



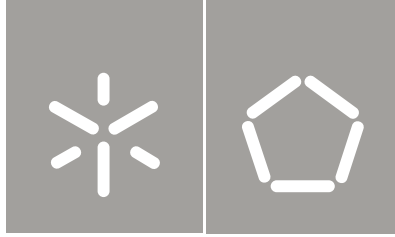
Jorge Filipe Araújo Marques

Estudo do comportamento do betume  
modificado com borracha produzido a  
temperaturas temperadas

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Jorge Filipe Araújo Marques

Estudo do comportamento do betume  
modificado com borracha produzido a  
temperaturas temperadas

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

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais  
Professor Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira

Aos meus pais e irmão.



## **Agradecimentos**

O presente trabalho de dissertação de mestrado foi realizado na Universidade do Minho sob a orientação do Doutor Jorge Carvalho Pais e do Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira, Professores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Ao Professor Jorge Pais expresso o mais profundo reconhecimento pela amizade, apoio e disponibilidade demonstrada. Ao mesmo devo os ensinamentos e orientações transmitidos bem como o permanente incentivo.

Ao Professor Joel Oliveira quero expressar o meu enorme reconhecimento pela amizade, apoio e estímulo manifestados desde sempre, bem com a disponibilidade demonstrada para esclarecer todas as dúvidas, ensinar e incentivar.

Ao Engenheiro Carlos Palha, Técnico responsável pelo Laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho, agradeço o apoio, troca de opiniões e disponibilidade demonstrada.

Ao Hélder Torres, técnico de laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho, agradeço a dedicação e disponibilidade demonstrada.

À Engenheira Daniela Palha agradeço a disponibilidade que sempre demonstrou para transmitir ensinamentos e esclarecer dúvidas.

Às empresas Petrocerco, Lda, Campi y Jove, SA, Sasol e Kumho Petrochemical Co., Ltd. por terem contribuído para a realização deste trabalho ao fornecer os aditivos Iterlow, Rediset, Sasobit e Leadcap, respetivamente. Agradeço ainda à Pedreira Bezerras, Lda, pelo fornecimento dos agregados utilizados neste trabalho.

A todos os que se mostraram disponíveis para ajudar expresso os meus sinceros agradecimentos.

Para finalizar quero agradecer aos meus pais e ao meu irmão.



## **Resumo**

A utilização de borracha reciclada de pneus usados em misturas betuminosas de pavimentos rodoviários pode ser uma excelente solução para os pneus em fim de vida. As características da borracha potenciam uma melhoria da qualidade das misturas. No entanto, as misturas produzidas com betume modificado com borracha apresentam a desvantagem de necessitarem de uma temperatura de produção mais elevada do que a das misturas convencionais.

A presente dissertação visa estudar o comportamento do betume modificado com borracha produzido a temperaturas temperadas, pela utilização de aditivos redutores de temperatura, comparando-o com o do betume modificado com borracha produzido convencionalmente a temperaturas elevadas.

Numa primeira fase realizou-se a caracterização básica e reológica do betume modificado com borracha produzido quer a temperaturas elevadas quer a temperaturas temperadas. Seguidamente produziram-se algumas misturas betuminosas para avaliar o efeito dos aditivos nas condições de produção, nomeadamente, na temperatura de produção e compactação, bem como na sensibilidade à água das misturas produzidas a temperaturas temperadas.

Para análise da viabilidade técnica da utilização dos aditivos na produção de betume modificado com borracha produzido a temperaturas temperadas, comparou-se os respetivos resultados com os obtidos para o betume modificado com borracha produzido à temperatura convencional.

A realização deste trabalho permitiu concluir que as misturas betuminosas produzidas a temperaturas temperadas apresentam um comportamento idêntico às misturas betuminosas com betume modificado com borracha produzido a quente, permitindo obter uma redução na temperatura de produção do betume modificado com borracha e das misturas betuminosas da ordem dos 20°C.

### **Palavras-chave:**

Misturas betuminosas

Betume modificado com borracha (BMB)

Misturas betuminosas temperadas

Temperaturas de produção de misturas betuminosas

Aditivos redutores de temperature





## Abstract

The use of recycled rubber from used tyres in road pavement asphalt mixtures can be an excellent solution for the end-of-life tyres. The characteristics of the rubber potentiate an improved quality of the mixtures. However, the mixtures produced with rubber modified bitumen (known as asphalt rubber) have the disadvantage of requiring a production temperature higher than that used on conventional asphalt mixtures.

The present work aimed at studying the behaviour of the asphalt rubber binder produced at moderate temperatures, by the use of warm mix asphalt (WMA) additives, comparing it with that of asphalt rubber binder conventionally produced at high temperatures.

Initially, the basic and rheological characterization of asphalt rubber binder, produced at both high and moderate temperatures, was carried out. Then some asphalt rubber mixtures were produced to evaluate the effect of additives in the production conditions, including the production and compaction temperature, as well as the water sensitivity of the warm asphalt rubber mixtures.

To analyze the technical feasibility of the use of additives in the production of warm asphalt rubber binders, the respective results were compared with those obtained for the conventional asphalt rubber binder produced at high temperatures.

This work allowed concluding that warm asphalt rubber mixtures show a behaviour similar to conventional asphalt rubber mixtures. A reduction in the production temperature of asphalt rubber binder and of the asphalt rubber mixtures in the order of 20 °C was observed.

Keywords:

Asphalt mixtures

Asphalt rubber binder

Warm Mix Asphalts (WMA)

Production temperatures of asphalt mixtures

Temperature-reducing additives



---

## Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento Temático .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Organização da dissertação .....	2
2. Estado da Arte.....	1
2.1. Misturas Betuminosas com Betume modificado com Borracha .....	1
2.2. Misturas Betuminosas produzidas a temperaturas temperadas .....	3
2.2.1. Aditivos orgânicos .....	8
2.2.2. Aditivos químicos .....	9
2.2.3. Espuma com injeção de água.....	12
2.2.4. Espuma com minerais sintéticos ou naturais .....	19
2.3. Misturas betuminosas com betume modificado com borracha produzidas a temperaturas temperadas .....	21
2.4. Comportamento reológico do betume modificado com borracha.....	24
3. Materiais e Métodos.....	31
3.1. Materiais utilizados .....	31
3.2. Produção dos betumes modificados com borracha em estudo .....	32
3.3. Métodos de ensaio utilizados para caracterização dos betumes.....	35
3.3.1. Ponto de amolecimento determinado pelo método de Anel e Bola.....	35
3.3.2. Penetração de betumes .....	35
3.3.3. Determinação da viscosidade através do viscosímetro rotacional.....	36
3.3.4. Resiliência.....	37
3.3.5. Reologia .....	38
3.4. Produção das misturas betuminosas com betume modificado com borracha .....	39
3.5. Métodos de ensaio utilizados para caracterização das misturas.....	40
3.5.1. Ensaio de Compactabilidade.....	40
3.5.2. Estudo da Sensibilidade à água.....	42
4. Resultados.....	45
4.1. Ponto de amolecimento determinado pelo Método do Anel e Bola.....	45

4.2. Penetração.....	48
4.3. Viscosidade dinâmica .....	51
4.4. Resiliência.....	55
4.5. Reologia.....	58
4.6. Compactabilidade .....	71
4.7. Sensibilidade à água .....	74
4.8. Conclusões .....	78
5. Considerações Finais.....	81
5.1. Conclusões.....	81
5.2. Desenvolvimentos futuros .....	81
Referências bibliográficas.....	83

## Índice de Figuras

Figura 1 - Diferença nas emissões de fumos e gases observados na central durante a descarga de uma mistura betuminosa a quente e de uma mistura temperada (Ferreira et al., 2009).....	4
Figura 2 - Classificação da produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção (adaptado de FHWA, 2008 e Ferreira, 2009) .....	5
Figura 3 - Duas formas de apresentação do aditivo Sasobit <sup>®</sup> (adaptado de Hurley and Prowell, 2008 e Ferreira, 2009) .....	8
Figura 4 - Pastilhas de Rediset <sup>®</sup> (Ferreira, 2009) .....	11
Figura 5 - Processo de produção de WAM-Foam <sup>®</sup> (adaptado de Ferreira, 2009 e Pereira, 2010).....	13
Figura 6 - Unidade de produção de espuma (adaptado de EAPA, 2007 e Ferreira, 2009) .....	14
Figura 7 - Double Barrel com opção Green e unidade de produção de espuma (adaptado de ASTEC, 2009 e Ferreira, 2009) .....	14
Figura 8 - Processos de produção das LEA (adaptado de FHWA, 2008 e Ferreira, 2009).....	16
Figura 9 - Vista geral de uma central de misturas betuminosas descontínua, com introdução da areia a frio diretamente no misturador (adaptado de Ferreira, 2009).....	17
Figura 10 - Injeção do betume-espuma numa central betuminosa (adaptado de D'Angelo et al., 2008 e Pereira, 2010) .....	18
Figura 11 - Dispositivo para execução da espuma de betume da Gencor (adaptado de Gencor, 2009) .....	18
Figura 12 - Zeólitos sintéticos Aspha-min <sup>®</sup> (esquerda) e Advera <sup>®</sup> (direita) (Ferreira, 2009)..	20
Figura 13 - Sistema automático de introdução do Aspha-Min <sup>®</sup> (Ferreira, 2009).....	20
Figura 14 - Misturadora para adição de zeólitos (adaptado de EAPA, 2007) .....	21
Figura 15 - Temperaturas de produção e compactação para diferentes misturas (adaptado de Sebaaly et al., 2012).....	22
Figura 16 - Esquema de aplicação da tensão numa amostra de betume (adaptado de Bernucci et al., 2008).....	27
Figura 17 - Desfasamento entre a tensão aplicada e a deformação (adaptado de Bernucci et al., 2008) .....	27
Figura 18 - Exemplos de resultados do ângulo de fase de dois betumes diferentes (Bernucci et al., 2008) .....	28
Figura 19 - Curva granulométrica dos agregados.....	32
Figura 20 - Betumes Modificados com Borracha aditivados com Sasobit.....	33

Figura 21 - Betumes Modificados com Borracha aditivados com Leadcap .....	33
Figura 22 - Betumes Modificados com Borracha aditivados com Rediset.....	34
Figura 23 - Betumes Modificados com Borracha aditivados com Iterlow .....	34
Figura 24 - Penetrómetro utilizado para realizar o ensaio de penetração .....	36
Figura 25 - Viscosímetro rotacional.....	36
Figura 26 - Penetrómetro utilizado para realizar o ensaio de resiliência .....	38
Figura 27 - Reómetro dinâmico de corte .....	38
Figura 28 - Curva granulométrica da mistura em estudo.....	40
Figura 29 - Compactador de impacto.....	41
Figura 30 - Ensaio de tração indireta .....	43
Figura 31 - Gráfico resultante do ensaio de tração indireta .....	43
Figura 32 - Influência da % de Sasobit no Ponto de amolecimento .....	45
Figura 33 - Influência da percentagem de Leadcap no ponto de amolecimento.....	46
Figura 34 - Influência da percentagem de Rediset no ponto de amolecimento .....	46
Figura 35 - Influência da % de Iterlow no Ponto de amolecimento .....	47
Figura 36 - Influência da temperatura no ponto de amolecimento do BMB .....	47
Figura 37 - Penetração do BMB produzido com diferentes percentagens de Sasobit .....	48
Figura 38 - Penetração do BMB produzido com diferentes percentagens de Leadcap .....	49
Figura 39 - Penetração do BMB produzido com diferentes percentagens de Rediset.....	49
Figura 40 - Penetração do BMB produzido com diferentes percentagens de Iterlow .....	50
Figura 41 - Influência da temperatura na penetração do BMB.....	50
Figura 42 - Viscosidade dinâmica do BMB aditivado com diferentes percentagens de Sasobit.....	51
Figura 43 - Influência da percentagem de Leadcap na viscosidade do BMB.....	52
Figura 44 - Influência da temperatura na viscosidade do BMB aditivado com Leadcap .....	53
Figura 45 - Influência da percentagem de Rediset na viscosidade do BMB .....	53
Figura 46 - Influência da percentagem de Iterlow na viscosidade do BMB.....	54
Figura 47 - Influência da temperatura na viscosidade do BMB com Iterlow .....	54
Figura 48 - Resiliência do BMB com diferentes percentagens de Sasobit .....	55
Figura 49 - Resiliência do BMB com diferentes percentagens de Leadcap .....	56

