1ª Bola</i>	<i>2ª Bola</i>	<i>Média</i>
<i>AF-35-LF</i>	73	73	73
<i>AF-50-LF</i>	68	68	68
<i>AF-35-CF</i>	80	81	80
<i>AF-50-CF</i>	72	73	72
<i>AF-35-HF</i>	55	55	55
<i>AF-50-HF</i>	51	51	51

Na Figura 27 encontram-se representados os valores da temperatura de amolecimento para os betumes + filer e na Tabela 16 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

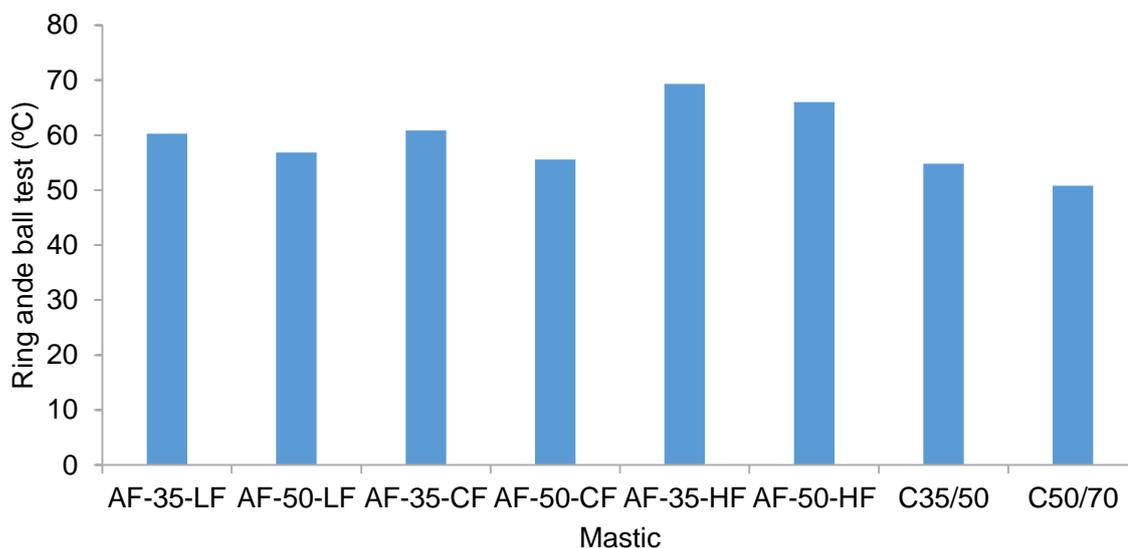


Figura 27 - Temperatura de amolecimento dos betumes + filer

Tabela 16 - Variação da temperatura de amolecimento em relação ao betume de origem

<i>Betume + Filer</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>AF-35-LF</i>	+ 9.95
<i>AF-50-LF</i>	+ 11.91
<i>AF-35-CF</i>	+ 11.04
<i>AF-50-CF</i>	+ 9.35
<i>AF-35-HF</i>	+ 26.55
<i>AF-50-HF</i>	+ 29.92

Analisando os resultados obtidos no ensaio de anel e bola, verifica-se que neste caso a variação entre os mástiques e os de origem é menor que no ensaio de penetração e também consideravelmente menor que nos betumes com borracha.

À semelhança da penetração, a variação é maior nos betumes onde foi adicionada cal hidráulica. No pó calcário e no cimento, a variação é menor (menos de metade) e apresenta resultados próximos aos dos ligantes de origem, o que demonstra que a adição de filer em pouco altera a temperatura de amolecimento do betume.

De referir ainda que neste ensaio a diferença entre betumes, a quando da utilização do mesmo tipo de filer é baixa.

Quanto aos resultados dos ensaios de resiliência, estes são apresentados na Tabela 17, onde se indica os valores das medições realizadas e o seu valor em percentagem.

Tabela 17 - Resiliência nos betumes + filer

<i>Betume + Filer</i>	<i>P (0.1 mm)</i>	<i>F (0.1 mm)</i>	<i>Resiliência (%)</i>
<i>AF-35-LF</i>	0	95	5.0
<i>AF-50-LF</i>	2	98	4.0
<i>AF-35-CF</i>	0	95	5.0
<i>AF-50-CF</i>	3	97	6.0
<i>AF-35-HF</i>	0	95	5.0
<i>AF-50-HF</i>	0	99	1.0

Na Figura 28 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio de resiliência e na Tabela 18 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

O ensaio de resiliência, como já referido anteriormente, permite a analisar a capacidade do betume recuperar o seu estado inicial depois de aplicada uma deformação. Como era de esperar, no caso dos betumes + filer os resultados conseguidos não são tão significativos como nos betumes com borracha.

Em quase todos os mástiques ocorreu um decréscimo da capacidade resiliente, com exceção do AF-50-CF onde o resultado foi o mesmo. É de reconhecer que o facto de o valor ser o mesmo levanta algumas dúvidas mas ao mesmo tempo é um excelente indicador. Importa referir que mais uma vez o pó calcário e o cimento são os tipos de filer que apresentam melhores resultados.

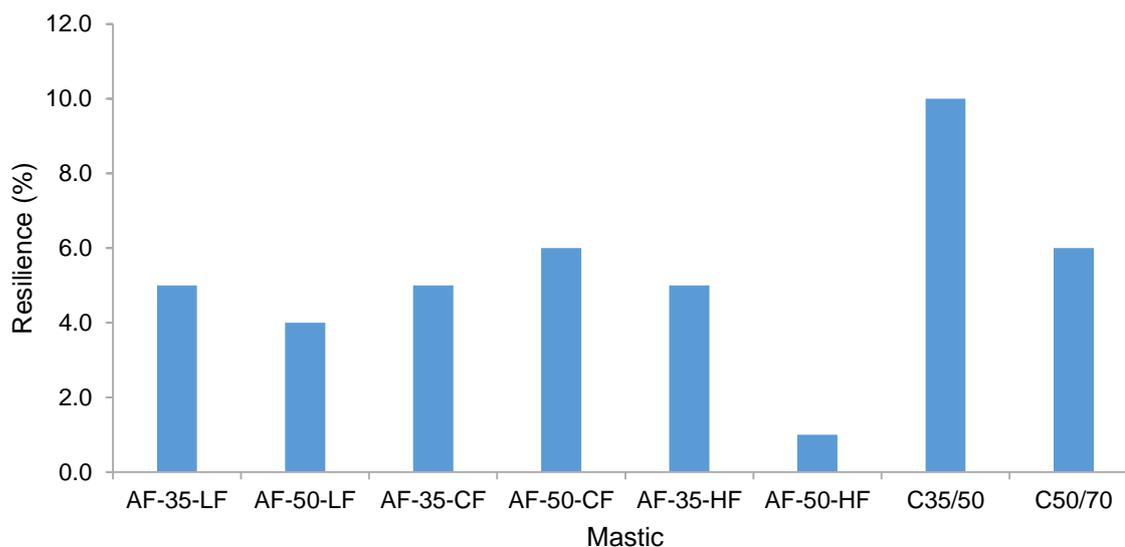


Figura 28 - Resiliência dos betumes + filer

Tabela 18 - Variação da resiliência do betume + filer em relação ao betume de origem

<i>Betume + Filer</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>AF-35-LF</i>	- 50.0
<i>AF-50-LF</i>	- 33.3
<i>AF-35-CF</i>	- 50.0
<i>AF-50-CF</i>	0.0
<i>AF-35-HF</i>	- 50.0
<i>AF-50-HF</i>	- 83.3

Estranhamente, o betume que deveria apresentar piores resultados, o B50/70, por ser um betume mais mole, foi o que apresentou melhores resultados com o pó calcário e com o cimento. Estes resultados devem-se provavelmente ao facto da incorporação do filer provocar um aumento da capacidade resistente interna do ligante, apresentando assim uma reação maior a quando do final da aplicação da carga.

Os resultados do ensaio de viscosidade aos mástiques com betume + filer são apresentados na Tabela 19, onde se indica a viscosidade ao longo da escala de temperaturas analisada.

Tabela 19 - Viscosidade nos betumes + filer

<i>Viscosidade (cP)</i>						
<i>Temp. (°C)</i>	<i>AF-35-LF</i>	<i>AF-50-LF</i>	<i>AF-35-CF</i>	<i>AF-50-CF</i>	<i>AF-35-HF</i>	<i>AF-50-HF</i>
100	24529	6654	24707	5320	129429	35929
110	11275	3284	11304	2576	56929	17414
120	5711	1749	5625	1346	27057	8737
130	3053	982	3000	735	13793	4629
140	1798	579	1690	423	7671	2657
150	1080	358	1017	259	4532	1569
160	680	230	646	166	2846	961
170	455	155	425	108	1786	627
180	303	106	287	76	1188	441

Na Figura 29 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio e comparação com os ligantes de origem, verificando-se que a viscosidade dos mástiques com a incorporação de cal hidráulica é a mais elevada. Os outros mástiques, com pó calcário e cimento, apresentam viscosidades menores, sendo que os produzidos com o betume 35/50 são os que apresentam ainda viscosidade elevada, enquanto os mástiques produzidos com o betume 50/70 apresentam menores viscosidades, com as suas viscosidades a atingir valores bastante próximos dos ligantes de origem.

Importa dar especial atenção ao mástique AF-50-CF, porque a sua viscosidade apresenta valores com uma variação muito baixa em relação ao ligante de origem, com o já foi demonstrado na Tabela 11.

Quanto aos resultados dos ensaios de reologia aos mástiques com betume + filer, o módulo complexo é apresentado na Figura 30 verificando-se que a variação do módulo de rigidez foi baixa ao longo das diferentes temperaturas, ou seja, a incorporação de filer nos ligantes em pouco alterou o seu módulo complexo. Verificou-se também que, com temperaturas mais baixas, o módulo dos mástiques é ligeiramente mais baixo ao módulo dos betumes que lhes dão origem, enquanto que para as temperaturas mais altas o valor do módulo é superior aos dos ligantes de origem. Dos 6 mástiques produzidos aquele que apresentou uma menor variação em relação ao betume de origem foi o AF-50-CF.