---

Figura 50 - Resiliência do BMB com diferentes percentagens de Rediset .....	56
Figura 51 - Resiliência do BMB com diferentes percentagens de Iterlow .....	57
Figura 52 - Resiliência do BMB produzido a diferentes temperaturas .....	58
Figura 53 - Influência da percentagem de Sasobit no módulo complexo de corte do BMB....	59
Figura 54 - Influência da temperatura de produção no módulo complexo de corte do BMB com Sasobit .....	59
Figura 55 - Influência da percentagem de Leadcap no módulo complexo de corte do BMB ..	60
Figura 56 - Influência da temperatura de produção no módulo complexo do BMB com Leadcap.....	61
Figura 57 - Influência da percentagem de Rediset no módulo complexo de corte do BMB....	61
Figura 58 - Influência da temperatura de produção no módulo complexo de corte do BMB com Rediset .....	62
Figura 59 - Influência da percentagem de Iterlow no módulo complexo de corte do BMB ....	63
Figura 60 - Influência da temperatura de produção no módulo complexo de corte do BMB com Iterlow.....	63
Figura 61 - Influência da percentagem de Sasobit no ângulo de fase do BMB .....	64
Figura 62 - Influência da temperatura no ângulo de fase do BMB aditivado com Sasobit.....	64
Figura 63 - Influência da percentagem de Leadcap no ângulo de fase do BMB.....	65
Figura 64 - Influência da temperatura no ângulo de fase do BMB aditivado com Leadcap ....	65
Figura 65 - Influência da percentagem de Rediset no ângulo de fase do BMB .....	66
Figura 66 - Influência da temperatura na produção de BMB aditivado com Rediset .....	66
Figura 67 - Influência da percentagem de Iterlow no ângulo de fase do BMB.....	67
Figura 68 - Influência da temperatura no ângulo de fase do BMB aditivado com Iterlow .....	68
Figura 69 - Influência da percentagem de Sasobit na viscosidade do BMB .....	68
Figura 70 - Influência da temperatura na produção na viscosidade do BMB aditivado com Sasobit .....	69
Figura 71 - Influência da percentagem de Leadcap na viscosidade do BMB .....	69
Figura 72 - Influência da temperatura de produção na viscosidade do BMB aditivado com Leadcap.....	70
Figura 73 - Influência da percentagem de Rediset na viscosidade do BMB .....	70
Figura 74 - Influência da temperatura na produção do BMB aditivado com Rediset.....	70
Figura 75 - Influência da percentagem de Iterlow na viscosidade do BMB .....	71



Figura 76 - Influência da temperatura na viscosidade do BMB aditivado com Iterlow .....	71
Figura 77 - Evolução do volume de vazios para misturas produzidas com BMB com Sasobit.....	72
Figura 78 - Evolução do volume de vazios para misturas produzidas com Leadcap .....	72
Figura 79 - Evolução do volume de vazios para misturas produzidas com Rediset.....	73
Figura 80 - Evolução do volume de vazios para misturas produzidas com Iterlow .....	73
Figura 81 - Força de Rotura dos provetes condicionados ao ar .....	74
Figura 82 - Força de Rotura dos provetes condicionados em água .....	75
Figura 83 - Comparação da Força de Rotura para os dois tipos de condicionamento .....	75
Figura 84 - Deformação na rotura.....	76
Figura 85 - Comparação da força com a deformação na rotura dos provetes condicionados ao ar.....	76
Figura 86 - Resistência conservada das misturas betuminosas.....	77
Figura 87 - Influência do volume de vazios na sensibilidade à água.....	78

---

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tecnologia de produção das misturas betuminosas temperadas em função da temperatura de produção (adaptado de Ferreira, 2009 e Pereira, 2010).....	6
Tabela 2 - Resumo dos principais aditivos de produção de misturas betuminosas temperadas (adaptado de Ferreira, 2009) .....	7
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do reómetro de pratos paralelos (Arieira et al., 2006).....	26
Tabela 4 - Composição granulométrica das frações de agregados (% passados).....	31
Tabela 5 - Granulometria da mistura MBR-BBA .....	40



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento Temático

Nos últimos anos a caracterização do comportamento mecânico de misturas betuminosas incorporando borracha tornou-se cada vez mais objeto de estudo devido às suas características, principalmente em termos de flexibilidade, o que permite um bom desempenho quando utilizadas na reabilitação de pavimentos. É uma contradição lógica afirmar que por um lado as misturas betuminosas com betume modificado com borracha reciclada de pneus usados apresentem um desempenho superior e que por outro lado, apenas 0,5% do granulado de borracha produzido pelos recicladores em Portugal encontra mercado neste produto (dados relativos a 2011). Pela dinâmica de mercado e para as condições de gestão de fim de vida dos pneus usados em Portugal, a incorporação do granulado de borracha proveniente de pneus usados nas misturas betuminosas tem um papel fundamental para garantir as condições de sustentabilidade da indústria nacional de reciclagem e do próprio sistema de gestão de pneus usados em Portugal (Silva, 2012).

A utilização de borracha de pneus em misturas betuminosas faz-se principalmente através de dois tipos de misturas betuminosas: misturas abertas e misturas rugosas sendo estas granulometrias resultantes da necessidade da mistura betuminosa apresentar espaço para a inclusão da borracha dos pneus (adicionado ao betume) (Neto et al., 2006). No entanto está já disponível no mercado, tecnologia que permite fabricar misturas drenantes com betume de baixo teor em borracha.

O betume modificado com borracha (BMB) apresenta melhores resultados em termos de aumento da resistência à fadiga e a reflexão de fendas das misturas betuminosas. No entanto apresenta alguns inconvenientes, uma vez que as misturas com BMB são tipicamente produzidas a cerca de 170-180 °C, ou seja 20-30 °C mais do que as misturas betuminosas tradicionais. Para além de necessitarem de mais energia na produção, estas misturas emitem mais poluentes e odores.

Neste contexto surge o interesse pela produção de misturas betuminosas produzidas com betume modificado com borracha a temperaturas temperadas. As vantagens ambientais associadas à diminuição da emissão de gases. As vantagens sociais relacionadas com a exposição dos trabalhadores a temperaturas mais baixas e odor menos intenso com as

vantagens económicas de reduzirem o combustível gasto no aquecimento dos agregados nos queimadores fazem com que estas misturas se tornem atrativas para os investidores.

Para que as misturas betuminosas produzidas a temperaturas temperadas sejam aceites no mercado nacional e internacional é necessário comprovar que o seu desempenho mecânico é igual ou superior às misturas betuminosas tradicionais

## **1.2. Objetivos**

Com este trabalho pretende-se verificar se é possível produzir o betume modificado com borracha a temperaturas temperadas com um desempenho semelhante ou superior ao betume modificado com borracha produzido à temperatura convencional. Também se pretende avaliar o efeito da utilização de aditivos para reduzir as temperaturas de produção e compactação das misturas betuminosas com betume modificado com borracha

Para além dos aspetos ligados à produção também se pretende avaliar o efeito dos aditivos na sensibilidade à água das misturas produzidas com Betume Modificado com Borracha a temperaturas temperadas.

## **1.3. Organização da dissertação**

O trabalho desenvolvido encontra-se organizado em cinco capítulos distintos. No capítulo 1 (Introdução) é feito o enquadramento ao tema abordando as potencialidades das misturas betuminosas produzidas com betume modificado com borracha a temperaturas temperadas, são também apresentados os objetivos do trabalho e faz-se uma breve descrição do conteúdo da tese.

No capítulo 2 (Estado da Arte) é efetuada uma descrição das principais vantagens e desvantagens da utilização de betume modificado com borracha. É feita uma revisão bibliográfica das principais técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas e dos principais aditivos redutores de temperatura. São também enumeradas as principais propriedades mecânicas obtidas com a caracterização reológica dos betumes.

O capítulo 3 aborda a metodologia experimental onde são apresentados os materiais utilizados e os ensaios realizados para a caracterização dos betumes e das misturas produzidas.

Para além de explicar o processo de produção dos betumes modificados com borracha produzidos com aditivos redutores de temperatura e o processo de produção das misturas betuminosas com betume modificado com borracha produzidas a temperaturas temperadas.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização do betume modificado com borracha produzido a temperaturas temperadas. Em seguida é feita uma análise da influência da % de aditivo e da temperatura de produção nas características dos betumes aditivados.

Para avaliar o desempenho das misturas betuminosas com betume modificado com borracha produzidas a temperaturas temperadas apresentam-se os resultados do ensaio de compactabilidade e o ensaio de sensibilidade à água.

No último capítulo apresentam-se as principais conclusões deste trabalho, sendo por fim efetuada uma sugestão dos estudos que devem ser realizados para dar seguimento a este tema.



## **2. Estado da Arte**

### **2.1. Misturas Betuminosas com Betume modificado com Borracha**

A utilização de borracha reciclada de pneus em misturas betuminosas remonta aos anos 40 quando nos Estados Unidos se iniciou a comercialização de borracha desvulcanizada a partir da reciclagem de pneus usados. Nos anos seguintes foram realizados estudos laboratoriais para avaliação do efeito da adição da borracha às misturas betuminosas (Caltrans, 2003).

Os betumes com alta percentagem de borracha incluem entre 18 e 22% de granulado de borracha dependendo do tipo de betume utilizado e das características da borracha, bem como do tempo e temperatura de digestão. Os betumes com esta quantidade de borracha apresentam-se com elevada viscosidade a qual pode ser reduzida com o uso de aditivos permitindo obter betumes com viscosidades compatíveis com os equipamentos de produção de misturas betuminosas e também com a capacidade que os betumes têm para se ligarem aos agregados (Pais et al., 2008a).

Os betumes modificados com baixa percentagem de borracha apresentam uma quantidade de borracha inferior a 15% e o processo de modificação do betume ocorre na refinaria. Este tipo de betume tem as mesmas necessidades de armazenagem que um betume modificado com polímeros (Pais et al., 2008a).

A reciclagem de pneus ocorre em centrais que promovem o corte e trituração dos pneus usados convertendo-os em granulado de borracha de dimensões muito pequenas. Esta conversão pode ocorrer com uma das duas possíveis tecnologias básicas de reciclagem: a tecnologia ambiental e a tecnologia criogénica. A tecnologia ambiental consiste na desintegração de pneus à temperatura ambiente enquanto a tecnologia criogénica de reciclagem consiste na trituração de pneus usados, previamente congelados criogenicamente por imersão da borracha em nitrogénio líquido, até se atingir a granulometria desejada (Pais et al., 2008b).

Na tecnologia ambiental resulta um granulado de partículas com superfícies mais rugosas, enquanto que do processo criogénico resultam partículas com superfícies relativamente lisas ou polidas. Esta propriedade das partículas de borracha tem influência na reação entre a borracha e o betume, constatando-se que a reação resulta melhor com partículas mais



regulares devido à quantidade de betume absorvida pela superfície da borracha (Baker et al., 2003).

Em geral o betume modificado com borracha é composto, em peso, por aproximadamente 20% de borracha reciclada de pneus, 78% a 80% de betume e 0% a 2% de óleos aromáticos. A produção do betume modificado com borracha é realizada a temperaturas da ordem dos 180 °C para um tempo de digestão entre 30 a 120 minutos (Minhoto et al., 2002).

A “reação de digestão” consiste numa interação entre o betume e o granulado de borracha, tratando-se de um processo físico de difusão com a consequente dilatação polimérica, ou seja, de um processo de absorção de frações aromáticas do betume por parte das cadeias poliméricas do granulado de borracha até que a concentração destas frações seja uniforme e que seja conseguido o equilíbrio na dilatação das partículas. Este processo é muito influenciado pelo tempo de reação, temperatura de reação e grau de agitação betume-borracha (Amirkhanian e Shen, 2005).

O melhor desempenho de misturas com betume modificado com borracha consegue-se com granulado de borracha obtido pelo processo criogénico. De um modo geral, as misturas densas são mais suscetíveis às mudanças de teor de ligante e de dimensões das partículas de borracha do que as misturas abertas. Comparativamente às misturas betuminosas convencionais a presença da borracha no ligante melhora a suscetibilidade térmica da mistura de modo que, a altas temperaturas se comporta com mais viscosidade e a baixas temperaturas se apresenta mais flexível (Pereira et al., 2007).

As misturas com betume modificado com borracha apresentam capacidade estrutural superior à das misturas convencionais, ao fim do mesmo período de vida, crendo-se que esta reserva estrutural se deve sobretudo à capacidade de retardar a reflexão de fendas e à boa resistência ao fendilhamento por fadiga, atribuída às misturas com betume modificado com borracha (Pais et al., 2008b).

A utilização de betume modificado com borracha nas misturas betuminosas, como qualquer material utilizado na construção, possui vantagens e limitações. Por um lado o betume modificado com borracha apresenta vantagens competitivas relativamente aos betumes convencionais, sob o ponto de vista do desempenho, nomeadamente no aumento da vida em serviço dos pavimentos, diminuição do ruído de circulação do tráfego, custos de manutenção reduzidos. Para além destas vantagens, apresenta também vantagens ecológicas uma vez que

utiliza pneus em fim de vida, os quais tem como destino final a incineração, permite reabilitar pavimentos com espessuras reduzidas traduzindo-se na redução do uso de novos materiais. Como limitações é de referir o facto de que quando armazenado em “condições estáticas” (4 dias a 130°C) as propriedades do betume modificado com borracha alteram-se negativamente, podendo mesmo, nestas condições segregar-se o betume puro e o granulado de borracha. Nestas condições verifica-se um mau desempenho do betume modificado com borracha em termos de deformações permanentes (Pais et al., 2008b).

Tipicamente as temperaturas de produção rondam os 170°C ou seja 25°C mais elevada do que as misturas betuminosas convencionais, o que resulta em maiores emissões de poluentes e odores (Jones et al., 2012).