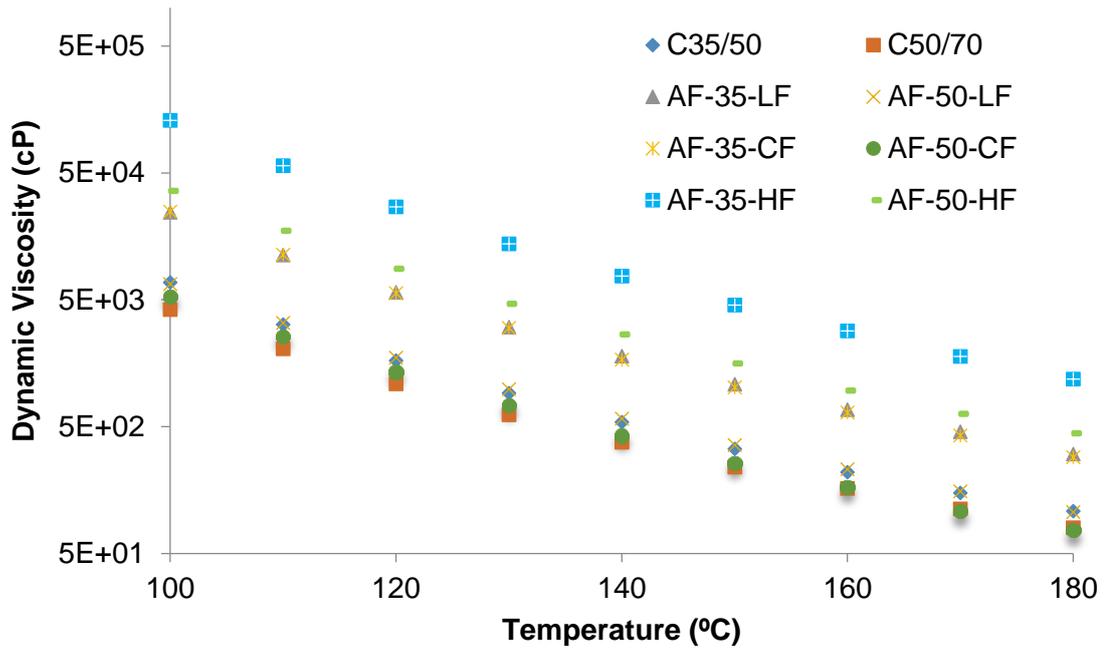


Figura 29 - Viscosidade dos betumes + filler

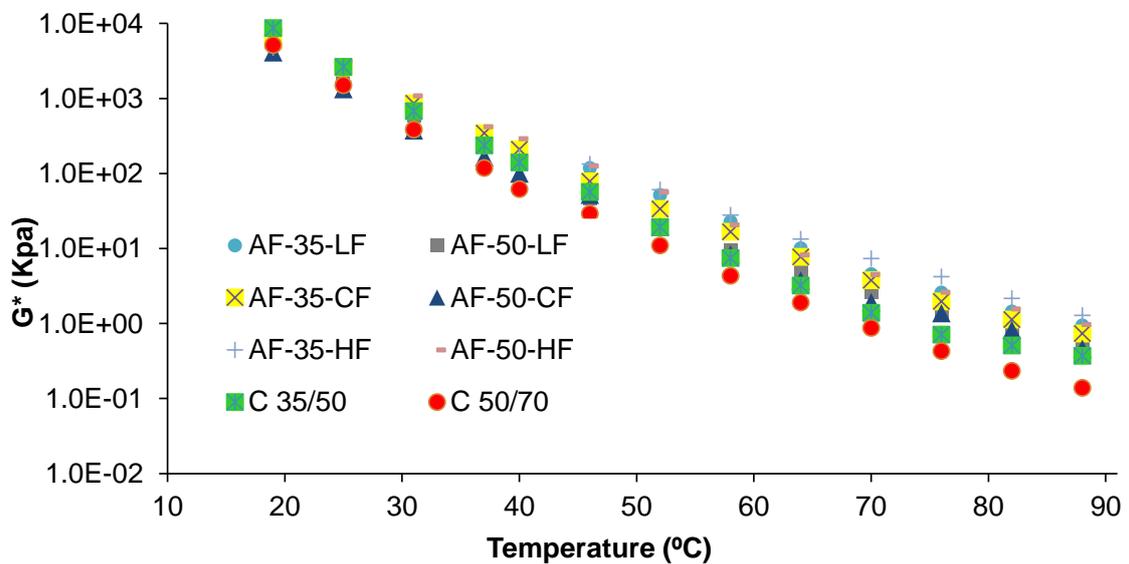


Figura 30 - Módulo complexo dos mástiques betume + filler

No caso do ângulo de fase (Figura 31) verifica-se que o seu valor é bastante similar entre todos os mástiques e muito próximo dos ligantes de origem. De referir que nas temperaturas mais baixas os mástiques apresentam com melhores resultados.

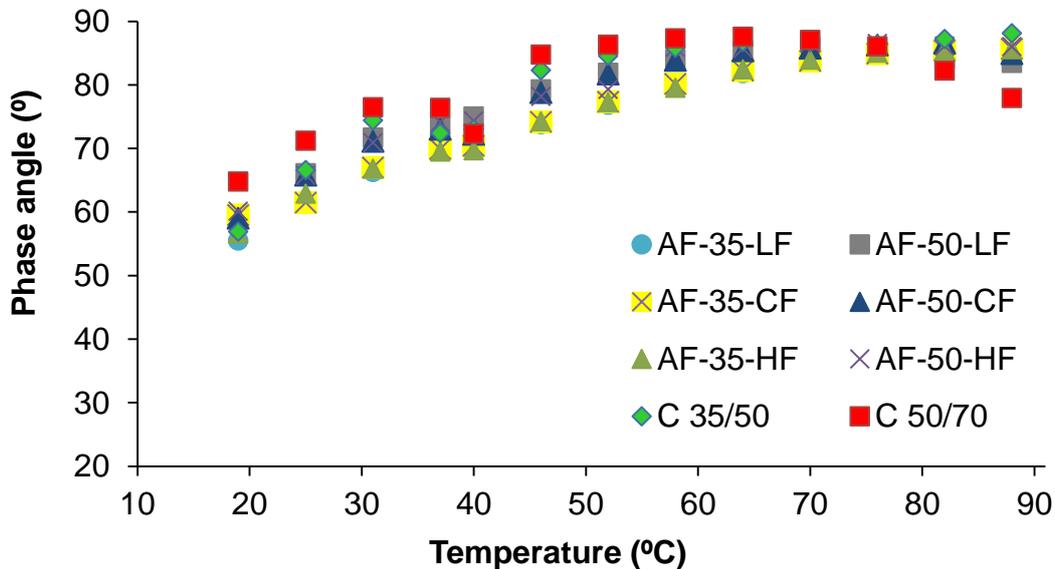


Figura 31 - Ângulo de fase dos mástiques betume + filler

No caso do parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ (Figura 32), o comportamento dos mástiques é similar ao que ocorre aquando da incorporação de borracha. Além disso, a tendência de diminuição é análoga à dos ligantes de origem.

É possível verificar que para as temperaturas mais altas (a partir dos 50°C) o valor do parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ é superior ao do ligante que lhes deu origem. No que toca às temperaturas mais baixas esta tendência já se altera, havendo mesmo mástiques com valores inferiores aos dos ligantes de origem, como se pode verificar aos 19°C e 25°C.

Mais uma vez se verifica que o mástique que apresenta uma menor variação em relação aos ligantes de origem é o AF-50-CF.

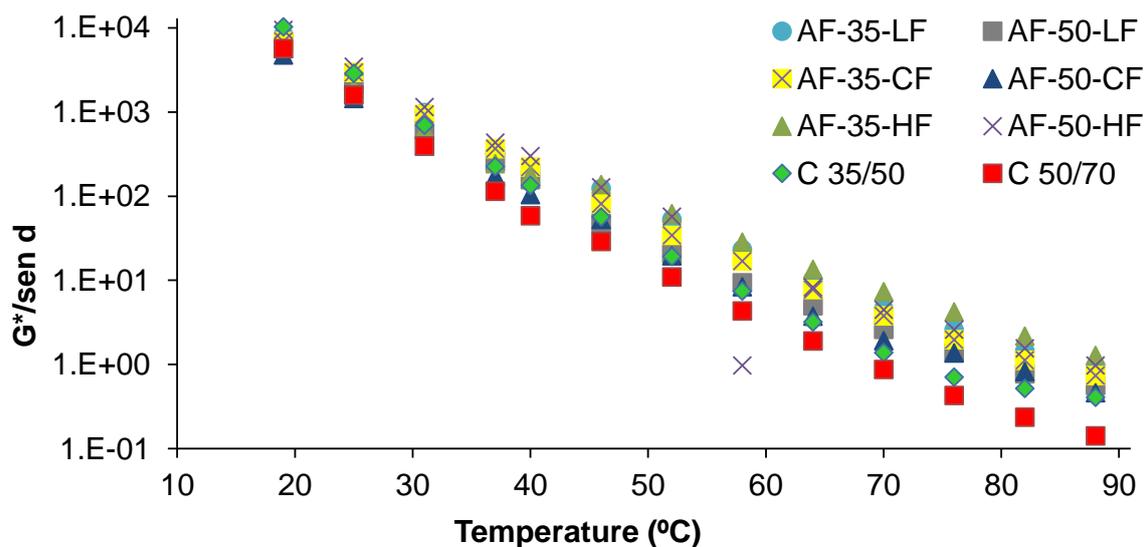


Figura 32 - Parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ dos mástiques betume + filer

Em relação ao módulo dissipativo, os resultados dos mástiques com betume + filer estão expostos na Figura 33, demonstrando uma certa semelhança com o que acontece com o parâmetro $G^*/\sin(\delta)$, em que os valores dos mástiques são mais elevados que os dos ligantes nas temperaturas altas e o inverso nas temperaturas mais baixas.

Novamente, o mástique que apresenta uma maior semelhança ao longo de toda a gama de temperaturas com os ligantes de origem é o AF-50-CF.

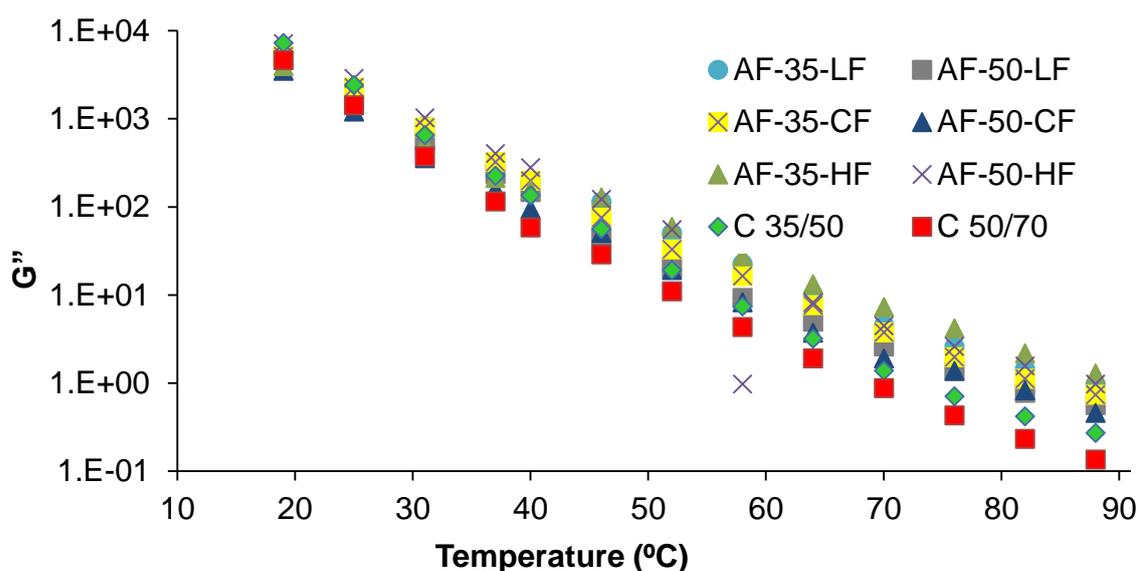


Figura 33 - Módulo dissipativo dos mástiques betume + filer

A Figura 34 apresenta a componente elástica do módulo de corte dos mástiques com betume + filler, verificando-se que estes apresentam um módulo quase sempre superior ao do betume de origem em toda a gama de temperaturas analisadas. O mástique AF-50-CF é o que apresenta um desempenho mais próximo dos ligantes originais.

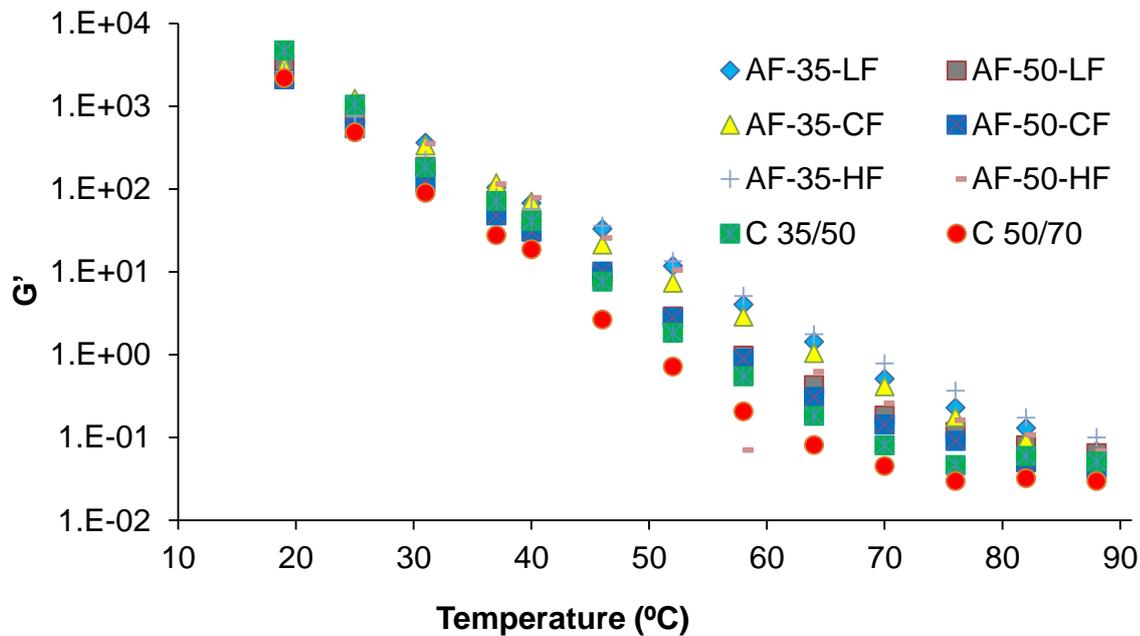


Figura 34 - Componente elástica do módulo de corte dos mástiques betume + filler

4.3 Betume-borracha + filler

Os resultados dos ensaios de penetração com agulha aos mástiques produzidos com betume-borracha + filler são apresentados na Tabela 20, onde se indica os valores de cada uma das 3 medições realizadas e a média desses valores.

Na Figura 35 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio de penetração para os mástiques com betume-borracha + filler e na Tabela 21 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

Tabela 20 - Penetração dos mástiques betume-borracha + filer

<i>Betume-Borracha + Filer</i>	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>	<i>Média</i>
<i>ARF-35-CR-LF</i>	15	13	14	14
<i>ARF-35-AR-LF</i>	14	13	12	13
<i>ARF-50-CR-LF</i>	18	20	19	19
<i>ARF-50-AR-LF</i>	17	17	19	18
<i>C35/50</i>	36	36	36	36
<i>C50/70</i>	54	53	53	53

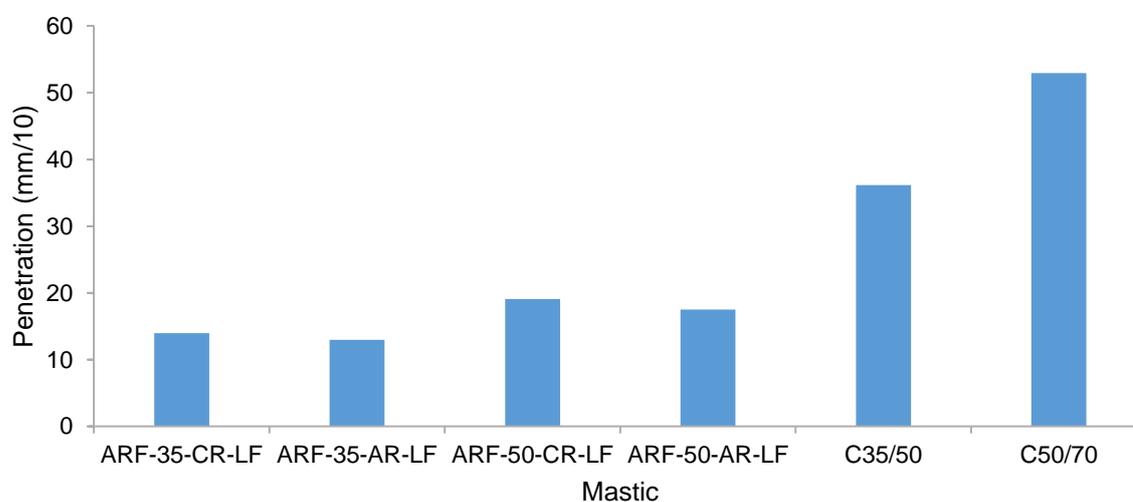


Figura 35 - Penetração dos mástiques betume-borracha + filer

Tabela 21 - Variação Penetração em relação ao betume de origem

<i>Betume + Borracha</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>ARF-35-CR-LF</i>	- 61.3
<i>ARF-35-AR-LF</i>	- 75.5
<i>ARF-50-CR-LF</i>	- 47.2
<i>ARF-50-AR-LF</i>	- 66.9

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que as variações ocorridas nos mástiques com betume-borracha + filer provocaram uma redução da penetração.

Um aspeto coerente nos resultados obtidos foi que, à semelhança dos betumes-borracha, a variação é maior na borracha ambiental que na borracha criogénica. O tipo de betume também influencia os resultados, porque a variação foi maior no betume mais duro.

Quanto aos resultados dos ensaios de anel e bola, estes são apresentados na Tabela 22, onde se indica os valores de cada uma das 2 medições realizadas e a média desses valores.

Tabela 22 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume-borracha+filer

<i>Betume-Borracha + Filer</i>	<i>1ª Bola</i>	<i>2ª Bola</i>	<i>Média</i>
<i>ARF-35-CR-LF</i>	78	77	78
<i>ARF-35-AR-LF</i>	85	84	85
<i>ARF-50-CR-LF</i>	70	70	70
<i>ARF-50-AR-LF</i>	80	81	80
<i>C35/50</i>	55	55	55
<i>C50/70</i>	51	51	51

Na Figura 36 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio de anel e bola e na Tabela 23 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

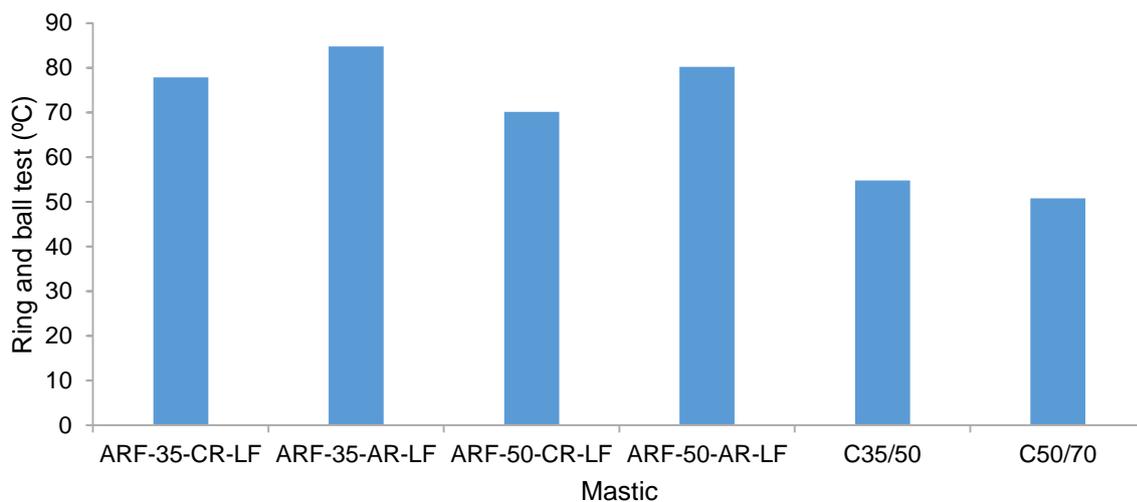


Figura 36 - Temperatura de amolecimento dos betumes-borracha + filer

Tabela 23 - Variação da temperatura de amolecimento dos betumes-borracha + filer em relação ao betume de origem

<i>Betume-Borracha + Filer</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>ARF-35-CR-LF</i>	+ 42,1
<i>ARF-35-AR-LF</i>	+ 54,7
<i>ARF-50-CR-LF</i>	+ 38,0
<i>ARF-50-AR-LF</i>	+ 57,9

Quanto aos resultados obtidos no ensaio de anel e bola, verifica-se que a variação entre os mástiques e os betumes de origem é menor que a verificada no ensaio anterior. Comparando com os betumes-borracha e com os betumes + filer, esta variação é maior.

Olhando para os valores das variações em relação aos ligantes de origem, verifica-se que é o tipo de borracha que mais influencia o aumento da temperatura de amolecimento.

Em relação aos resultados dos ensaios de resiliência, estes são apresentados na Tabela 24, onde se indica os valores das medições realizadas e o seu valor em percentagem.

Tabela 24 - Resiliência dos betumes-borracha + filer

<i>Betume-Borracha + Filer</i>	<i>P (0.1 mm)</i>	<i>F (0.1 mm)</i>	<i>Resiliência (%)</i>
<i>ARF-35-CR-LF</i>	0	49	51.0
<i>ARF-35-AR-LF</i>	0	47	53.0
<i>ARF-50-CR-LF</i>	0	60	40.0
<i>ARF-50-AR-LF</i>	0	65	35.0
<i>C35/50</i>	5	95	10
<i>C50/70</i>	7	101	6

Na Figura 37 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio de resiliência e na Tabela 25 apresenta-se a variação dos resultados obtidos em relação ao ligante de origem.

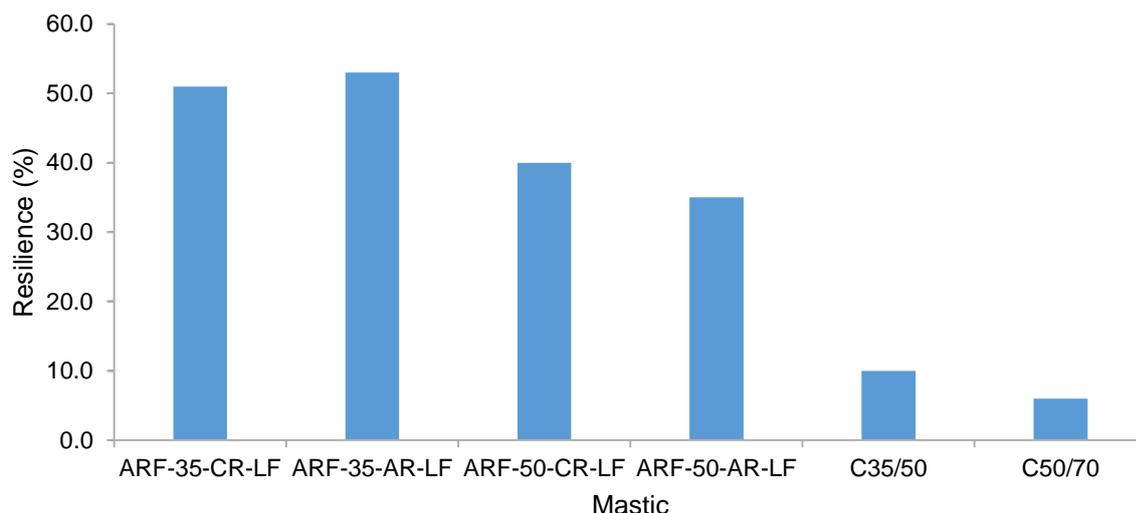


Figura 37 - Resiliência dos betumes-borracha + filer

Tabela 25 - Variação da resiliência dos betumes-borracha + filer em relação ao betume de origem

<i>Betume + Borracha</i>	<i>Variação (%)</i>
<i>ARF-35-CR-LF</i>	+ 410
<i>ARF-35-AR-LF</i>	+ 783
<i>ARF-50-CR-LF</i>	+ 300
<i>ARF-50-AR-LF</i>	+ 483

No que respeita à resiliência, os resultados conseguidos permitem verificar um considerável ganho de resiliência dos mástiques comparativamente ao betume original, tendo em conta os parâmetros analisados. Verificou-se anteriormente que a incorporação da borracha provocava um grande aumento da capacidade resiliente e o filer tinha efeito exatamente oposto, embora não tão considerável.