Outro aspeto negativo relativo à aplicação de misturas com betume modificado com borracha está associado aos períodos de tempo de espera que para a abertura de passagem de veículos após a colocação. Se estes tempos não forem cumpridos, as misturas descontínuas com betume modificado com borracha apresentam a tendência para a formação de rastros, necessitando de maiores períodos de arrefecimento comparativamente às misturas tradicionais. Devido à sensibilidade à temperatura as misturas de betume modificado com borracha necessitam de um cuidado redobrado durante o espalhamento e compactação. Abaixo de determinada temperatura, função do tipo de betume utilizado e da quantidade de borracha, a mistura torna-se difícil de compactar originando porosidades elevadas que no caso das misturas abertas favorecem a sua desagregação superficial (Minhoto et al., 2005).

Os critérios para estabelecer a percentagem de borracha adequada e o tempo e a temperatura de digestão são baseados geralmente em ensaios físicos realizados ao betume modificado com borracha, isto é: penetração, ponto amolecimento, resiliência e, a mais importante, viscosidade. A adição da borracha ao betume puro aumenta significativamente a viscosidade devido ao gel e ao inchamento das partículas de borracha (Pais e Pereira, 2007).

## **2.2. Misturas Betuminosas produzidas a temperaturas temperadas**

Com o objetivo de desenvolver misturas betuminosas que reduzam a utilização de recursos naturais e o consumo energético no processo de produção, as misturas betuminosas temperadas apresentam-se como uma solução bastante atrativa.

A redução da temperatura traduz-se em inúmeras vantagens: diminuição do consumo energético e, por consequência, do custo de produção; diminuição da emissão de gases

nocivos ao ambiente (Figura 1); redução da exposição dos trabalhadores aos gases; melhoria das condições e das técnicas de aplicação (Pereira, 2010).

As misturas betuminosas temperadas tendem a apresentar uma melhoria na compactação, o que se traduz na redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante devido ao envelhecimento, melhorando o desempenho a nível da resistência ao fendilhamento e da sensibilidade à água (Kristjansdottir, 2006).



Figura 1 - Diferença nas emissões de fumos e gases observados na central durante a descarga de uma mistura betuminosa a quente e de uma mistura temperada (Ferreira et al., 2009).

Durante a fase de produção, as misturas betuminosas temperadas apresentam uma diminuição dos gases emitidos para o ambiente e do combustível gasto. Na fase de compactação garantem uma boa trabalhabilidade a temperaturas reduzidas assim como a diminuição dos gases emitidos.

As misturas betuminosas podem ser classificadas de diversas formas, sendo uma delas a divisão segundo a temperatura de produção. A Figura 2 mostra a classificação utilizada para as misturas betuminosas em função da redução da temperatura de produção em central.

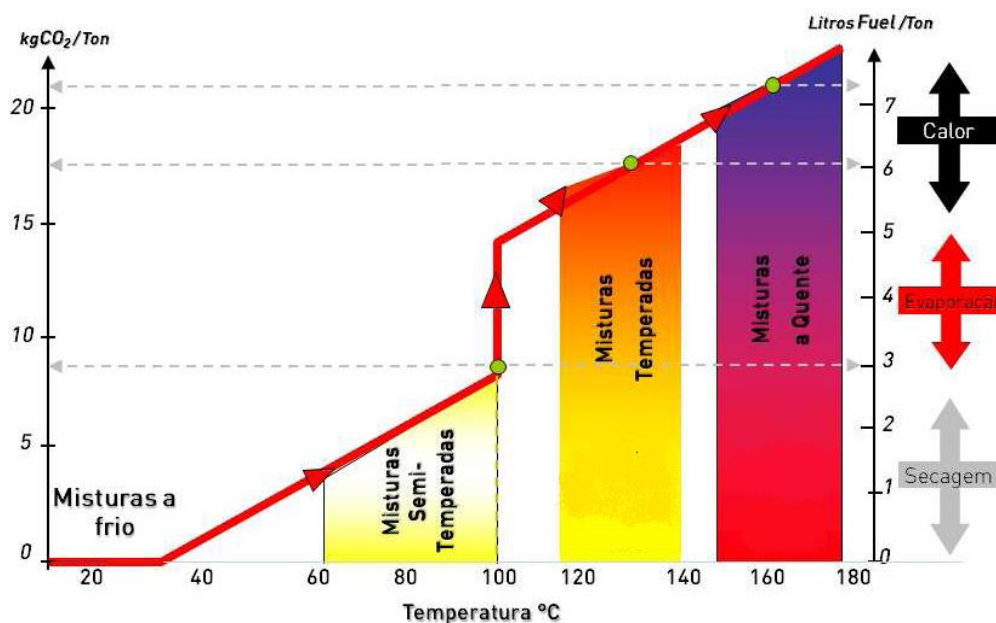


Figura 2 - Classificação da produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção (adaptado de FHWA, 2008 e Ferreira, 2009)

As misturas a frio são produzidas sem aquecimento dos agregados e com emulsões de betume ou betume espuma.

As misturas betuminosas semi-temperadas são produzidas abaixo da linha de evaporação da água (100 °C), com os agregados aquecidos a uma temperatura de mistura entre os 70 e os 100 °C, aproximadamente.

As misturas betuminosas temperadas têm segundo esta classificação uma temperatura de produção a rondar os 120 e o 140 °C. Por fim, as tradicionais misturas betuminosas a quente são produzidas a temperaturas mais elevadas que são usualmente entre os 150 e os 180 °C, dependendo do betume utilizado na mistura. Para este intervalo de temperaturas são garantidos: a secagem dos agregados; o adequado envolvimento dos agregados pelo ligante; e a trabalhabilidade adequada, para a mistura e compactação das mesmas.

A utilização de aditivos e a aplicação de novos métodos de fabrico tem vindo a demonstrar ser possível uma redução de até 40% da temperatura de produção, aplicação e compactação das misturas betuminosas, em comparação com as misturas betuminosas a quente (Ferreira et al., 2009).

Há muitos produtos e processos diferentes de produção de misturas betuminosas temperadas que podem ser utilizados para conseguir a redução da temperatura, mas, geralmente, as técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas podem ser separadas em quatro grupos (Anderson et al., 2008):

- Utilização de aditivos orgânicos
- Utilização de aditivos químicos
- Utilização de espuma com injeção de água
- Utilização de espuma com minerais sintéticos ou naturais

De acordo com esta classificação serão elencadas as principais tecnologias de fabrico de misturas betuminosas temperadas, descrevendo-se dentro de cada grupo, aquelas que tem sido mais utilizadas.

As tecnologias de fabrico de misturas betuminosas temperadas também podem ser agrupadas de acordo com a temperatura de produção de acordo como se pode ver na Tabela 1.

Tabela 1 - Tecnologia de produção das misturas betuminosas temperadas em função da temperatura de produção (adaptado de Ferreira, 2009 e Pereira, 2010)

Gama de temperaturas °C	Tecnologia
100 a 120	Espuma de betume com injeção de água Aditivo químico Evotherm™
120 a 140	Aditivos químicos e orgânicos Espuma de betume com minerais sintéticos e naturais
150 a 180	Misturas betuminosas a quente

A Tabela 2 apresenta as principais informações relativas aos aditivos que podem ser utilizados na produção de misturas betuminosas temperadas.

Tabela 2 - Resumo dos principais aditivos de produção de misturas betuminosas temperadas (adaptado de Ferreira, 2009)

Tecnologia	Empresa proprietária da patente	Temperaturas de produção (intervalo de redução de temperaturas) °C
<b>Aditivos orgânicos</b>		
Sasobit®	<i>Sasol Wax</i> (África do Sul)	130-170 (20-30)
Asphaltan B	<i>Romonta GmbH</i> (Alemanha)	130-170 (20-30)
Licomont Bs 100	<i>Clariant</i> (Suíça)	130-170 (20-30)
CCBit113 AD	<i>Dr. Hutschenreuther</i> (Alemanha)	130-170 (35)
Leadcap	(Coreia do Sul)	130-140 (20-30)
<b>Aditivos químicos</b>		
Cecabase® RT	<i>Ceca</i> (França)	120-140 (30)
Rediset™	<i>Akzo Nobel</i> (Holanda)	(30)
Iterlow T	<i>Iterchimica</i> (Itália)	120-140
Evotherm™	<i>MeadWestvaco</i> (EUA)	85-115
Revix ou Evotherm 3G	<i>MeadWestvaco</i> (EUA)	130-140 (30-40)
<b>Espuma de betume por injeção de água</b>		
Double-Barrel® Green	<i>Astec Industrines</i> (EUA)	116-135
Wam-foam®	<i>Shell</i> (Inglaterra) e <i>Kolo-Veidekke</i> (Noruega)	100-120
LEA® - Low Energy Asphalt	<i>Fairco e a Eiffage Travaux Publics</i> (França)	<100
LEAB®	<i>Royal Bam Group</i> (Holanda)	95
Ultrafoam GX™	<i>Gencor</i> (EUA)	110-115
LT-Asfalt®	<i>Nynas</i> (Holanda)	90
Terex® WMA foam	<i>Terex</i> (EUA)	90-130
Aquablack®	<i>Maxam™</i> (EUA)	100-120
<b>Espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais</b>		
Zeólitos naturais	Várias	
Advera®	<i>PQ Corporation</i> (EUA)	120
Aspha-min®	<i>Eurovia GmbH</i> (Alemanha)	(20-30)

### 2.2.1. Aditivos orgânicos

#### Sasobit®

Sasobit® é um aditivo da classe dos aditivos orgânicos que é produzido na África do Sul pela Sasol Wax e, de acordo com FHWA (2008) é o mais utilizado no mundo. Chowdry and Button (2008) descreveram o Sasobit® como sendo uma cera sintética Fischer-Tropsch (F-T) produzida pelo aquecimento de carvão ou gás natural com vapor de água, na presença de um catalisador (Sasol, 2008). É completamente solúvel no betume a temperaturas superiores a 130 °C. Sob agitação, o Sasobit® forma uma solução homogênea com o betume e produz uma acentuada redução na viscosidade, permitindo que as temperaturas de produção possam ser reduzidas entre 20 e 30 °C. Durante o arrefecimento, o Sasobit® cristaliza e forma uma estrutura de rede com partículas alongadas, microscópicas e distribuídas regularmente no betume aumentando a estabilidade (Walker, 2009). Este aditivo pode ser fornecido comercialmente de diversas formas, tal como se apresenta na Figura 3.



Figura 3 - Duas formas de apresentação do aditivo Sasobit® (adaptado de Hurley and Prowell, 2008 e Ferreira, 2009)

As taxas de incorporação típicas variam entre 0,8 a 4% sobre o peso do ligante, não devendo exceder estes valores devido aos efeitos sobre a rigidez do ligante a baixas temperaturas (Ferreira, 2009).

#### Asphaltan B

O Asphaltan B é um produto fabricado pela empresa Romonta GmbH que se localiza em Amsdorf na Alemanha. Caracteriza-se por ser uma mistura de substâncias originada nos constituintes da cera de Montana, com um elevado peso molecular de hidrocarbonetos, tendo sido especificamente criada para a mistura *hot rolled asphalt* (Corrigan, 2008).

De acordo com Chowdry and Button (2008), o crude de onde se extrai a cera de Montana pode-se encontrar na Alemanha, no leste da Europa e em algumas áreas dos EUA, em certos tipos de depósitos de carvão de lenhite formados ao longo de milhares de anos pela

transformação da vegetação fossilizada. Aparentemente, a cera que outrora protegeu as raízes das plantas das adversidades climatológicas não se decompôs devido à sua elevada estabilidade e insolubilidade em água, enriquecendo o carvão e sobrevivido ao longo dos anos.

Ainda de acordo com os mesmos autores, *Remonta GmbH* recomenda a adição de cerca de 2 a 4% de Asphaltan B<sup>®</sup> ao betume, em peso. A sua adição pode ser realizada no misturador da central ou no ligante.

O ponto de amolecimento do Asphaltan B<sup>®</sup> é aproximadamente 100 °C (semelhante ao das ceras Fischer-Tropsch), melhorando as características do ligante a temperaturas mais baixas, melhorando a compactabilidade e a resistência às deformações permanentes.

### **2.2.2. Aditivos químicos**

O processo de produção de misturas betuminosas temperadas com recurso a aditivos químicos, surfactantes (nome que resulta da terminologia inglesa *surface active agent*) ou tensioativos, não assenta na redução da viscosidade do ligante, mas sim numa diferente variedade de mecanismos que visam a melhoria do recobrimento do agregado pelo ligante, mesmo a baixas temperaturas (Hurley and Prowell, 2006).

#### **Evotherm™**

O Evotherm™ é produzido e foi desenvolvido nos EUA pela *MeadWestvaco Asphalt Innovations* que fica localizada em Charleston na Carolina do Sul. O Evotherm<sup>®</sup> usa uma tecnologia não patenteada, baseada na utilização de um composto químico que inclui agentes emulsionantes, aditivos promotores do recobrimento dos agregados, da trabalhabilidade, da compactação, bem como do aumento da afinidade betume-agregado. A MeadWestvaco prevê o desenvolvimento de uma emulsão à medida e para as necessidades de cada tipo de agregado (Ferreira, 2009).