Numa análise preliminar, era previsível um valor intermédio entre estes dois resultados e foi isso mesmo que se veio a verificar: a capacidade resiliente dos mástiques com borracha e filer aumentaram consideravelmente.

Esse aumento, à semelhança dos betumes com borracha, foi mais significativo nos mástiques que utilizaram a borracha ambiental e os valores mais altos para cada tipo de borracha verificaram-se aquando da utilização do betume mais duro. Todos estes resultados são coerentes.

Os resultados do ensaio de viscosidade são apresentados na Tabela 26, onde se indica a viscosidade função da temperaturas de ensaio.

Tabela 26 - Viscosidade nos betumes-borracha + filler

<i>Viscosidade (cP)</i>						
<i>Temp.</i> (°C)	C35/52	C50/72	ARF-35- CR-LF	ARF-35- AR-LF	ARF-50- CR-LF	ARF-50- AR-LF
100	6850	4196	358429	808143	293857	610571
110	3194	2052	232429	396571	124571	266714
120	1655	1085	95429	185000	61143	128000
130	918	618	52286	96321	31386	72214
140	541	377	28107	40100	16629	33036
150	334	240	14886	25064	10293	20493
160	219	163	11636	17357	7261	16571
170	150	113	10986	13950	6932	14657
180	108	80	12164	12836	6621	11486

Na Figura 38 encontram-se representados os valores obtidos no ensaio em comparação com os ligantes de origem.

A análise da viscosidade permite concluir que, à semelhança das fases anteriores, os valores da viscosidade aumentaram a quando da incorporação de outros materiais. Comparando entre todos os mástiques e os ligantes de origem, o comportamento entre eles é análogo à medida que a temperatura aumenta ao longo do ensaio.

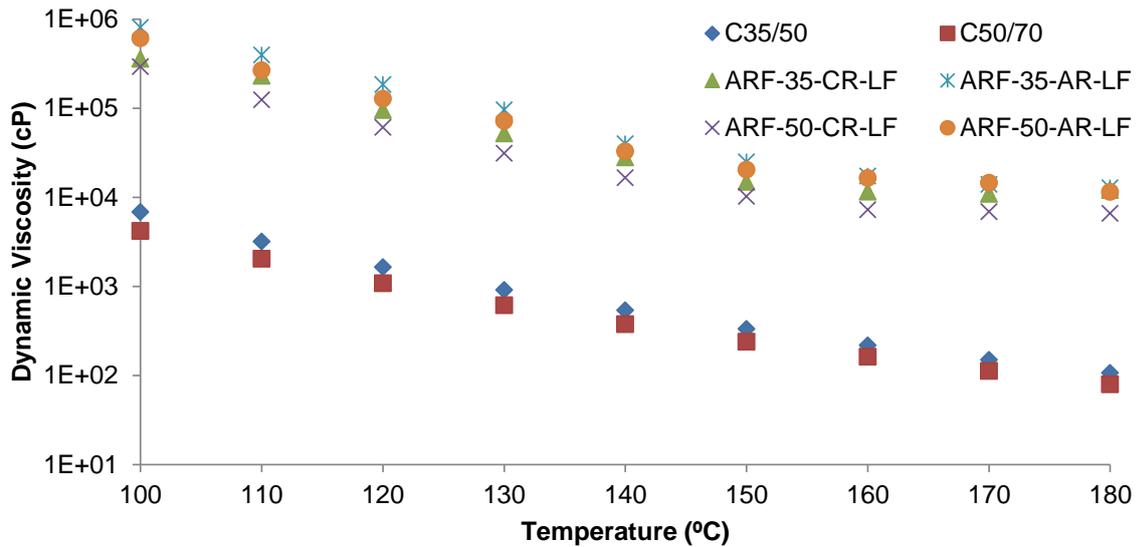


Figura 38 - Viscosidade dos betumes-borracha + filler

Mais uma vez se verifica que a borracha é a principal responsável por este aumento de viscosidade, bem como se verifica que o betume mais duro também apresenta viscosidade mais alta, como seria espectável.

Quanto ao comportamento reológico do mástique, o módulo complexo encontra-se representado na Figura 39 verificando-se uma variação significativa nas temperaturas mais altas e uma variação quase nula nas temperaturas mais baixas. Estes resultados são similares ao que ocorreram nas anteriores análises, no que toca às temperaturas mais baixas mas nas temperaturas mais altas a variação foi maior.

Relativamente ao ângulo de fase, apresentado na Figura 40, é notório de decréscimo dos seus valores nos mástiques, quando comparados com os ligantes de origem. Esta variação tem menor impacto nas temperaturas altas, pois quando aquecido, o mástique diminui a sua viscosidade e aumentado assim o ângulo de fase.

Comparando este gráfico com os gráficos do ângulo de fase nos betumes-borracha e betumes com filler analisados anteriormente, é perceptível que este comportamento é similar na presença de borracha, podendo afirmar-se que é a borracha a principal responsável por esta variação.

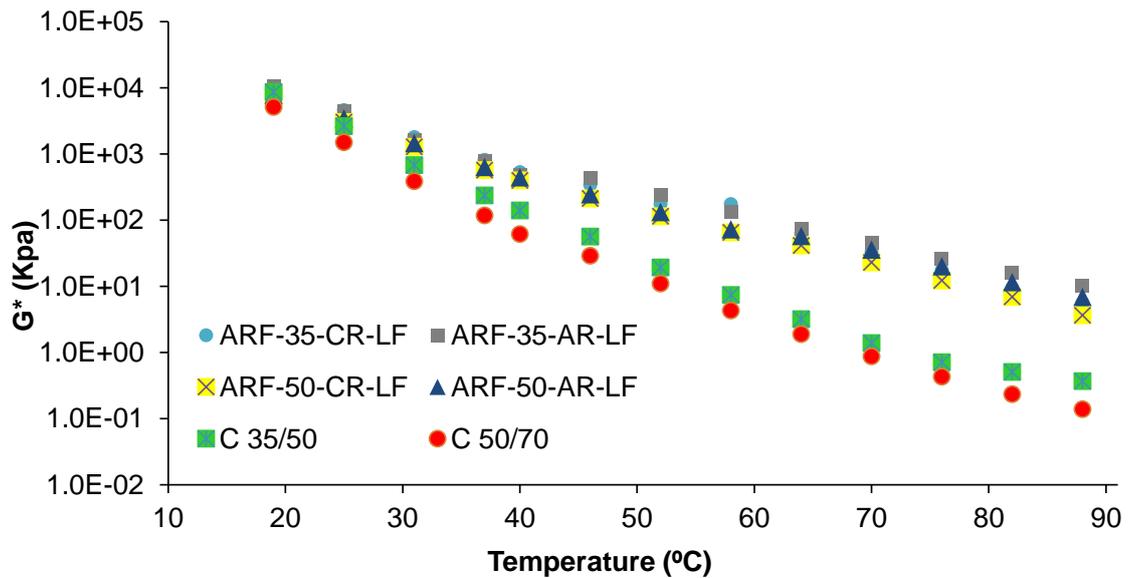


Figura 39 - Módulo complexo dos mástiques com betume-borracha + filler

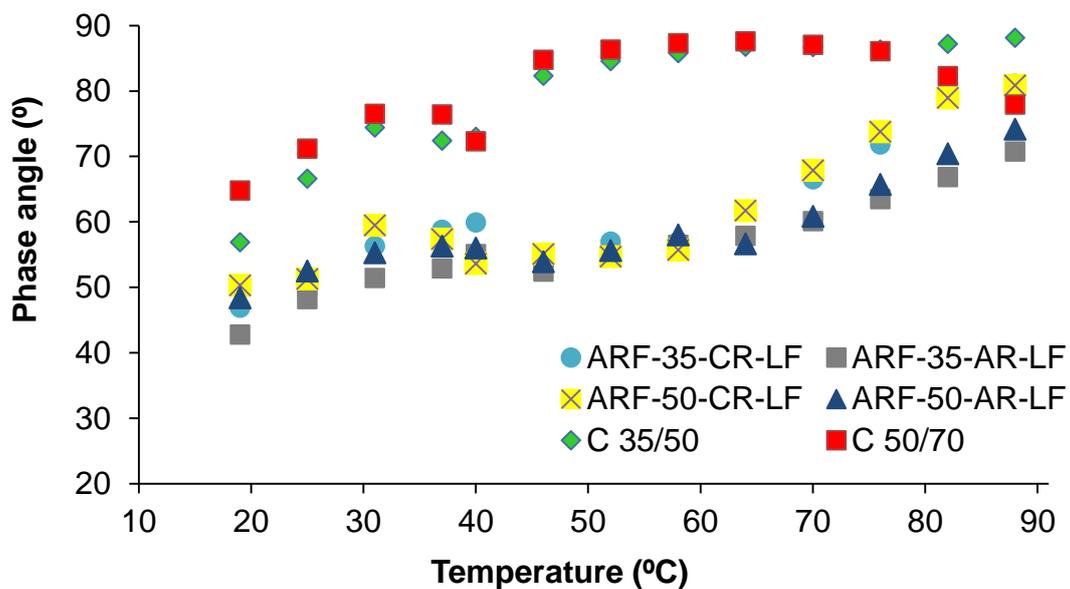


Figura 40 - Ângulo de fase dos mástiques com betume-borracha + filler

Passando agora para a análise do parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ (Figura 41) verifica-se um aumento considerável nos valores obtidos nos mástiques, principalmente nas temperaturas mais altas. Este aumento deve-se precisamente à inclusão da borracha e do filler no betume.

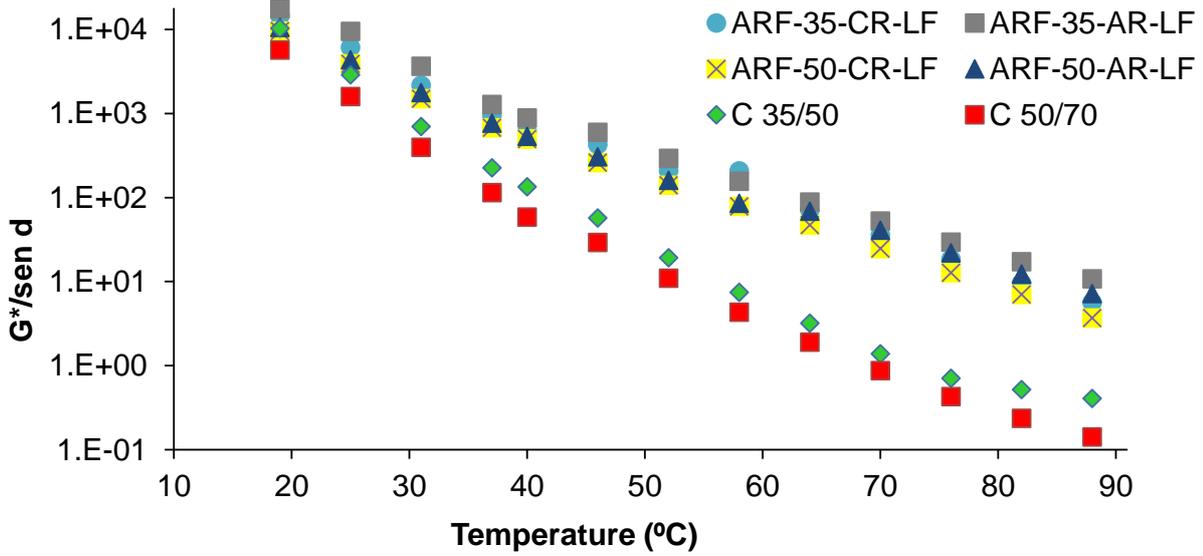


Figura 41 - Parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ dos mástiques com betume-borracha + fíler

O módulo dissipativo (Figura 42) e o módulo elástico (Figura 43) apresentam comportamento idêntico ao já verificado com os mástiques analisados das fases anteriores.

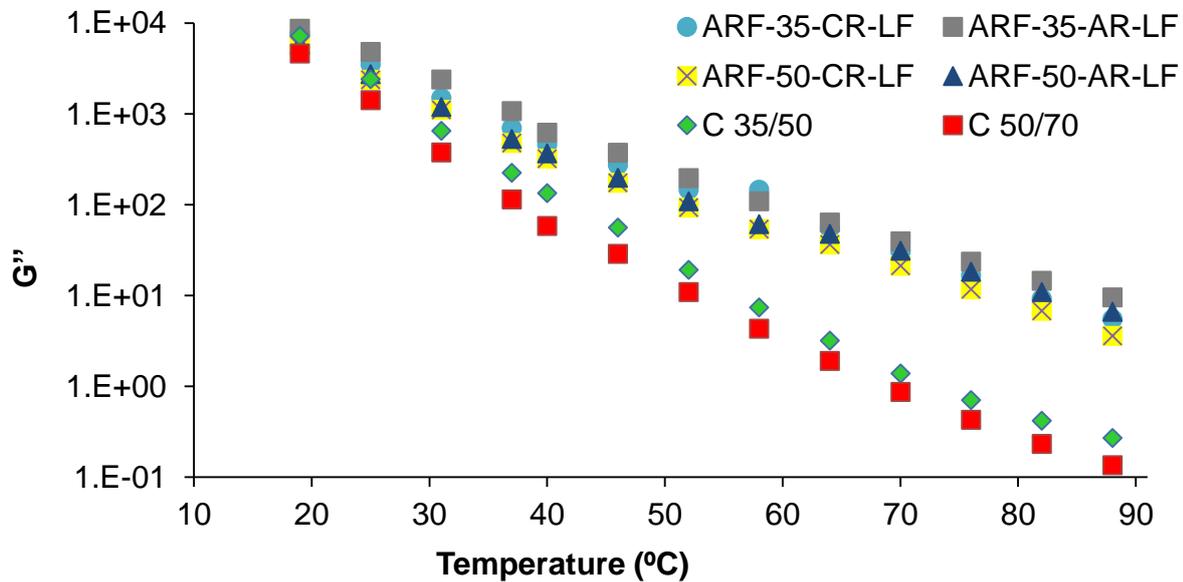


Figura 42 - Módulo dissipativo dos mástiques com betume-borracha + fíler

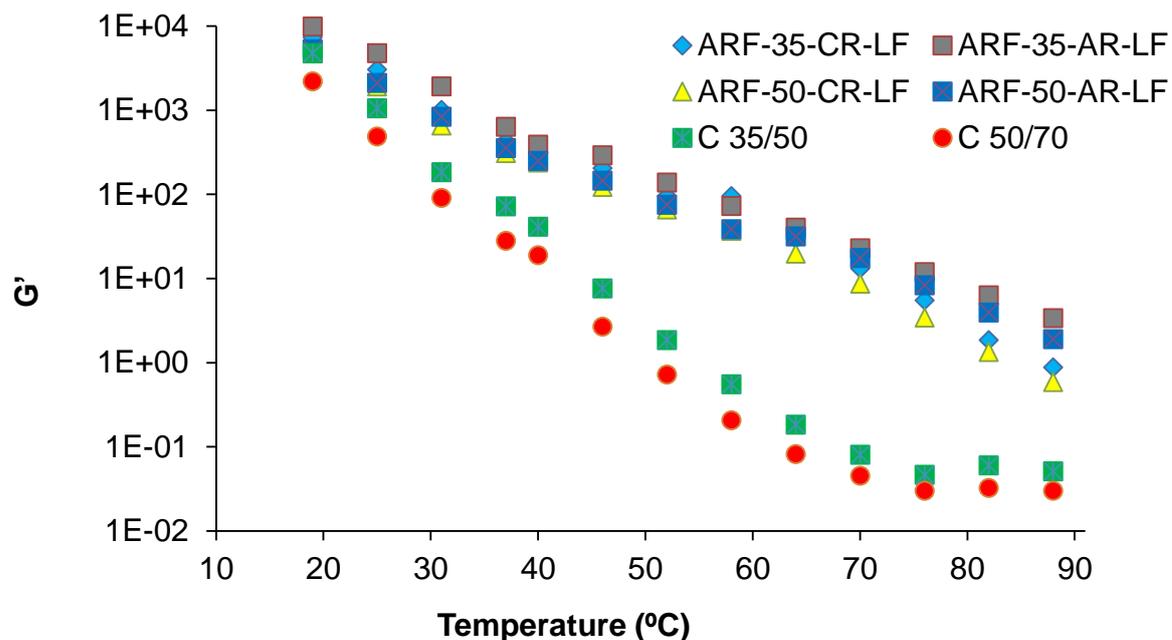


Figura 43 - Módulo elástico dos mástiques com betume-borracha + filler

4.4 Comparação entre mástiques

As análises realizadas aos mástiques produzidos nas três fases foi realizada comparando os resultados obtidos com o betume base que lhes deu origem. No entanto, para o caso dos mástiques com betume-borracha + filler interessa fazer a comparação com o betume-borracha que lhes deu origem e também com o mástique com o mesmo betume e filler, pelo que esta secção é destinada a esta comparação, realizada de acordo com o que é apresentado na Tabela 33. Esta comparação fez-se por grupos, correspondendo a cada betume-borracha estudado.

Tabela 27 - Comparação entre os mástiques produzidos

<i>Grupo</i>	<i>Betume-Borracha + Filer</i>	<i>Comparação</i>	
<i>1</i>	ARF-35-CR-LF	AR-35-CR	AF-35-LF
<i>2</i>	ARF-35-AR-LF	AR-35-AR	AF-35-LF
<i>3</i>	ARF-50-CR-LF	AR-50-CR	AF-50-LF
<i>4</i>	ARF-50-AR-LF	AR-50-AR	AF-50-LF

Quanto aos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica (Grupo 1), os resultados dos ensaios de penetração com agulha são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica

<i>Mástique</i>	<i>Penetração (mm/10)</i>
<i>AR-35-CR</i>	20
<i>AF-35-LF</i>	21
<i>ARF-35-CR-LF</i>	14

Na Figura 50 encontram-se representados os valores da penetração, dos mástiques e dos ligantes de origem, verificando-se que em todos os mástiques ocorre um decréscimo no valor da penetração, o que já era espectável tendo em conta que em todos foi incorporada uma nova substância, tornando assim o betume mais duro e resistente.

Nota-se ainda que a diminuição do valor de penetração é mais notória aquando da incorporação da borracha e filer simultaneamente do que de forma isolada. De frisar ainda que, embora a diferença seja pequena, a borracha influencia mais a redução do valor de penetração do que o filer.

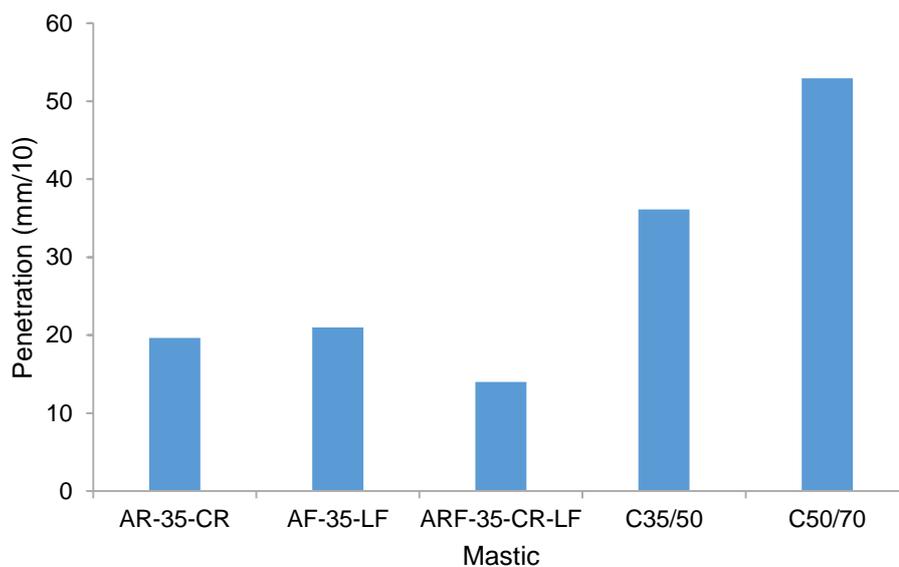


Figura 44 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica

Os resultados dos ensaios de anel e bola são apresentados na Tabela 29 enquanto que na Figura 45 encontram-se representados graficamente, verificando-se que a incorporação de filler para a produção do mástique com os 3 componentes em pouco alterou os resultados, comparativamente com a borracha, o que permite concluir que a borracha volta a ser o fator que mais influencia a temperatura de amolecimento do mástique.

Tabela 29 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica

<i>Mástique</i>	<i>Temperatura de amolecimento (°C)</i>
<i>AR-35-CR</i>	73
<i>AF-35-LF</i>	60
<i>ARF-35-CR-LF</i>	78

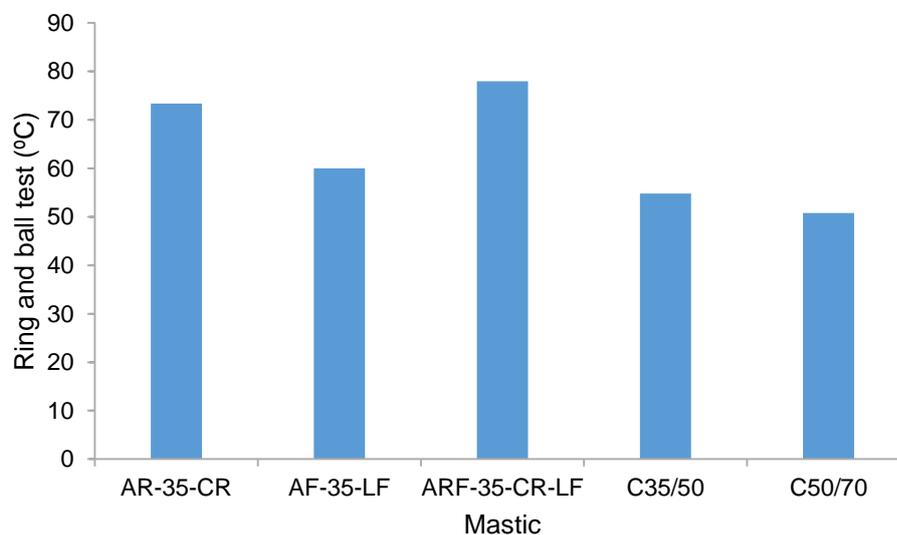


Figura 45 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica

Quanto aos resultados dos ensaios de resiliência, estes são apresentados na Tabela 30, representando-se os valores na Figura 46, podendo-se concluir que a borracha é o constituinte mais influenciador da resiliência do mástique. No mástique onde só existe betume e filer nota-se que a capacidade resiliente diminuiu ligeiramente, relativamente ao betume puro, o que é aceitável tendo em conta a incorporação que torna o ligante mais duro e plástico.