De acordo com Hurley and Prowell (2005a), o Evotherm é uma emulsão betuminosa com uma percentagem de betume residual da ordem dos 70%, o que aumenta a afinidade do betume ao agregado.

Chowdhury and Button (2008) referem a facilidade de não serem necessárias alterações nas centrais de misturas betuminosas para a utilização deste aditivo. Ainda de acordo com os mesmos autores, ao contrário do que acontece com os ligantes tradicionais, o Evotherm<sup>®</sup> pode



ser armazenado em central num tanque próprio para emulsões a cerca de 70 °C, sendo que a temperatura do óleo de aquecimento deve ser cerca de 93 °C antes da bombagem do Evotherm<sup>®</sup> para prevenir que haja quebras nas linhas.

Durante a produção, a emulsão é simplesmente usada em vez do betume, misturada com os agregados, havendo a libertação da água da emulsão sob a forma de vapor. A mistura produzida assemelha-se a uma mistura betuminosa a quente, e conseguem-se reduções da temperatura de fabrico até cerca de 65 °C (Hurley and Prowell, 2006).

Ao fazer com que as temperaturas de produção sejam substancialmente mais baixas proporciona inúmeras vantagens, tais como:

- Redução de 60% das emissões de gases efeito estufa (GEE);
- Até 75% de redução de emissões de poluição fotoquímica;
- Diminuição de aproximadamente 80 % do Dióxido de Enxofre;
- Economizar cerca de 55% da energia gasta durante a produção e aplicação da Mistura Betuminosa Temperada;
- Melhoria da segurança dos trabalhadores devido ao manuseio de materiais a temperaturas mais baixas;
- Permite que as estradas sejam reabertas ao tráfego mais rapidamente devido a colocação e compactação da mistura ser a temperaturas mais baixas;
- Desempenho e durabilidade maior ou igual ao de uma mistura betuminosa a quente.

A utilização de Evotherm<sup>TM</sup> pode aumentar a vida útil do pavimento, a distância de percurso e a época de pavimentação. O seu desempenho foi comprovado em mais de 300 projetos e em mais de 25 países, como por exemplo: França, Espanha, Canadá, México, África do Sul e China (Walker, 2009).

### **Rediset<sup>TM</sup>**

Rediset<sup>TM</sup> é um aditivo químico produzido pela Akzo Nobel destinado a reduzir as temperaturas de mistura e pavimentação e proporciona propriedades melhoradas de resistência à humidade. A utilização de Rediset<sup>TM</sup> permite a produção de misturas a uma temperatura de 33°C inferior quando comparado com as misturas betuminosas a quente. Isso

pode reduzir o consumo de combustível em pelo menos 20 % e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> (Walker, 2009).

Rediset™ vem em forma de pastilhas (Figura 4) e as taxas típicas de incorporação deste aditivo são da ordem dos 1,5 a 2% do peso do ligante (Walker, 2009).



Figura 4 - Pastilhas de Rediset® (Ferreira, 2009)

A utilização do Rediset® não requer qualquer modificação no processo de formulação da mistura, com exceção da temperatura de fabrico e compactação. Este aditivo melhora as propriedades da afinidade do betume ao agregado, sendo que desta forma se poderá evitar a utilização de outro aditivo para melhorar esta propriedade, caso este fosse necessário (Chowdhury and Button, 2008).

A sua introdução na central de produção de misturas betuminosas pode ser feita diretamente no tanque do ligante, ou na mistura imediatamente após a introdução do ligante. No entanto, ao ser introduzido na mistura, é necessário alterar o sistema de introdução do ligante, dando-lhe a possibilidade de ao mesmo tempo poder introduzir o aditivo.

### **Revix**

O Revix™ é um produto desenvolvido pela Mathy Technology and Engineering Services, Inc. and Paragon Technical Services, no entanto encontra-se licenciado e comercializado pela MeadWestvaco sob o nome Evotherm™ 3G.

Este aditivo não necessita do recurso a princípios de produção de espuma ou à redução da viscosidade para a produção de misturas betuminosas a temperatura inferiores às convencionais. Utiliza uma tecnologia que combina agentes tensioativos, ceras, polímeros, ácidos e outros materiais, de forma a verificar-se a redução do atrito interno entre os agregados e o betume, durante a fase de mistura e compactação (Baumgardner 2008).

### **Cecabase<sup>®</sup> RT**

O Cecabase<sup>®</sup> é um produto na forma de gel. Quando misturado com o betume permite uma redução da temperatura de mistura e de compactação em cerca de 50°C devido aos agentes tensioativos.

A sua aplicação possibilita uma redução do consumo energético entre 20-50%, dependendo do processo, e uma redução da emissão de gases. A incorporação deste aditivo, em quantidades entre 0,2 e 0,4% da massa do betume, permite a redução da temperatura de aplicação para cerca de 120°C e, ao mesmo tempo, a manutenção das propriedades de uma mistura convencional produzida a 160-180°C (CECA 2013).

### **Iterlow T**

O Iterlow<sup>®</sup> T é um aditivo no estado líquido que quando adicionado ao betume permite produzir misturas betuminosas a baixas temperaturas. O produtor recomenda uma quantidade de 0,3 a 1,0% de aditivo de modo a obter uma temperatura entre 90 e 120°C durante a produção da mistura betuminosa.

O aditivo apenas funciona como um agente tensioativo, não modificando as propriedades químicas ou físicas do betume (temperatura de amolecimento, penetração e viscosidade) e é estável durante a fase de armazenamento (Iterchimica 2013).

### **2.2.3. Espuma com injeção de água**

#### **WAM-foam<sup>®</sup>**

O processo WAM-Foam<sup>®</sup> (Warm Asphalt Mix Foam) de produção de misturas betuminosas temperadas resultou de uma parceria entre a Shell International Petroleum Company Ltd., Reino Unido, e a empresa norueguesa Kolo-Veidekke (Shell Bitumes, 2006).

O processo WAM-Foam<sup>®</sup> usa um sistema de adição de dois tipos de ligante em dois estágios distintos da fase de mistura, durante a produção, sendo um dos ligantes mole e o outro duro previamente espumado (Figura 5). Trata-se de um processo e não de uma adição de um novo tipo de material (FHWA, 2008).

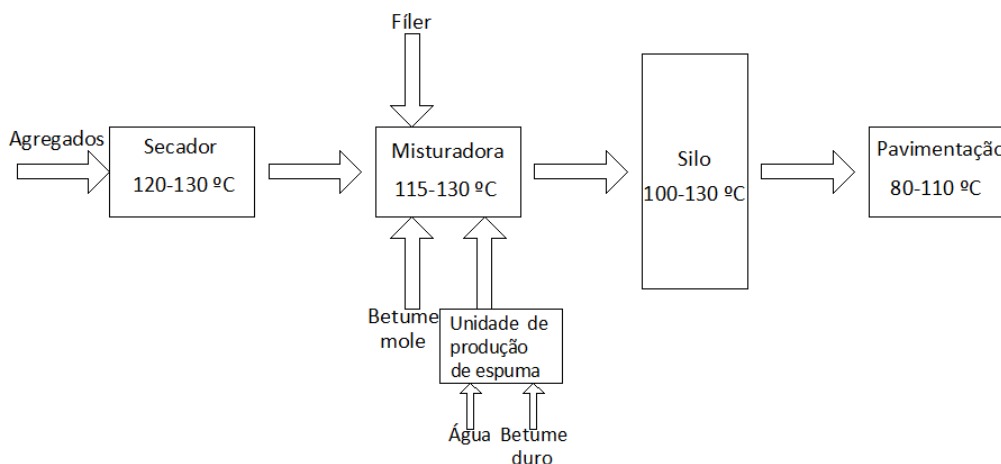


Figura 5 - Processo de produção de WAM-Foam® (adaptado de Ferreira, 2009 e Pereira, 2010)

A seleção destes dois ligantes é feita para que a mistura resultante tenha a gama de penetração pretendida para o ligante. O betume mole (sendo 20 a 30% do betume total) é misturado com os agregados num primeiro estágio, a temperaturas entre os 100 e os 120 °C, envolvendo completamente os agregados. No segundo estágio de produção, o ligante duro espumado é injetado na mistura anterior. Esta combinação atua diminuindo a viscosidade da mistura, dotando-a da necessária trabalhabilidade e permitindo a sua colocação e compactação a temperaturas entre os 120 e os 130 °C (Chowdhury and Button, 2008), conforme se pode observar resumidamente na Figura 5.

Em centrais descontínuas, conforme referido por Kristjansdottir (2007), 1 a 5% de água é injetada numa câmara de expansão, juntamente com o betume duro de acordo com o diagrama da Figura 6), induzindo a formação de espuma para promover o envolvimento mais fácil dos agregados.

Numa central contínua, a espuma de betume pode ser ininterruptamente produzida, o que evita a necessária limpeza com ar comprimido entre cada amassadura, imprescindível de executar nas centrais descontínuas.

A Shell refere que o sucesso das Misturas Betuminosas Temperadas produzidas com recurso à tecnologia de WAM® Foam depende da seleção criteriosa do betume duro e mole, recomendando também, por vezes, a introdução no primeiro estágio de mistura de um promotor da afinidade betume-agregado.



Figura 6 - Unidade de produção de espuma (adaptado de EAPA, 2007 e Ferreira, 2009)

Uma questão fundamental ainda neste estágio é evitar que a água atinja a interface da mistura ligante/agregado entrando no agregado. A Shell reportou poupanças de 30% de combustível, o que leva a reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> de também 30%. Ensaio independentes confirmam esta afirmação (Larsen et al., 2004).

### Double-Barrel<sup>®</sup> Green

A empresa Astec Industries desenvolveu, o sistema Double Barrel<sup>®</sup> com opção Green em Junho de 2007, o sistema consiste na utilização de um dispositivo acoplado ao sistema Double Barrel<sup>®</sup>, tambor secador e misturador patenteado também por esta empresa, e que permite a produção de misturas betuminosas temperadas que, conforme referido por Fitts (2008), permitem reduções da temperatura de produção de 10 a 30 °C. Trata-se de um processo onde uma pequena quantidade de água é adicionada à mistura usando um dispositivo capaz de microscopicamente espumar o betume (Figura 7).



Figura 7 - Double Barrel com opção Green e unidade de produção de espuma (adaptado de ASTEC, 2009 e Ferreira, 2009)

Este acessório é constituído basicamente por um sistema de válvulas, câmara de expansão e bicos de injeção para produção da espuma de betume, sendo estes monitorizados por um computador visando a adequação da taxa de espuma. Todo este sistema é rodeado de uma cisterna de aquecimento e circulação de óleo térmico. A injeção de água através dos bicos cria um vapor que rodeia o ligante resultando na formação de espuma e num enorme aumento do volume do betume. Esta tecnologia permite uma redução superior a 10 °C (temperatura de fabrico de 121 a 135 °C) na temperatura da mistura e compactação da Mistura Betuminosa Temperada (Chowdhury and Button, 2008). O duplo tambor é utilizado para a produção de misturas recicladas.

Habitualmente não necessitará de alterações na formulação da mistura, mas existem autores (Hurley and Prowell, 2008) que sugerem o uso de um dispositivo de produção de espuma em laboratório, e que sejam simuladas numa validação em laboratório as condições da central.

Segundo Walker, 2009 os benefícios da utilização do sistema Double-Barrel<sup>®</sup> Green são:

- Ausência de fumo e cheiro, porque os óleos leves no betume nunca atingem o ponto de ebulição
- Capacidade de executar altas percentagens de mistura betuminosa reciclada
- Poupança de cerca de 14% no combustível o que corresponde a um aumento de 14% na produção

### **LEA<sup>®</sup> - Low Energy Asphalt**

A tecnologia LEA foi desenvolvida pela Fairco e pela Eiffage em França, que detinham já duas patentes nesta área (a Eiffage, desenvolveu os Enrobes à Baisse Temperature – EBT<sup>®</sup>, e a Fairco criou os Enrobes à Baisse Energie – EBE<sup>®</sup>). Estas duas empresas criaram um grupo para a promoção das LEA na Europa, EUA e noutros países, a LEA-CO. A fim de se adaptarem aos tipos de centrais dos fabricantes de misturas betuminosas, podem ser fabricadas LEAs de acordo com 3 metodologias distintas (LEA 1, 2 e 3). Esta tecnologia foi largamente premiada a nível internacional, incluindo com o Prémio Mundial da AIPCR no ano de 2007 (Ferreira, 2009).

O processo de produção das LEA é bastante distinto das MBQ, consistindo na secagem parcial do esqueleto granular do agregado e na capacidade do betume formar espuma em contacto com a água, auto-expandindo e melhorando o revestimento dos agregados. A

temperatura da mistura resultante é de cerca de 95 °C. O conteúdo de água reduz a viscosidade da mistura, atribuindo-lhe uma boa trabalhabilidade, mesmo a essas temperaturas.

Salienta-se que o betume utilizado no fabrico destas misturas é aditivado por agentes que auxiliem a formação de espuma, a afinidade betume-agregado e a trabalhabilidade (Olard and Noan, 2008).