Tabela 30 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica

<i>Mástique</i>	<i>Resiliência (%)</i>
<i>AR-35-CR</i>	53
<i>AF-35-LF</i>	5
<i>ARF-35-CR-LF</i>	51

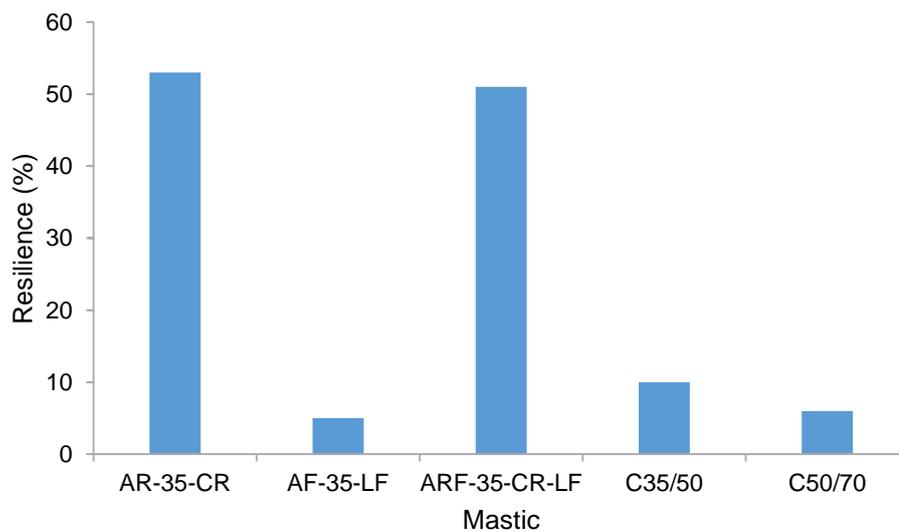


Figura 46 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha criogénica

Quanto aos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental (Grupo 2), na Tabela 31 são apresentados os resultados dos ensaios de penetração com agulha, enquanto a Figura 47 representa os valores obtidos, verificando-se que a borracha reduz mais a penetração que o filer.

Tabela 31 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental

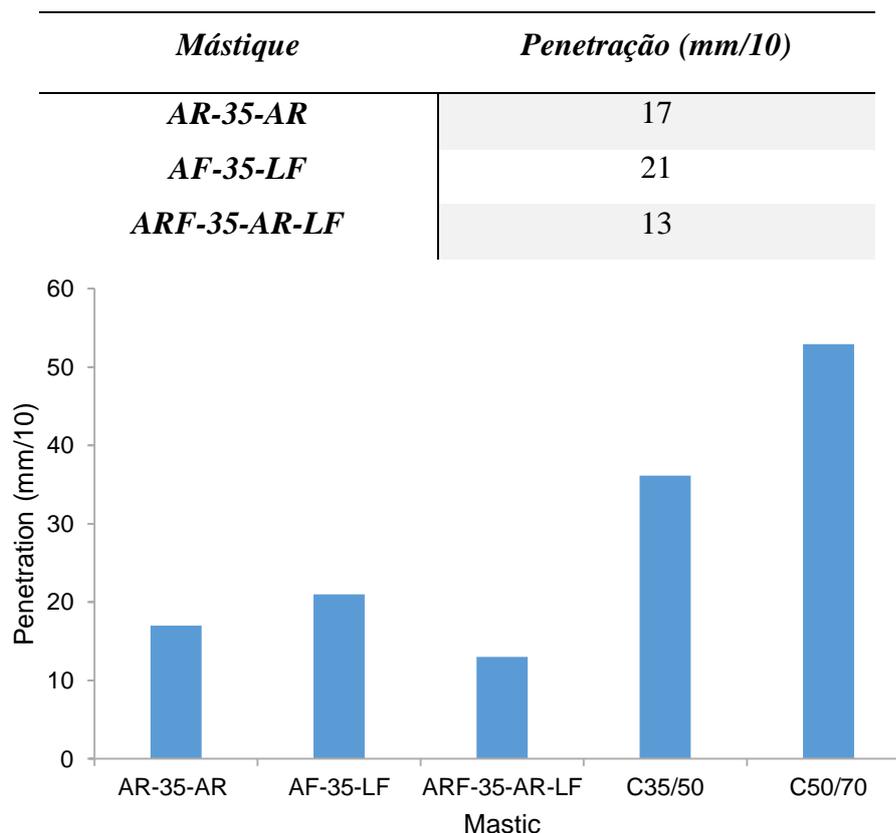


Figura 47 - Penetração dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental

Quanto aos resultados dos ensaios de anel e bola, estes são apresentados na Tabela 32 e representados na Figura 48, podendo concluir-se que o aumento da temperatura de amolecimento é influenciado principalmente pela presença de borracha, sendo que o filer tem uma influência muito reduzida na temperatura de amolecimento.

Tabela 32 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental

<i>Mástique</i>	<i>Temperatura de amolecimento (°C)</i>
<i>AR-35-AR</i>	80
<i>AF-35-LF</i>	60

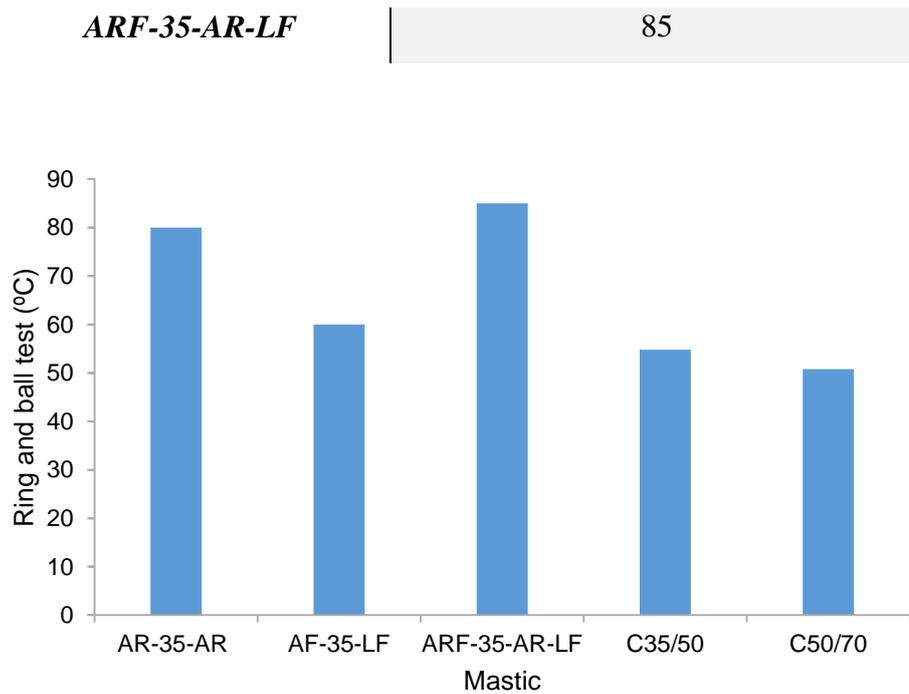


Figura 48 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental

Quanto aos resultados do ensaio de resiliência, os mesmos são apresentados na Tabela 33 e representados na Figura 49, onde se conclui que a presença do filer provoca uma diminuição da resiliência do mástique, sendo os elevados valores de resiliência obtidos pela presença da borracha.

Tabela 33 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental

<i>Mástique</i>	<i>Resiliência (%)</i>
<i>AR-35-AR</i>	60
<i>AF-35-LF</i>	5
<i>ARF-35-AR-LF</i>	53

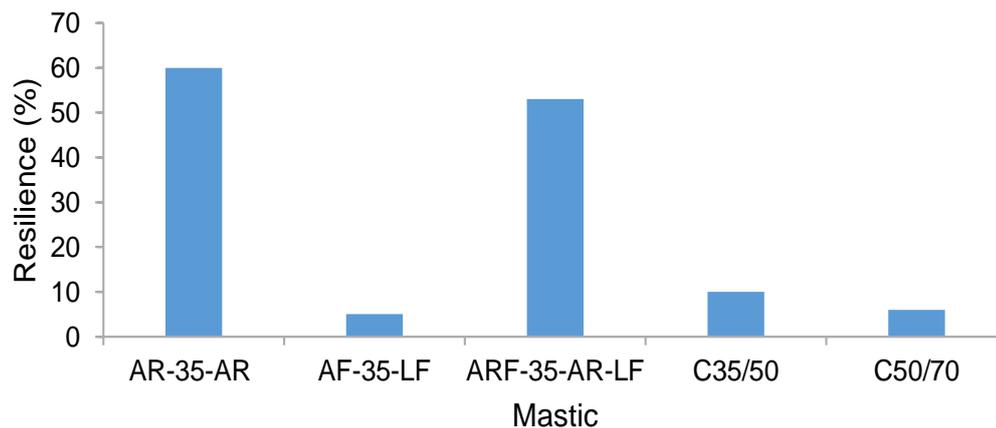


Figura 49 - Resiliência dos mástiques com betume 35/50 e borracha ambiental

Quanto aos mástiques com betume 50/70 e borracha criogénica (Grupo 3), os resultados dos ensaios de penetração com agulha são apresentados na Tabela 34 e representados na Figura 50, de onde se conclui que a redução da penetração é devida tanto à presença da borracha como do filer, parecendo que para esta configuração de mástique a contribuição da borracha e do filer é idêntica na redução da penetração.

Tabela 34 - Penetração dos mástiques com betume 50/70 e borracha criogénica

<i>Mástique</i>	<i>Penetração (mm/10)</i>
<i>AR-50-CR</i>	27
<i>AF-50-LF</i>	28
<i>ARF-50-CR-LF</i>	19

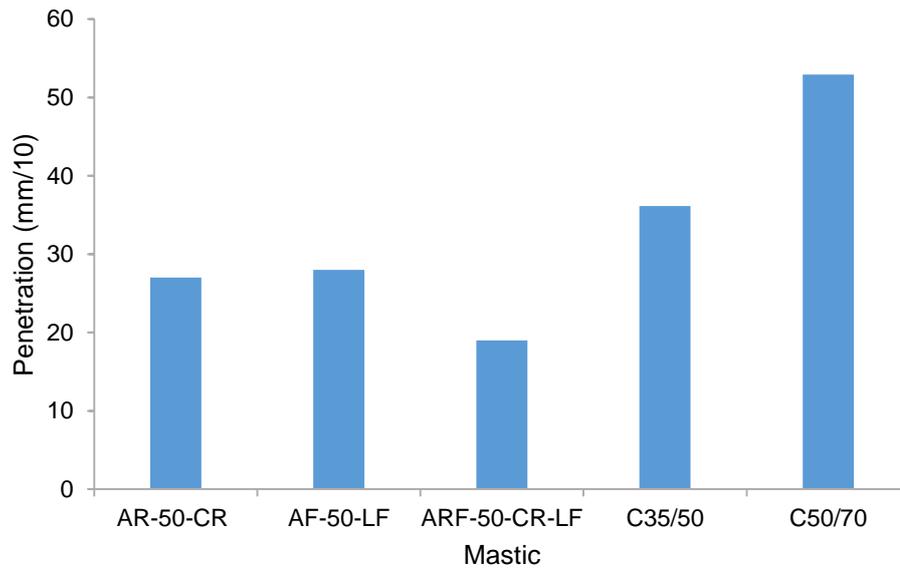


Figura 50 - Penetração dos mástiques com betume 50/70 e borracha criogénica

Quanto aos resultados dos ensaios de anel e bola, estes são apresentados na Tabela 35 e representados na Figura 51, onde se conclui que a presença do filer aumenta muito ligeiramente a temperatura de amolecimento, sendo o maior aumento devido à presença do filer.

Tabela 35 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 50/70 e borracha criogénica

<i>Mástique</i>	<i>Temperatura de amolecimento (°C)</i>
<i>AR-50-CR</i>	68
<i>AF-50-LF</i>	57
<i>ARF-50-CR-LF</i>	70

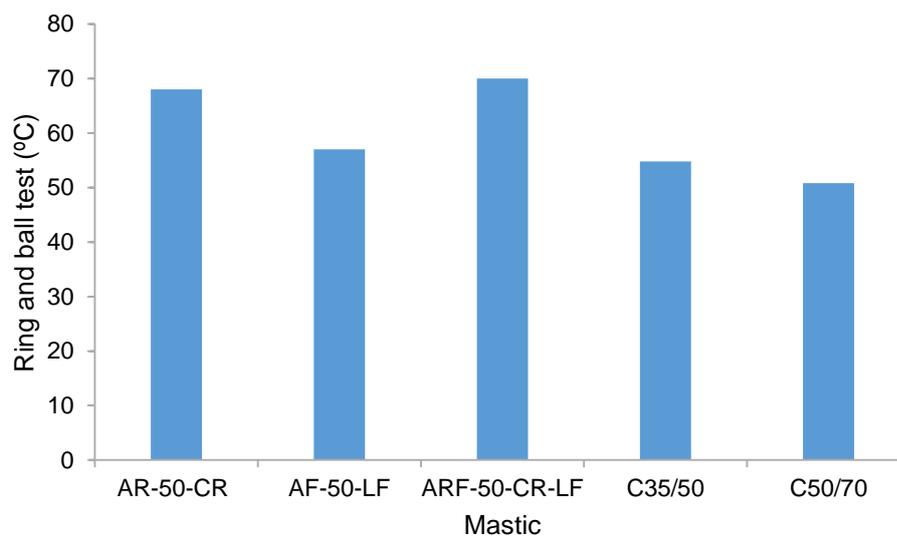


Figura 51 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 50/70 e borracha criogénica

Quanto aos resultados dos ensaios de resiliência, estes são apresentados na Tabela 36 e representados na Figura 52, onde se verifica que diminui com a presença do filer, mas no caso do betume-borracha, a resiliência aumenta.

Tabela 36 - Resiliência dos mástiques com betume 50/70 e borracha criogénica

<i>Mástique</i>	<i>Resiliência (%)</i>
<i>AR-50-CR</i>	34
<i>AF-50-LF</i>	4
<i>ARF-50-CR-LF</i>	40

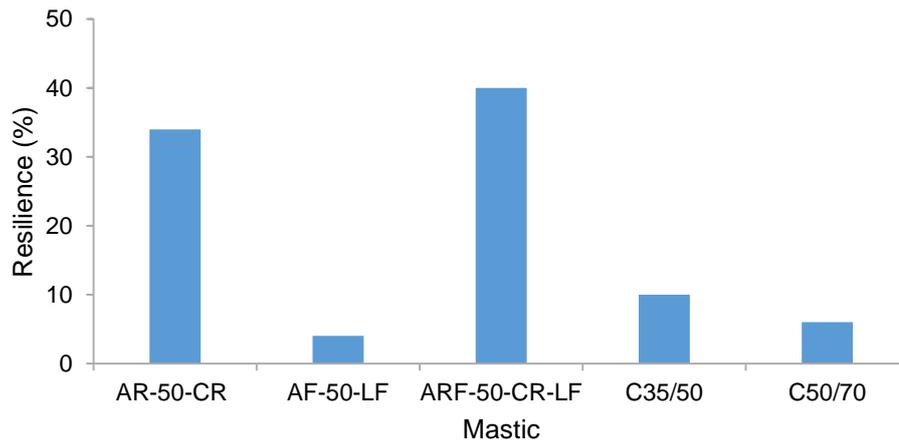


Figura 52 - Resiliência dos mástiques com betume 50/70 e borracha criogénica

Quanto aos mástiques com betume 50/70 e borracha ambiental (Grupo 4), os resultados do ensaio de penetração com agulha são indicados na Tabela 37, representando-se na Figura 53, verificando-se que a presença tanto do filer como da borracha contribuem para a redução da penetração do mástique.

Tabela 37 - Penetração dos mástiques com betume 50/70 e borracha ambiental

<i>Mástique</i>	<i>Penetração (mm/10)</i>
<i>AR-50-AR</i>	26
<i>AF-50-LF</i>	28
<i>ARF-50-AR-LF</i>	18

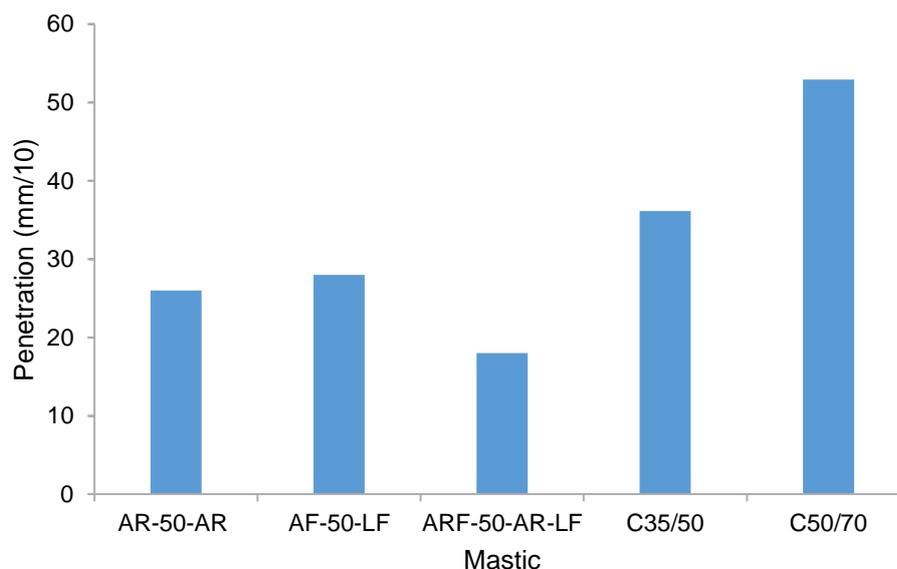


Figura 53 - Penetração dos mástiques com betume 50/70 e borracha ambiental

Já os resultados dos ensaios de anel e bola são apresentados na Tabela 38 e representados na Figura 54, onde se conclui que a temperatura de amolecimento é mais influenciada pela borracha que pelo filer.

Tabela 38 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 50/70 e borracha ambiental

<i>Mástique</i>	<i>Temperatura de amolecimento (°C)</i>
<i>AR-50-AR</i>	72
<i>AF-50-LF</i>	57
<i>ARF-50-AR-LF</i>	80

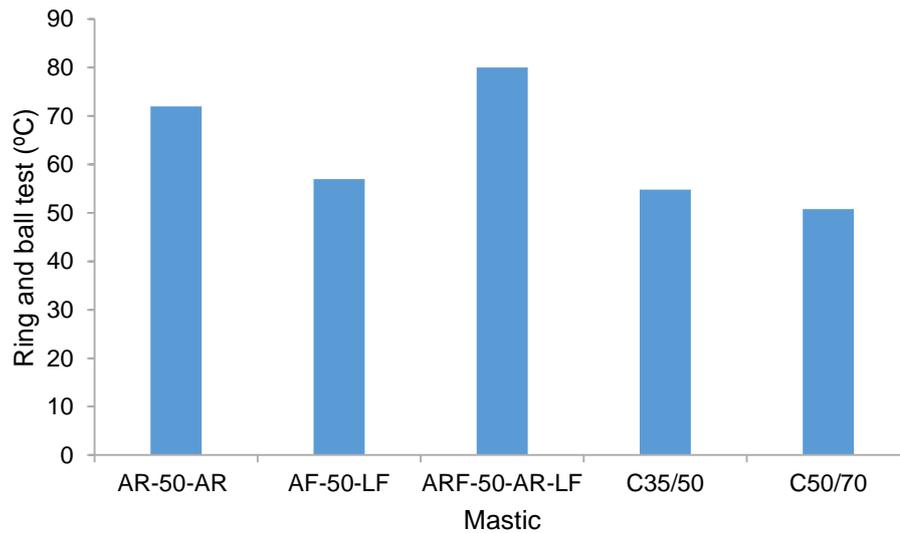


Figura 54 - Temperatura de amolecimento dos mástiques com betume 50/70 e borracha ambiental

Quanto à resiliência, os resultados são apresentados na Tabela 39 e representados na Figura 55, sendo possível observar que o filer contribui para uma redução da resiliência enquanto que a borracha contribui para o seu aumento.

Tabela 39 - Resiliência dos mástiques com betume 50/70 e borracha ambiental

<i>Mástique</i>	<i>Resiliência (%)</i>
<i>AR-50-AR</i>	54
<i>AF-50-LF</i>	4
<i>ARF-50-AR-LF</i>	35

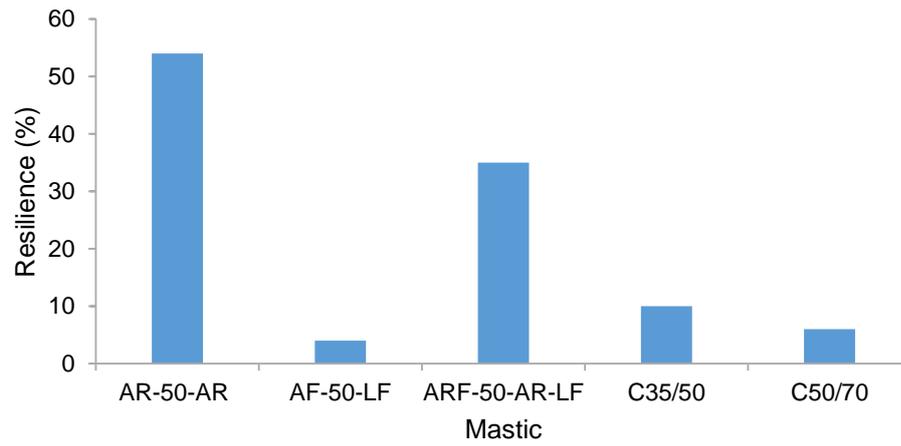


Figura 55 - Resiliência dos mástiques com betume 50/70 e borracha ambiental

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Tendo como base os objetivos inicialmente propostos para este trabalho, em que se pretende compreender de que forma a borracha e o filer, ao serem incorporados no betume, influenciam o comportamento dos mástiques, pode afirmar-se que estes foram globalmente atingidos.