A facilidade de adaptação desta tecnologia à quase totalidade das centrais de fabrico de misturas betuminosas reside na possibilidade da introdução sequenciada dos materiais segundo os três métodos citados anteriormente – LEA 1, 2 e 3. Estes métodos estão esquematizados na Figura 8.

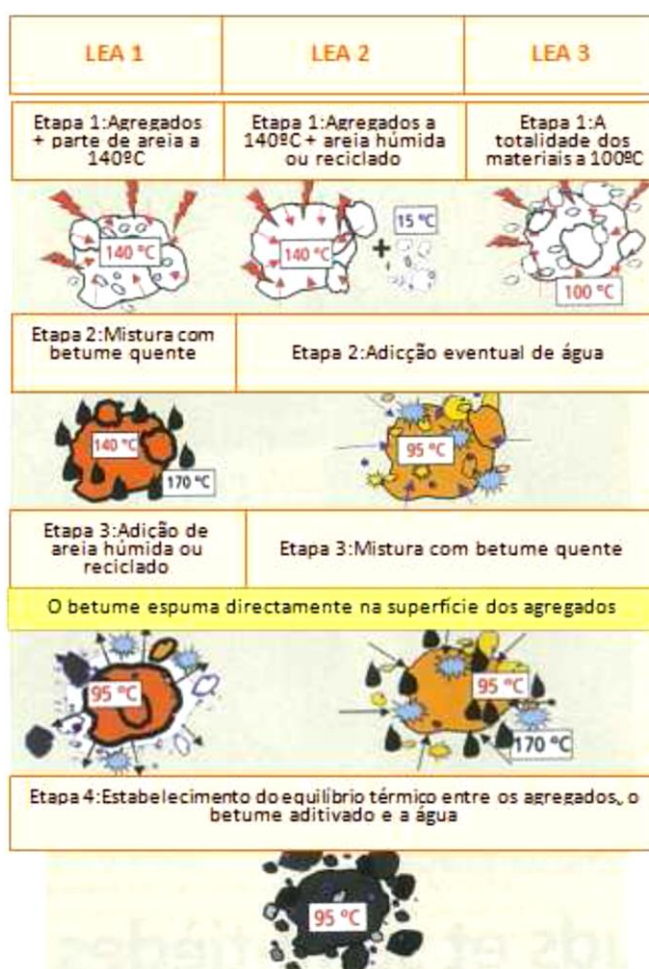


Figura 8 - Processos de produção das LEA (adaptado de FHWA, 2008 e Ferreira, 2009)

Este tipo de processo de secagem parcial reduz consideravelmente a quantidade de energia necessária para remover a água (que consome muita energia).

A Figura 9 ilustra a vista geral de uma central de misturas betuminosas descontínua, exemplificando o método LEA 2, com introdução da areia diretamente no misturador, explicando esta tecnologia.

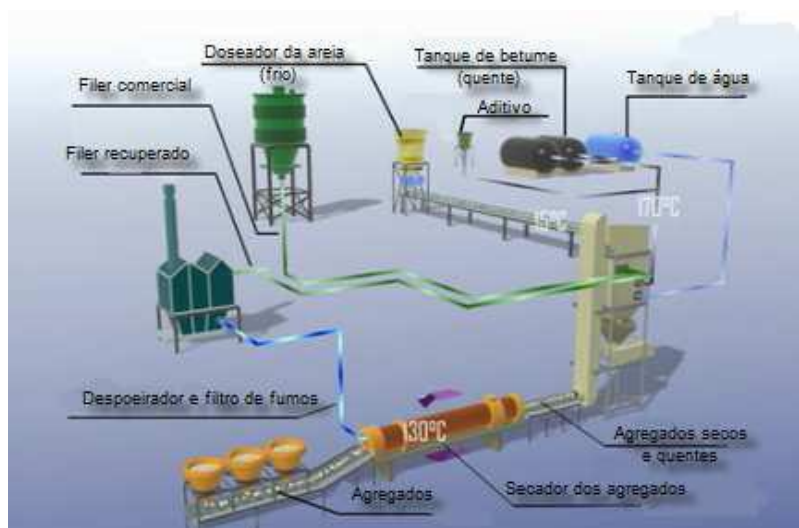


Figura 9 - Vista geral de uma central de misturas betuminosas descontínua, com introdução da areia a frio diretamente no misturador (adaptado de Ferreira, 2009)

A temperatura onde resulta o equilíbrio da mistura é ligeiramente inferior a 100 °C. De salientar que após todo o processo fica alguma água proveniente da recondensação, que auxilia a manutenção da trabalhabilidade da mistura mesmo a temperaturas inferiores à descrita anteriormente.

### **LEAB<sup>®</sup>**

O grupo Holandês da Royal BAM desenvolveu o processo da LEAB<sup>®</sup>, que permite a produção de misturas betuminosas a temperaturas inferiores ao ponto de evaporação da água (100 °C), incidindo no fabrico de misturas no intervalo de temperaturas das misturas semi-temperadas.

Este processo surgiu do trabalho de Jenkins (2000). No processo LEAB<sup>®</sup> não é acrescentada água extra na produção das misturas. A espuma é produzida em 6 nódulos (Figura 10) e injetada diretamente nos agregados. Na produção da espuma é utilizado um aditivo à base de aminas (0,1% em relação ao betume) que aumenta a adesividade entre o betume e os agregados, assim como a estabilidade de armazenamento.

Utilizando este método pode obter-se uma redução do consumo energético de cerca 40% utilizando agregados virgens e de 30% para misturas com 50% de material reciclado (D'Angelo et al., 2008).





Figura 10 - Injeção do betume-espuma numa central betuminosa (adaptado de D'Angelo et al., 2008 e Pereira, 2010)

### Ultrafoam GX™

A metodologia desenvolvida e patenteada pela Gencor Industries consiste numa tecnologia onde se procede à instalação de um dispositivo capaz de criar, através da introdução de betume e vapor de água a taxas de fluxo, pressões e temperaturas distintas, espuma de betume. Este mecanismo (Figura 11) pode ser acoplado à linha de betume previamente existente na central.



Figura 11 - Dispositivo para execução da espuma de betume da Gencor (adaptado de Gencor, 2009<sup>1</sup>)

Desta forma, é possível manter o rácio pretendido entre o ligante e a água para qualquer produção da central, criando uma espuma de betume estável e consistente (Ferreira, 2009).

<sup>1</sup> Citado em Ferreira, 2009

#### **2.2.4. Espuma com minerais sintéticos ou naturais**

A tecnologia de produção de MBT com recurso a minerais sintéticos ou naturais tem como base a utilização de zeólitos.

De acordo com Virta (2008), existem mais de 40 tipos de zeólitos naturais identificados nos últimos 200 anos, distinguidos pelas diferenças na sua composição química e pelo tamanho e arranjo da sua estrutura cristalina.

Os minerais em questão contêm cerca de 20% de água da sua cristalização, que é libertada quando são submetidos a aquecimento acima do ponto de ebulição da água. Na produção das misturas betuminosas temperadas, e quando em contacto com o ligante, criam um efeito controlado de espuma, o que origina um ligeiro incremento do volume do ligante, reduzindo a sua viscosidade (Prowell and Hurley, 2008).

As principais diferenças entre os zeólitos naturais e sintéticos, para além do processo químico que envolve a produção de zeólitos sintéticos, é o rácio sílica/alumínio, que nas naturais é de 5:1, sendo nas sintéticas de 1:1.

De acordo com dados existentes, a utilização da tecnologia de produção de misturas betuminosas temperadas com zeólitos permite uma melhoria do tempo de trabalhabilidade das misturas de cerca de 6 a 7 horas ou até a temperatura das misturas descer até cerca de 100 °C (Prowell and Hurley, 2008).

#### **Zeólitos sintéticos (Aspha-min<sup>®</sup> e Advera<sup>®</sup>)**

O processo de produção de misturas betuminosas temperadas com as duas tecnologias acima descritas é semelhante. Como descrito por Hurley and Prowell (2005b), o calor liberta a água contida no zeólito, que atua como um sistema de introdução de um novo fluido.

Tipicamente, e no que diz respeito à formulação das misturas betuminosas com estes dois tipos de produtos, não é necessário alterar a metodologia utilizada, adicionando a quantidade recomendada pelo fornecedor, ao mesmo tempo que o ligante, na altura da validação em laboratório. Estes zeólitos podem ser encontrados em pó, ou em pequenos cristais (Hurley and Prowell, 2008), tal como se pode observar na Figura 12.

Ainda de acordo com a mesma fonte, os zeólitos sintéticos têm a sua granulometria entre o peneiro nº 50 e nº 200, e podem ser adicionadas na central por diferentes métodos:

- Numa central descontínua, os sacos podem ser introduzidos diretamente no misturador, ou automaticamente usando uma célula de pesagem;
- Nas centrais contínuas podem ser introduzidos através do anel de reciclagem, mas só para o caso do Aspha-min<sup>®</sup>, onde pode ser utilizado também um sistema de válvulas pneumáticas semelhante ao apresentado na Figura 13.

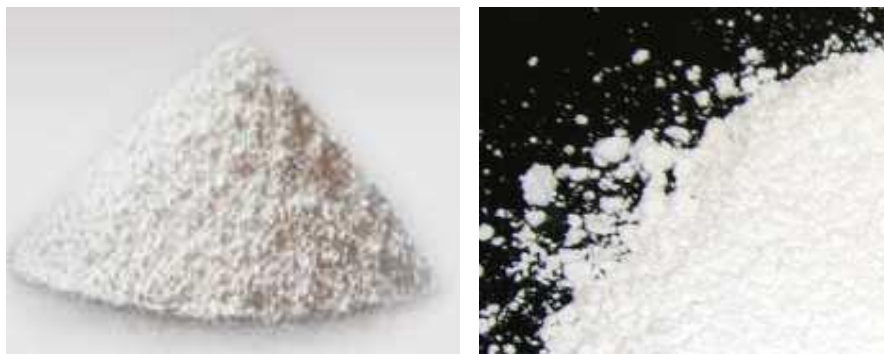


Figura 12 - Zeólitos sintéticos Aspha-min<sup>®</sup> (esquerda) e Advera<sup>®</sup> (direita) (Ferreira, 2009)



Figura 13 - Sistema automático de introdução do Aspha-Min<sup>®</sup> (Ferreira, 2009)

No caso do Advera<sup>®</sup> deve ser utilizado um sistema de introdução similar ao utilizado para introdução de fibras, colocado perto do local de introdução do ligante, sendo que a adição dos zeólitos deve ser feito com um sistema semelhante ao da Figura 14, de forma a melhorar a dispersão deste produto.

Assim, o zeólito deve ser adicionado a uma temperatura de cerca de 130 °C, temperatura aproximada a que deve ser produzida a mistura, formando-se, conforme referido anteriormente, a espuma de betume pelo aumento de volume provocado no ligante pela água agregada em forma de vapor.

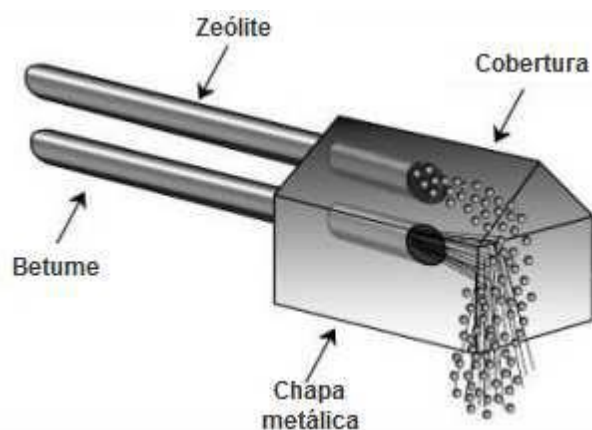


Figura 14 - Misturadora para adição de zeólitos (adaptado de EAPA, 2007<sup>2</sup>)

### 2.3. Misturas betuminosas com betume modificado com borracha produzidas a temperaturas temperadas

As misturas betuminosas com betume modificado com borracha são frequentemente descritas como misturas betuminosas de alto desempenho, devido à sua maior resistência à deformação permanente e ao fendilhamento por fadiga quando comparadas com as misturas betuminosas convencionais, sendo também amigas do ambiente porque incorporam borracha reciclada de pneus usados.

No entanto as misturas betuminosas com borracha apresentam alguns problemas. Em primeiro lugar, estas misturas são tipicamente produzidas a temperatura mais elevada do que as misturas betuminosas tradicionais. Isto requer mais energia para produzir e resulta em maiores emissões e odores.

Em segundo lugar, as misturas betuminosas com betume modificado com borracha têm de ser colocadas a temperaturas mais elevadas do que as misturas betuminosas convencionais, levando a problemas de saúde e segurança para os trabalhadores e resultando em excesso de fumo e odores, um problema para os utentes da estrada e para as pessoas que habitam perto da estrada. Em terceiro lugar, as misturas betuminosas com betume modificado com borracha não podem ser utilizadas em áreas que requerem distâncias de transporte muito longas por causa da perda de calor durante o transporte e, por fim, não pode ser utilizado no início e no fim da época de pavimentação, devido às temperaturas mais baixas, especialmente durante o trabalho noturno (Jones et al., 2012).