Foi realizada uma produção e respetivo estudo da alteração de ligantes convencionais através da incorporação de borracha e filer. Este estudo demonstrou que a incorporação de outros materiais nos ligantes é viável pois os mástiques produzidos apresentaram resultados em alguns casos bastante animadores, o que leva a acreditar que, com uma continuação deste estudo e com possíveis ajustes nas dosagens, processos de produção ou até acrescentado outros materiais e substâncias, seja viável a utilização de mástiques similares na produção de misturas betuminosas no futuro.

No que toca aos resultados obtidos, existem várias conclusões a retirar, sendo que algumas delas sejam meras previsões, tendo como base das argumentações, o normal comportamento dos ligantes betuminosos que são conhecidos, embora se saiba que a linearidade neste campo é diminuta.

Começando pelos betumes com incorporação de borracha, conclui-se que a borracha provoca um aumento da dureza do betume e da capacidade elástica deste. Os valores da penetração diminuíram em relação ao valor dos ligantes de origem, o ponto de amolecimento aumentou, em conjunto com a capacidade resiliente, e de uma forma considerável. A viscosidade também teve um aumento notório.

Nas componentes do ligante analisadas através do ensaio reológico verificou-se um aumento do módulo de rigidez nas altas temperaturas, da capacidade resistente às deformações permanentes e da capacidade dissipativa, bem como da sua capacidade elástica. Já o ângulo de fase verificou-se uma diminuição do seu valor.

Relativamente aos betumes utilizados, é de referir que o betume 35/50 apresentou uma maior variação de comportamento em relação ao betume 50/70. Das borrachas utilizadas, a criogénica

apresenta melhores resultados que a borracha ambiental pois apresenta uma menor variação em relação ao ligante de origem, tendo em conta que era esse o objetivo inicial.

Quanto aos betumes com filer, conclui-se que o filer conduz a um aumento da dureza do betume e da capacidade viscosa deste. Os valores da penetração também diminuíram em relação ao valor dos ligantes de origem, o ponto de amolecimento aumentou mas não tão significativamente e a viscosidade também teve um acréscimo. Já no que diz respeito à capacidade resiliente, esta verificou um decréscimo em todos os tipos de filer estudados.

Nas componentes do betume com filer estudadas através do ensaio reológico verificou-se também neste caso um aumento do módulo de rigidez embora não tão acentuado, a capacidade resistente às deformações permanentes também aumentou, bem como a capacidade dissipativa e elástica, embora também em pequena escala. Nestes mástiques, o ângulo de fase apresentou valores muito similares aos verificados nos ligantes de origem.

Sobre os betumes utilizados, é de referenciar que também aqui o betume 35/50 apresentou uma maior instabilidade de comportamento em relação ao betume 50/70. Relativamente aos tipos de filer utilizados, verificou-se que aquele que apresentava resultados menos animadores era a cal hidráulica, tendo o cimento e o pó calcário valores e comportamentos relativamente próximos, onde em alguns parâmetros um era melhor que outro e noutros verificava-se o oposto.

Por fim, nos mástiques com incorporação no betume de borracha e pó calcário, verificou-se um comportamento similar à junção das características verificadas no betume com borracha e no betume com filer. Os valores da penetração diminuíram ainda mais em relação ao valor dos ligantes de origem, o ponto de amolecimento e a capacidade resiliente apresentaram valores similares aos do betume com borracha e a viscosidade também teve um desempenho semelhante.

Já na análise as estes mástiques feita através do ensaio reológico verificou-se também neste caso um aumento do módulo de rigidez nas altas temperaturas, da capacidade resistente às deformações permanentes e da capacidade dissipativa, bem como da sua capacidade elástica. De referir que estes aumentos foram ainda mais significativos. No que toca ao ângulo de fase verificou-se uma diminuição do seu valor, à semelhança dos betumes com borracha.

Sintetizando todas estas conclusões até agora referidas é possível concluir que a inclusão de borracha e filer é uma hipótese a ser considerada para a produção de misturas betuminosas. É

certo de que a análise da viscosidade dos mástiques produzidos apresentou valores que não são muito animadores em alguns parâmetros mas as capacidades viscoelásticas nos ensaios reológicos apresentaram uma melhoria considerável, o que leva a acreditar na sua viabilidade em termos de aplicação.

Também se conclui que a borracha criogénica é a mais aconselhável para a produção de mástiques, bem como é preferível o uso de pó calcário e cimento, ao invés da cal hidráulica. Outros tipos de filler poderão ser utilizados possivelmente e com resultados tão ou ainda mais animadores mas isso só poderá ser analisado em trabalhos futuros.

Para terminar não poderia deixar de salientar de que as afirmações de melhoria são meras especulações e que necessitam de validação com análises experimentais. O que leva a redigir as afirmações acima é o facto de os resultados obtidos nos mástiques, serem aqueles que muito previsivelmente as misturas betuminosas e os pavimentos irão apresentar, tendo em conta que o mástique é um dos seus constituintes e sem dúvida o mais importantes, principalmente nas características viscosas e elásticas (não fosse o betume um material viscoelástico).

5.2 Trabalhos futuros

Todo este trabalho aqui apresentado nesta dissertação de Mestrado, permitiu visar uma área ainda um pouco obscura devido à difícil compreensão do comportamento dos mástiques. Nesse sentido, este trabalho aqui apresentado potencia uma enorme panóplia de opções e levanta uma série de questões que seriam interessantes de serem estudadas.

Desde logo surge a possibilidade de estudo dos mástiques com borracha e como filler utilizar o cimento e a cal hidráulica para comparar também nessa fase. Tal não foi feito por falta de tempo pois já assim foram produzidos e analisados 14 novos ligantes, bem como a análise aos ligantes originais. Além disso, existem outros ensaios que podiam ter sido realizados para um conhecimento ainda mais pormenorizado dos ligantes com o RTFOT ou ductilómetro.

Outra possibilidade seria a utilização de outros tipos de filler como pó de resíduos de demolições por exemplo, bem como outro tipo de materiais. A juntar a isso era interessante também realizar estudos no sentido de analisar o comportamento dos mástiques com a incorporação de polímeros ou outras substâncias que confirmem a estes as capacidades que se apresentem deficitárias.

Este estudo também não deveria ficar só pela parte da análise do ligante, mas sim avançar para a formulação de misturas betuminosas utilizando os mástiques desenvolvidos e aí validar as conclusões de previsão de comportamento apresentadas neste trabalho. Além disso, seria possível realizar outros ensaios e teríamos assim uma correta percepção do comportamento dos pavimentos.

Uma questão não menos importante a ser estudada é a adesividade e envolvimento dos agregados com os mástiques produzidos. Como foi referido, o pior desempenho dos mástiques registou-se na viscosidade, mesmo a altas temperaturas, fator que prejudica a produção e que importa encontrar uma solução.

Uma outra hipótese para estudo em trabalhos futuros prende-se com a necessidade de averiguar corretamente a alteração que ocorre nos mástiques, caso as percentagens dos constituintes fossem alteradas. Existem já alguns estudos realizados nesse sentido mas seria aliciante tentar descobrir as dosagens de filler ou de borracha por exemplo, que melhores resultados apresentavam

Por fim, todo este trabalho só faz realmente sentido quando aplicado num contexto real, logo, no final deste estudo devia ser também potenciada e analisada a melhor forma de aplicar todos os conhecimentos na prática. Sabe-se que esta parte é sempre bastante complicada devido à desconfiança e renitência dos empreiteiros e donos de obra mas tendo em conta que a aplicação deste conceito visa uma poupança na quantidade de betume a utilizar numa mistura betuminosa, pode ser que facilite essa mesma ligação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2001). AASHTO - *Provisional Standards*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.
- ANDERSON D. A. et al. Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. Association of Asphalt Paving Technologists, v.60, p.437 – 456, 1991.
- APORBET (1998). *Misturas Betuminosas. Contribuição para a Normalização do Fabrico e Aplicação*. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas. Lisboa.
- Bolk, N., J. Van der Heide and M. Van Zantvliet (1982). *Basic Research into the Effect of Filler on the Mechanical Properties of Dense Asphaltic Concrete*. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol.51.
- Campos, P.S. (2007). Aproveitamento Industrial da Borracha Reciclada de Pneus Usados. Tese de Mestrado em Gestão Ambiental, Universidade do Minho, Braga.
- Craus, J., Ishai I. and A. Sides (1981). Durability of bituminous Paving Mixtures as Related to Filler Type and Properties. CD Rom. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 50.
- Craus, J., Ishai, I. and Sides, A. (1978). Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler Type and Properties. Journal of the AAPT. Vol. 47.
- Hicks, R. and EPPS, J. – “life cycle costs for asphalt-rubber paving materials”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- JAE (1998). Caderno de Encargos: 03 – Pavimentação. Vol. V. Junta Autónoma de Estradas (atual Infraestruturas de Portugal). Almada.
- JAE (1995). Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional. Junta Autónoma de Estradas (atual Infraestruturas de Portugal). Almada.
- Leite, L.F.M.; Constantino, R.S. and Vivoni, A. – “ Rheological studies of asphalt with ground tire rubber”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- Pereira, P. e V. Miranda (1999). Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho, Braga.
- Pereira, P. e L. Picado – Santos (2002). Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho, Braga.

- Silva, H.M.R.D. (2005). Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Masquite. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.
- Silva, H.; Pais, J. & Pereira, P. (2002) – “Evaluation of mastic in bituminous mixtures”. Paper presented in the 4th European Symposium of Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements, Nottingham.
- Sousa, J.B.; Pais, J. e RACHID SAÏM – “The effect of mode of loading on the comparison between asphalt rubber and traditional hot mixes laboratory performance”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- Smith, L.; Birgisson, B.; Choubane, B. and Musselman, J. – “Asphalt-rubber in the State of Florida: the first ten years”, Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura, 2000.
- Silva, H; Peralta, J. (2008) - “Avaliação da interação entre o betume, a borracha e o filer em misturas betuminosas”. Universidade do Minho, Guimarães.

ANEXOS

BETUME 35/50

DEFINIÇÃO:

Betume asfáltico para pavimentação, de acordo com as especificações da EN 12591 para o betume 35/50.

ESPECIFICAÇÕES:

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	NORMA	MIN.	MAX.
Penetração (25°C)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Índice de penetração	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	50	58
Ponto de fragilidade Fraass	°C	EN 12593	-	-5
Solubilidade	%	EN 12592	99,0	-
Ponto de inflamação	°C	EN ISO 2592	240	-
Resistência ao endurecimento a 163°C (EN 12607-1)				
Varição de massa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetração retida	%	EN 1426	53	-
Δ Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	11

APLICAÇÕES:

- Misturas betuminosas a quente

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABALHO:

- Temperatura da mistura (°C): 160-165
- Temperatura do ligante (°C): 160-165
- Temperatura de compactação (°C): 150-160

BETUME 50/70

DEFINIÇÃO:

Betume asfáltico para pavimentação, de acordo com as especificações da EN 12591 para o betume 50/70.

ESPECIFICAÇÕES:

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	NORMA	MIN.	MAX.
Penetração (25°C)	0,1 mm	EN 1426	50	70
Índice de penetração	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	46	54
Ponto de fragilidade Fraass	°C	EN 12593	-	-8
Solubilidade	%	EN 12592	99,0	-
Ponto de inflamação	°C	EN ISO 2592	230	-
Resistência ao endurecimento a 163°C (EN 12607-1)				
Varição de massa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetração retida	%	EN 1426	50	-
Δ Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	11

APLICAÇÕES:

- Misturas betuminosas a quente

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABALHO:

- Temperatura da mistura (°C): 150-160
- Temperatura do ligante (°C): 150-160
- Temperatura de compactação (°C): 145-155