<sup>2</sup> Citado em Ferreira, 2009

Na verdade, a fim de reduzir a temperatura de produção e, conseqüentemente, o consumo de energia no fabrico de misturas betuminosas, surge um novo conceito que tem vindo a ser desenvolvido e tem sido testado e implementado nos últimos anos. O conceito é a produção de misturas betuminosas a temperaturas temperadas (Rubio et al., 2012), que tem a intenção de reduzir a temperatura de produção das misturas betuminosas, mas mantendo as propriedades mecânicas e reológicas das misturas betuminosas temperadas tão perto quanto possível das misturas convencionais (Zhao et al., 2012; Silva et al., 2010a) de modo a aumentar a sua viabilidade.

De acordo com Sebaaly et al., (2012) que utilizou os aditivos Advera<sup>®</sup> e Sasobit<sup>®</sup> em betumes convencionais e modificados com borracha, o princípio básico das tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas é diminuir as temperaturas de produção e compactação das misturas betuminosas através da redução da relação viscosidade-temperatura do ligante betuminoso. Isto para os aditivos orgânicos uma vez que alteram as características do betume.

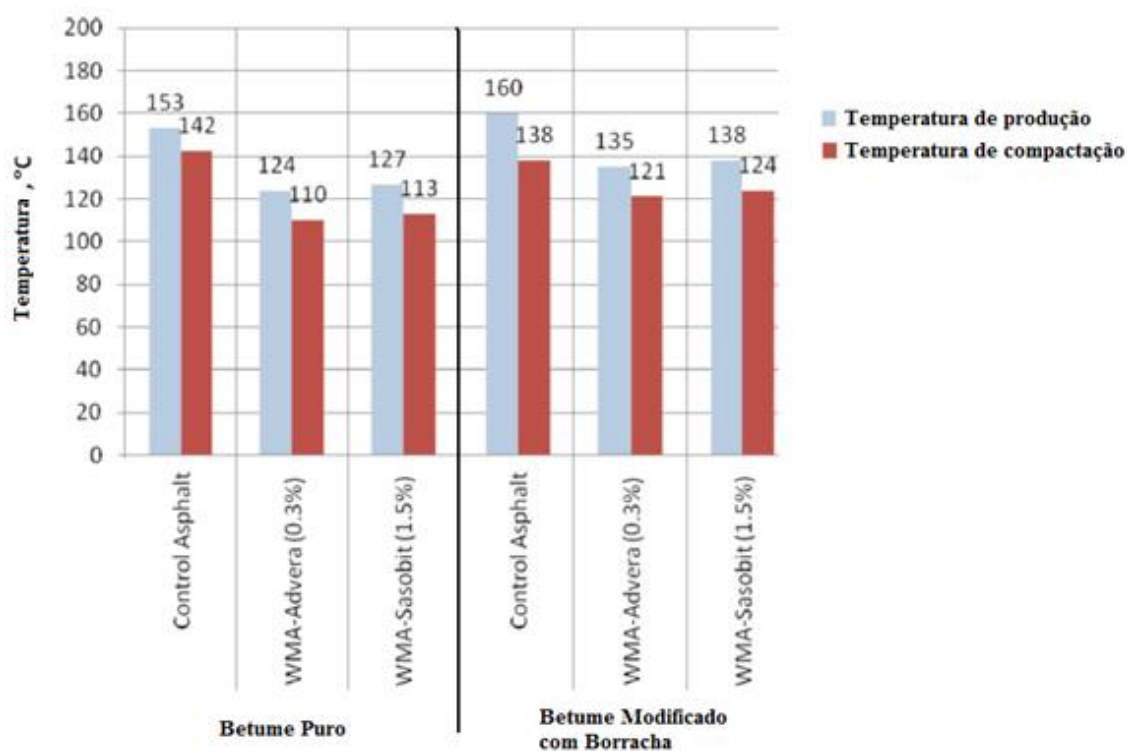


Figura 15 - Temperaturas de produção e compactação para diferentes misturas (adaptado de Sebaaly et al., 2012)

Diversos estudos já realizados com betume modificado com borracha e com betume puro, com e sem aditivo, de forma a avaliar e comparar o desempenho das misturas. O estudo realizado por Oliveira et al., (2012) permitiu concluir que:

- A resistência das misturas betuminosas temperadas foi ligeiramente superior ao das misturas betuminosas tradicionais. Isto pode ser associado com a melhor trabalhabilidade das misturas betuminosas temperadas, o que permite melhorar o desempenho das misturas;
- Com umas taxas de incorporação reduzidas, entre 0,3% e 0,5% conseguem-se resultados bastantes bons ao ponto de se conseguir uma redução de cerca de 30°C nas misturas betuminosas temperadas em comparação com as misturas betuminosas tradicionais, sem comprometer o seu desempenho, e isto pode ser visto como um grande passo no sentido da produção de misturas betuminosas com borracha mais limpas.
- Duas das principais propriedades utilizadas para o dimensionamento de pavimentos são o seu módulo de rigidez e a resistência ao fendilhamento por fadiga. Os resultados obtidos mostram que o aditivo não afeta o desempenho das misturas betuminosas, para além de melhorar as condições de produção.

Durante a fase em que estudava a utilização de aditivos nas misturas betuminosas com betume modificado com borracha, Jones et al., (2012) construiu um trecho experimental onde pôde observar o comportamento das misturas e comparar com as misturas tradicionais, tendo concluído:

- Ausência quase total de fumo e odor, assim como um aumento da trabalhabilidade;
- Nas misturas betuminosas a temperaturas reduzidas registou-se uma redução das emissões de poluentes em comparação com as misturas betuminosas tradicionais;
- Os níveis de compactação registados na mistura betuminosa com betume modificado com borracha a temperaturas temperadas e na mistura betuminosa tradicional são semelhantes.

Segundo os resultados de campo:

- As misturas betuminosas com betume modificado com borracha a temperaturas temperadas poderiam ser transportadas entre três a quatro horas para o local de pavimentação, colocadas com facilidade, e conseguem a compactação requerida. A utilização deste tipo de misturas à noite e no fim da estação de pavimentação é viável.

Segundo os ensaios de laboratório:

- Os resultados dos ensaios de carregamento acelerado e dos ensaios de campo, realizados às misturas betuminosas com betume modificado com borracha permitem afirmar que se obtém melhor desempenho com misturas betuminosas temperadas com borracha do que em misturas betuminosas tradicionais.

Com base nestes resultados, o Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans) colocou mais de um milhão de toneladas de mistura betuminosa com borracha em 2011 e espera-se que a sua colocação cresça nos próximos anos (Jones et al., 2012).

#### **2.4. Comportamento reológico do betume modificado com borracha**

O termo “Reologia” foi introduzido no meio científico pelo Professor Eugene Cook Bingham como sendo a ciência que estuda a deformação e escoamento da matéria. Esta definição foi aceite aquando da fundação da American Society of Rheology em 1929. Na primeira reunião da American Society of Rheology discutiu-se sobre as propriedades e o comportamento de materiais muito diferentes como o betume, tintas, plásticos e borracha, o que dá uma ideia do alcance do assunto e também das diversas disciplinas científicas que possam estar envolvidos (Santos, 2011).

A reologia abrange o estudo do comportamento mecânico dos materiais desde o seu estado sólido até ao seu estado líquido sendo a lei de Hooke e a lei de Newton utilizadas para descrever o comportamento dos sólidos e dos líquidos, respetivamente (Matos, 2012).

A lei de Hooke desenvolvida em 1678 pelo cientista inglês Robert Hooke, da qual faz parte a teoria da elasticidade, está diretamente relacionada com a mecânica dos sólidos. Esta lei refere que a “força atuante é diretamente proporcional à deformação”, definindo assim a base da elasticidade clássica (Barnes, 1989).

A lei de Newton foi inicialmente apresentada por Isaac Newton em 1687 com a seguinte definição: “a resistência resultante do atrito interno entre as partes do líquido, em condições iguais, é proporcional à velocidade com que as partes do líquido são separadas entre si”. A este atrito interno chama-se viscosidade (Barnes, 1989).

A reologia tem várias potencialidades e é um tema muito amplo, uma vez que os materiais têm respostas viscoelásticas a uma solicitação, que envolve rearranjos moleculares, segmentais e conformacionais dependentes do tempo, temperatura, pressão e outros fatores externos. Os ensaios devem ser compatíveis com a escala de tempos do fenómeno que se

pretende estudar. Assim, são utilizados vários métodos e modos de ensaio e aplicados princípios que permitem conseguir informação sobre o material fora da gama experimental (Arieira et al., 2006).

Os ensaios dão indicações sobre a possibilidade do material, tornando-se possível (Arieira et al., 2006):

- Estabelecer inter-relações entre os fatores para o processamento, as propriedades do material e as variáveis do processo, como a temperatura e a pressão;
- Definir a origem e o modo de evitar/minimizar a ocorrência de anomalias durante o processamento;
- Estimar a magnitude da dissipação viscosa de forma a evitar a degradação prematura do material;
- Apoiar a seleção do material mais adequado para uma aplicação específica;
- Fornecer informação sobre a estrutura molecular na ótica do controlo de qualidade de matéria-prima.

As propriedades reológicas dos betumes podem influenciar significativamente o desempenho das misturas betuminosas durante o processo de mistura, compactação e em serviço (Arieira et al., 2006).

O estudo do comportamento reológico dos materiais betuminosos tem por objetivo principal encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura (Pinto, 1991).

No caso específico do betume, a consideração da temperatura é importante, tendo em vista ser um material termo-sensível, ou seja, a sua consistência varia consideravelmente com a temperatura. Portanto, o comportamento elástico, viscoelástico e viscoso do betume é função da temperatura e do tempo de aplicação de carga. A temperaturas significativamente baixas ou a altas-frequências, o betume reage como um sólido elástico, e quando a temperatura aumenta e a baixas frequências, a viscosidade torna-se mais evidente (Arieira et al., 2006).

O reómetro dinâmico de corte (dynamic shear rheometer – DSR) é utilizado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante. Apresenta uma configuração de pratos paralelos. Este tipo de reómetro é utilizado especificamente para materiais muito viscosos, devido a simplicidade de procedimento do carregamento da amostra. Nesta configuração a deformação



não é homogénea, estando o material sujeito a uma deformação máxima na periferia e nula no centro. As principais vantagens e desvantagens do reómetro do tipo pratos paralelos indicam-se na tabela seguinte (Arieira et al., 2006).

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do reómetro de pratos paralelos (Arieira et al., 2006).

Vantagens	Desvantagens
Facilidade de carregamento de amostras muito viscosas	Taxas de corte máximas inferiores a $30s^{-1}$ para fluidos muito viscosos
Permite retardar a fratura através da variação da distância entre pratos	Deformação não homogénea Potenciais correções inerciais para viscosidades baixas
Gama alargada de materiais	Potenciais escoamentos secundários

A amostra de betume, na forma sólida, semi-sólida e líquida pode ser testada a todas as temperaturas, desde a fase de produção da mistura betuminosa até às temperaturas de solitação próprias dos pavimentos rodoviários (Antunes et al., 2004).

Através de uma aplicação dinâmica, em controlo de esforço aplicado é possível obter o módulo complexo de corte ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ).

O módulo complexo de corte ( $G^*$ ) é uma medida da resistência total do material à deformação quando exposto a solitações repetidas de corte. O ângulo de fase ( $\delta$ ) é um indicador das quantidades relativas de deformação recuperável e não recuperável. A componente elástica do módulo complexo ( $G^*\cos \delta$ ) e a componente viscosa ( $G^*\sin \delta$ ) estão fortemente correlacionadas com a suscetibilidade das misturas betuminosas aos fenómenos de degradação de fadiga e de deformação permanente (cavados de rodeiras) (Antunes et al., 2004).

A Figura 16 apresenta de forma esquemática a forma de aplicação da tensão na amostra de betume.

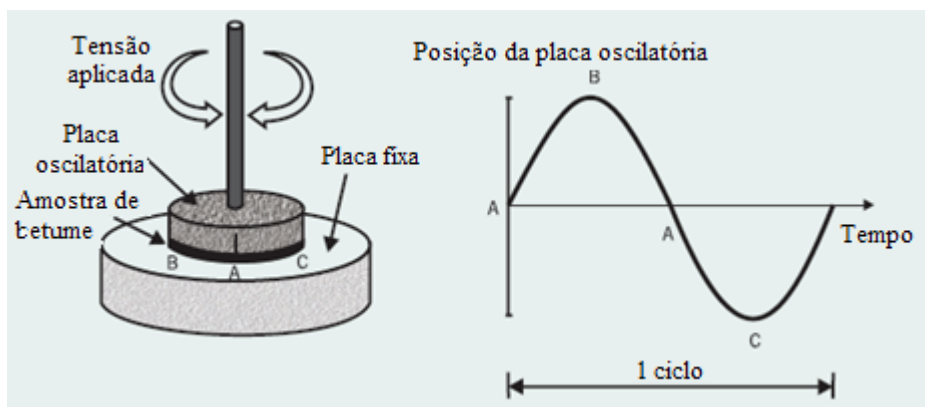


Figura 16 - Esquema de aplicação da tensão numa amostra de betume (adaptado de Bernucci et al., 2008)

A resposta à deformação da amostra de betume está desfasada em relação à tensão aplicada de um certo intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) que representa o atraso na deformação obtida (Figura 17). A fase em atraso é expressa em medida angular como o tempo de atraso ( $\Delta t$ ) multiplicado pela frequência angular ( $\omega$ ) sendo representada pelo ângulo de fase ( $\delta$ ). Para materiais completamente elásticos, não existe atraso entre a tensão aplicada e a deformação obtida, sendo  $\delta=0^\circ$ . Para materiais totalmente viscosos, a deformação obtida está completamente desfasada e  $\delta=90^\circ$ . Materiais viscoelásticos, tais como o betume, possuem um ângulo de fase que varia entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , dependendo da natureza do betume e da temperatura de ensaio (Bernucci et al., 2008).

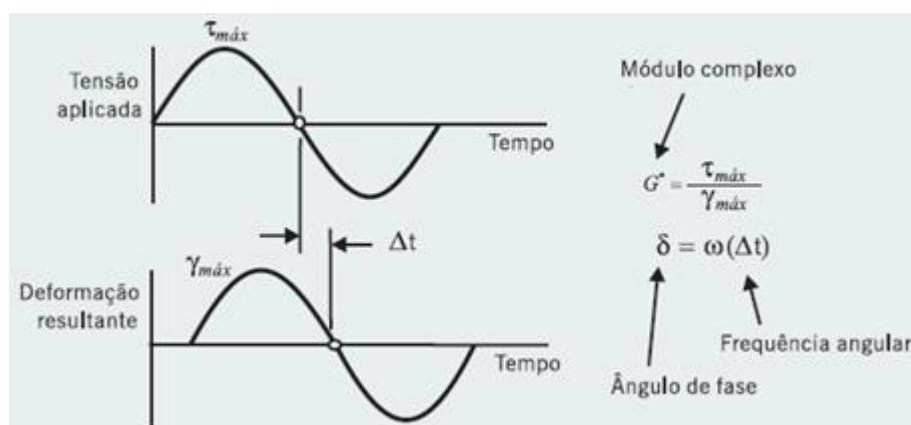


Figura 17 - Desfasamento entre a tensão aplicada e a deformação (adaptado de Bernucci et al., 2008)

Na Figura 18 estão representados os resultados obtidos para dois tipos de betume diferentes: betume 1 e betume 2, ensaiados à mesma temperatura sendo que  $\delta_2$  é menor do que  $\delta_1$ , mostrando que o betume 2 é mais elástico do que o betume 1, ou que o betume 1 é mais viscoso que o betume 2. A Figura 18 poderia representar também os ângulos de fase de um

mesmo betume testado no reômetro a duas temperaturas diferentes, sendo que a temperatura de ensaio do betume 2 é menor que a temperatura de ensaio do betume 1. A altas temperaturas o ângulo de fase ( $\delta$ ) aproxima-se mais dos  $90^\circ$  enquanto a baixas temperaturas o ângulo de fase tende a aproximar-se de  $0^\circ$  (Bernucci et al., 2008).

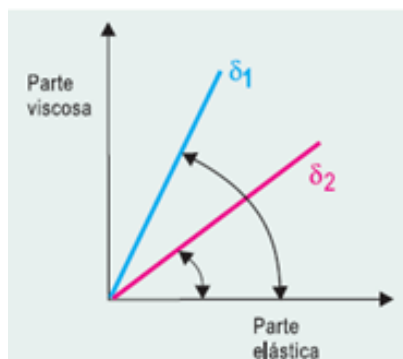


Figura 18 - Exemplos de resultados do ângulo de fase de dois betumes diferentes (Bernucci et al., 2008)

As principais propriedades mecânicas obtidas com a caracterização reológica dos betumes, com interesse para avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas incluem os seguintes parâmetros (Arieira et al., 2006):

- i.  $G'$  - Módulo Elástico, corresponde à resposta elástica do material
- ii.  $G''$  - Módulo Viscoso, corresponde à resposta viscosa do material, em que avalia o comportamento viscoso do material
- iii.  $\tan \delta$  - que representa uma associação entre a parte viscosa e a parte elástica do material
- iv. Viscosidade de corte - representa a medida do atrito interno de um material e é uma medida da resistência ao escoamento.

As propriedades reológicas dos betumes têm grande influência no desempenho das misturas betuminosas durante o processo de mistura, compactação e em serviço. O betume caracteriza-se por ter um comportamento viscoelástico, traduzindo-se numa dependência da temperatura e do tempo de carregamento. Com a variação da temperatura o comportamento dos betumes pode variar de perfeitamente plástico (temperaturas muito baixas) a perfeitamente viscoso (temperaturas elevadas). A viscosidade é a propriedade dos betumes que, influenciada pela temperatura, melhor define o seu comportamento reológico, sendo por isso importante na determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas (Matos, 2012).

---

Os betumes modificados surgem em Portugal nos anos 90 do século XX. Dependendo do tipo de aditivo, caracterizam-se por conferirem às misturas betuminosas maior flexibilidade, traduzindo-se numa resposta mais eficaz a maiores solicitações do pavimento, auferindo aos pavimentos maior capacidade de suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações, menor suscetibilidade térmica, resistência às deformações permanentes, ao envelhecimento durante a utilização e à fadiga, solucionando alguns problemas funcionais, contribuindo para a diminuição do ruído de rolamento, aumento da aderência, da regularidade e melhoria das características de drenabilidade superficial (Matos, 2012).

Navarro et al., (2004) estudou que a adição de 9% de borracha de pneus fragmentada ao betume produzido a 180°C com um tempo de digestão de 90 minutos melhora significativamente o comportamento do betume. A viscosidade do betume modificado com borracha num intervalo de temperatura compreendida entre 50-163 °C aumenta com a dimensão das partículas de borracha fragmentada e é claramente mais viscoso do que o betume puro. Além disso o comportamento dos betumes modificados torna-se mais não newtoniano, com o aumento da temperatura e o aumento do tamanho das partículas de borracha.

Behl et al., (2013) realizou um estudo em que adicionava 2, 3 e 4 % de Sasobit® em peso de ligante para estudar o comportamento reológico das misturas betuminosas aditivadas produzidas a temperaturas temperadas, desse estudo pode concluir que as misturas betuminosas aditivadas apresentam viscosidade superior a temperaturas mais baixas e que reduz a viscosidade a temperaturas elevadas. Em comparação com a mistura betuminosa convencional, as misturas betuminosas aditivadas com Sasobit® apresentavam melhores resultados para o ângulo de fase e módulo complexo de corte do que a mistura convencional, o que indicia que apresentam melhor resistência à deformação permanente.



### 3. Materiais e Métodos

#### 3.1. Materiais utilizados

No caso em estudo optou-se pela utilização de um betume da classe 50/70 segundo a EN 12591. O betume a aplicar nas misturas em estudo foi modificado com 19% de granulado de borracha ou seja, é um betume com alta percentagem de borracha. Para além da quantidade, a principal característica da borracha que influencia as propriedades do betume modificado com borracha é a sua granulometria. A borracha utilizada neste estudo tem dimensões compreendidas entre 0.18 e 0.6 mm e provém da empresa Recipneu em Sines.

Para a modificação dos betumes foram utilizados dois aditivos orgânicos (Sasobit e Leadcap) e dois aditivos químicos (Rediset e Iterlow). De forma a avaliar a influência do aditivo produziram-se betumes modificados com diferentes quantidades de aditivo. Os betumes aditivados com Sasobit e Leadcap foram produzidos com 2, 3 e 4% do peso do ligante. Os betumes aditivados com Rediset e Iterlow incluíram percentagens de 0,2; 0,3 e 0,4 % de aditivo em relação ao peso de ligante. A escolha dos aditivos a utilizar neste trabalho baseou-se na experiência de utilização existente internacionalmente.

As cinco frações de agregados utilizados na produção das misturas betuminosas têm as seguintes dimensões nominais: 6/14 mm, 4/10 mm, 4/6 mm, 0/4 mm e filer comercial. Com exceção do filer, os agregados foram obtidos da Pedreira Bezerras em Guimarães e são de origem granítica. O filer é de origem calcária. Na Tabela 4 e na Figura 19 apresentam-se os resultados da análise granulométrica feita com base na norma EN 933-1.

Tabela 4 - Composição granulométrica das frações de agregados (% passados)

Peneiro [mm]	Brita 6/14	Brita 4/10	Brita 4/6	Pó 0/4	Filer Comercial
40	100	100	100	100	100
31.5	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100
16	100	100	100	100	100
14	97	100	100	100	100
12.5	91	100	100	100	100
10	62	97	100	100	100
6.3	12	34	98	100	100
4	3	4	12	91	100
2	1	2	4	71	100
0.5	1	2	2	38	100
0.125	1	1	2	17	100
0.063	1	1	1	11	99.9

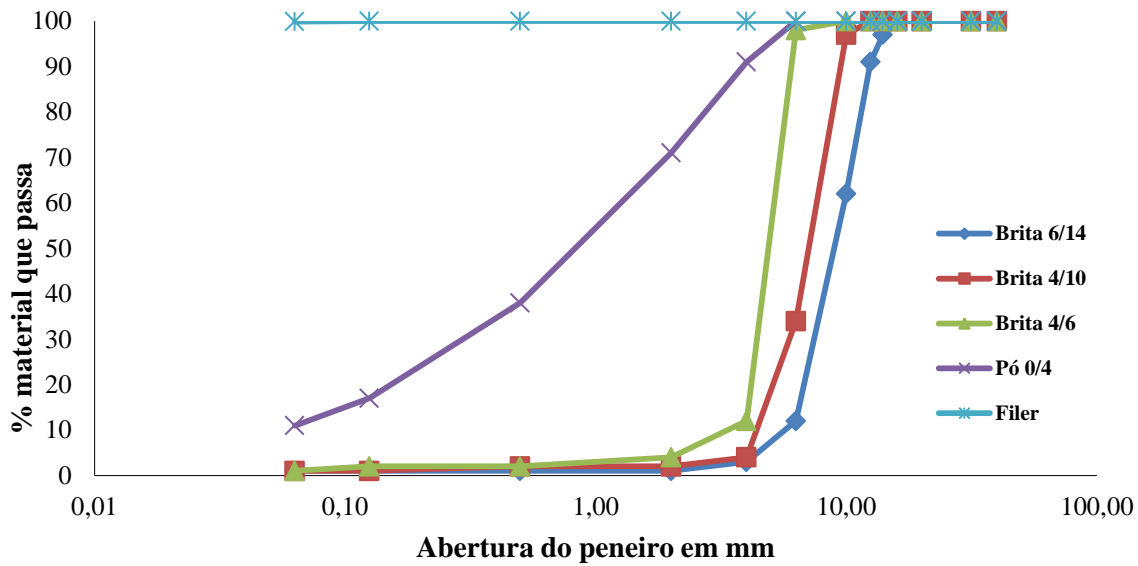


Figura 19 - Curva granulométrica dos agregados

### 3.2. Produção dos betumes modificados com borracha em estudo

O processo de produção do betume modificado com borracha começa por colocar o betume a aquecer na estufa durante cerca de duas horas submetido a elevadas temperaturas para que se torne mais líquido. Enquanto o betume fica mais líquido, pesa-se a borracha e o aditivo nas quantidades calculadas.

Para determinar o peso da borracha correspondente a 19% do peso de betume utiliza-se a equação 1.

$$Peso\ da\ borracha = \frac{Peso\ do\ betume \times \left(\frac{19}{100}\right)}{1 - \left(\frac{19}{100}\right)} \quad (1)$$

A quantidade de aditivo é determinada através da equação 2.

$$Peso\ de\ aditivo = \frac{(Peso\ da\ borracha + Peso\ do\ betume) \times \% \text{ de aditivo}}{1 - \% \text{ de aditivo}} \quad (2)$$

O betume modificado com borracha de referência foi produzido a 180 °C e sem qualquer aditivo.

Quando o betume já estiver suficientemente líquido coloca-se na misturadora onde vai manter-se à temperatura pretendida. De seguida coloca-se o aditivo redutor de temperatura e passados 5 minutos adiciona-se a borracha. No fim de adicionar a borracha espera-se que

volte a atingir a temperatura pretendida para começar a contar o tempo de digestão, que no caso em estudo corresponde a 45 minutos. Durante este período, a misturadora foi mantida a 245 rotações por minuto.

No total foram produzidos 29 betumes modificados com borracha e aditivados com diferentes quantidades como estão representados de seguida, para além da quantidade de aditivo a outra variável é a temperatura de produção.

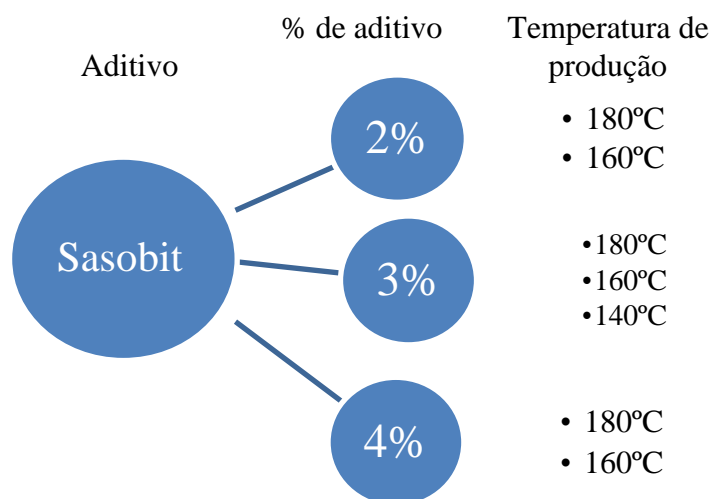


Figura 20 - Betumes Modificados com Borracha aditivados com Sasobit

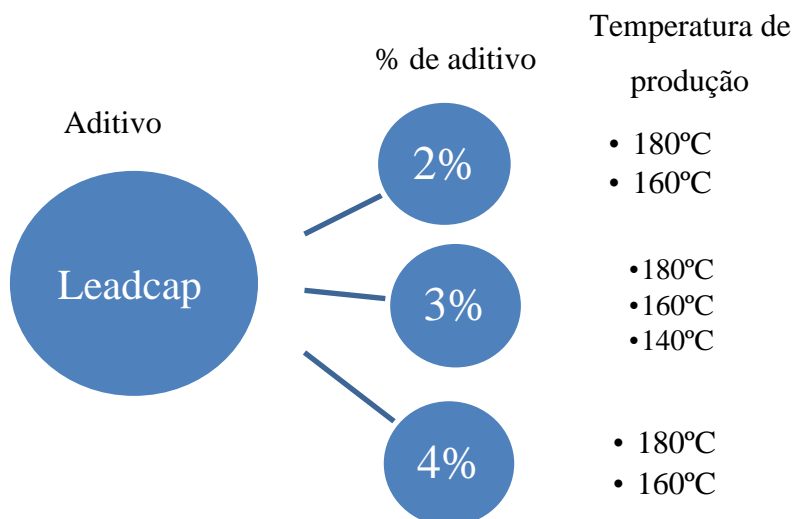


Figura 21 - Betumes Modificados com Borracha aditivados com Leadcap



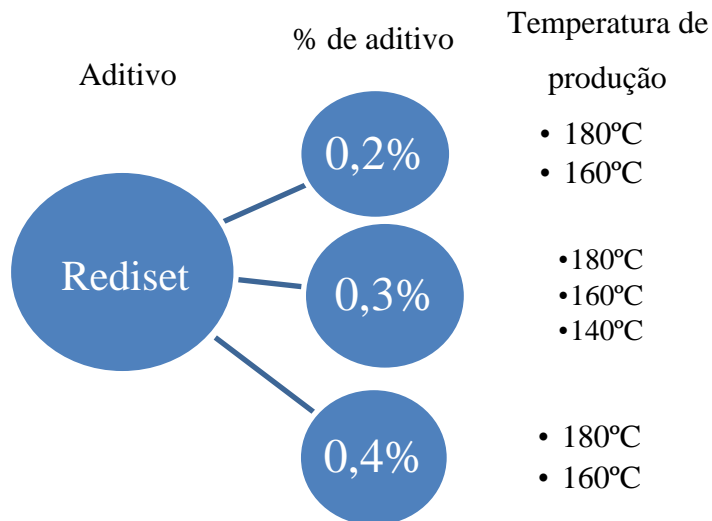


Figura 22 - Betumes Modificados com Borracha aditivados com Rediset

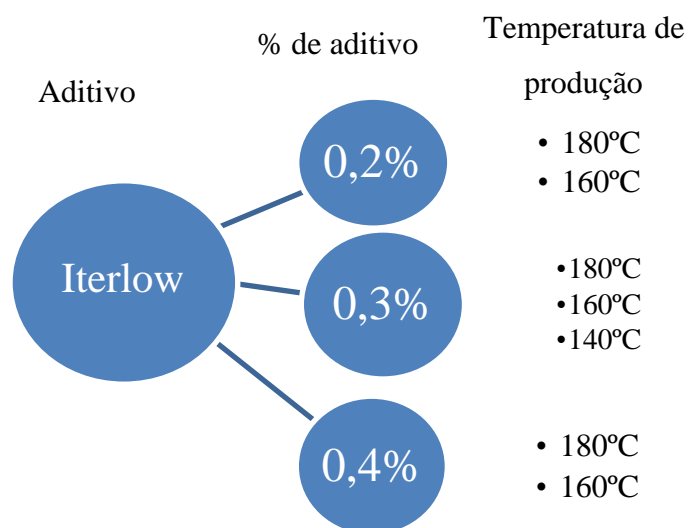


Figura 23 - Betumes Modificados com Borracha aditivados com Iterlow

### **3.3. Métodos de ensaio utilizados para caracterização dos betumes**

#### ***3.3.1. Ponto de amolecimento determinado pelo método de Anel e Bola***

Este ensaio executa-se de acordo com a EN 1427 e consiste na medição da temperatura a que as esferas de aço atravessam o betume colocado nos anéis devido ao amolecimento do betume. A temperatura medida corresponde à mudança de estado ou comportamento, a partir do qual o betume se torna instável e pode dar origem a deformações permanentes.

A preparação da amostra para ensaio consiste em colocar dois anéis sobre uma placa de vidro previamente revestida com silicone para evitar a aderência do betume ao vidro. Enche-se os anéis com o betume, deixa-se arrefecer e raspa-se a superfície com uma espátula quente. Retira-se os anéis da placa de vidro e limpa-se a parte externa dos anéis. Coloca-se os anéis no suporte de ensaio e de seguida coloca-se o suporte com os anéis e as esferas dentro do copo de ensaio. Enche-se o copo com água de forma que a parte superior dos anéis fique com 5 cm de água acima destes. Coloca-se o conjunto no frigorífico dentro de um banho-maria a 5°C durante pelo menos 15 minutos. Retira-se o conjunto do frigorífico e coloca-se os centradores nos anéis. Coloca-se as esferas nos centradores e coloca-se o agitador de forma a garantir um aquecimento de 5°C por minuto. Quando o betume e a esfera tocarem na parte inferior do suporte, deve registar-se de imediato a temperatura do termómetro para cada anel. O resultado do ensaio corresponde à média da temperatura dos anéis.

#### ***3.3.2. Penetração de betumes***

O ensaio de determinação da penetração de betumes realiza-se de acordo com a EN 1426 e tem como objetivo medir a penetração, expressa em décimos de milímetro, de uma agulha normalizada numa amostra de betume.

Prepara-se duas cápsulas vazias e colocam-se perto da zona de recolha numa superfície plana. Enche-se as cápsulas de betume e deixa-se arrefecer até a temperatura ambiente (entre 60 a 90 minutos).

Coloca-se as amostras em banho-maria a 25°C durante 60 a 90 minutos. Após este tempo coloca-se o penetrómetro de forma que a agulha fique a rasar a superfície do betume (Figura 24). O ensaio consiste em medir a penetração da agulha na amostra de betume. Repete-se o ensaio três vezes garantindo um afastamento de 1 cm entre os locais (também se deve garantir a mesma distancia das extremidades do recipiente).

No final dos três ensaios deve-se verificar a validade dos mesmos visto que a diferença entre o valor máximo e o mínimo deve ser inferior a 2 mm/10. O resultado obtido corresponde a média dos três valores arredondado à unidade.



Figura 24 - Penetrômetro utilizado para realizar o ensaio de penetração

### ***3.3.3. Determinação da viscosidade através do viscosímetro rotacional***

Realizado em conformidade com a EN 13302 tem como objetivo a determinação da viscosidade dinâmica de um betume a temperaturas elevadas, através da medição do esforço de torção, necessário para manter uma determinada velocidade de rotação constante, utilizando um viscosímetro rotacional (Figura 25).



Figura 25 - Viscosímetro rotacional

Após a preparação da amostra para ensaio em conformidade com a EN 12594, coloca-se o betume no recipiente tendo o cuidado de deixar o topo da amostra a cerca de 1,5 cm da boca. Coloca-se o recipiente no Thermosel (dispositivo que controla automaticamente as variações de temperatura) e mergulha-se o *spindle* no betume. De seguida deixa-se o conjunto em repouso pelo menos durante 15 minutos para estabilização da temperatura. Seleciona-se as rotações por minuto adequadas de forma que o torque esteja compreendido entre 10 e 90%.

O ensaio pode realizar-se a qualquer temperatura que garanta um comportamento fluido do betume. Assim, no presente trabalho usou-se um procedimento desenvolvido por Silva et al., (2009), onde se repete o ensaio para uma série de temperaturas, desde a mais baixa (da ordem dos 100 °C) até à temperatura mais alta (da ordem dos 180 °C).

#### **3.3.4. Resiliência**

O ensaio de resiliência mede a recuperação elástica da amostra e é realizado segundo a norma EN13880-3.

Coloca-se a amostra de betume em banho-maria mantendo a temperatura a 25°C. Após 2 horas a temperatura constante retira-se a amostra da água, seca-se a superfície e prepara-se a amostra para o ensaio revestindo ligeiramente a superfície com pó de talco soprando o excesso.

De seguida coloca-se a esfera de penetração em contacto com a superfície de betume, de preferência com auxílio de uma fonte de luz para que seja bem visível. Solta-se a ferramenta de penetração e deixa-se penetrar o betume durante 5 segundos, regista-se a leitura como sendo o ponto inicial (P). Sem voltar o ponteiro do mostrador a zero, pressiona-se a ferramenta de penetração incrementando 100 unidades a um tempo de 10 segundos. Durante 5 segundos larga-se a ferramenta de penetração até o mostrador ficar a zero. Liberta-se a ferramenta de penetração permitindo que o betume recupere durante 20 segundos e regista-se a leitura final (F) (Figura 26).

A resiliência é medida através da percentagem de recuperação segundo a Equação 3:

$$\text{Percentagem de recuperação} = P + 100 - F \quad (3)$$

Em que:

P- leitura do ponto inicial

F- leitura final



Figura 26 - Penetrômetro utilizado para realizar o ensaio de resiliência

### 3.3.5. Reologia

O ensaio para a caracterização reológica do betume é realizado segundo a norma AASHTO T315-10. Este método de ensaio permite determinar o módulo complexo de corte ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ). O ensaio consiste em colocar uma amostra de betume de tamanho idêntico ao de uma moeda com 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura entre duas placas metálicas paralelas que fazem parte do reômetro (Figura 27).



Figura 27 - Reômetro dinâmico de corte

Durante o ensaio uma das placas paralelas oscila em relação à outra com uma frequência angular de 10 rad/s a amostra de betume é submetida ao aumento de temperatura de forma gradual entre 46 e 88°C.

O módulo complexo de corte ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) são calculados para cada temperatura através do software do computador que está ligado ao reómetro.

### **3.4. Produção das misturas betuminosas com betume modificado com borracha**

A produção de misturas betuminosas com betume modificado com borracha começa com a produção do betume modificado com borracha que já foi explicada no subcapítulo de Produção do betume modificado com borracha.

Depois de pesados nas quantidades corretas, os agregados são colocados na estufa e quando atingem a temperatura pretendida são colocados na misturadora. De seguida adiciona-se o betume modificado com borracha e mistura-se durante 2 minutos. Passados estes dois minutos são recolhidas 9 amostras da mistura para 9 provetes sendo que três são utilizados para o estudo de compactabilidade e seis para o estudo de sensibilidade à água.

A mistura betuminosa de referência foi produzida com betume modificado com borracha produzido a 180°C e não contem nenhum aditivo. Os agregados estavam na estufa a 185°C. A temperatura de mistura é 180°C.

No total foram produzidas 9 misturas betuminosas das quais 8 continham aditivos redutores de temperatura. Com base nos resultados dos ensaios de caracterização dos betumes seleccionou-se a percentagem ótima de aditivo e para determinar a temperatura mais adequada para a produção das misturas betuminosas estudaram-se a produção de misturas à temperatura de 140 e a 160 °C.

As misturas betuminosas produzidas são misturas rugosas do tipo MBR-BBA e são as mais utilizadas quando o ligante é betume modificado com borracha. Na Tabela 6 apresentam-se os requisitos do fuso granulométrico impostos pelo Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP, 2012) para misturas betuminosas rugosas com alta percentagem de granulado de borracha e na Figura 28 está representada a curva granulométrica da mistura onde também estão representados os limites mínimos e máximos impostos pelo Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP, 2012).

Tabela 5 - Granulometria da mistura MBR-BBA

Abertura peneiro [mm]	Mínimo	Máximo	Mistura em estudo
31.5	-	-	100
20	100	100	100
16	-	-	100
14	90	100	99
12.5	-	-	96.9
10	58	88	86
6.3	-	-	53.6
4	20	32	24.6
2	12	20	17.8
0.5	6	13	10.8
0.125	4	8	6.4
0.063	3	6	5

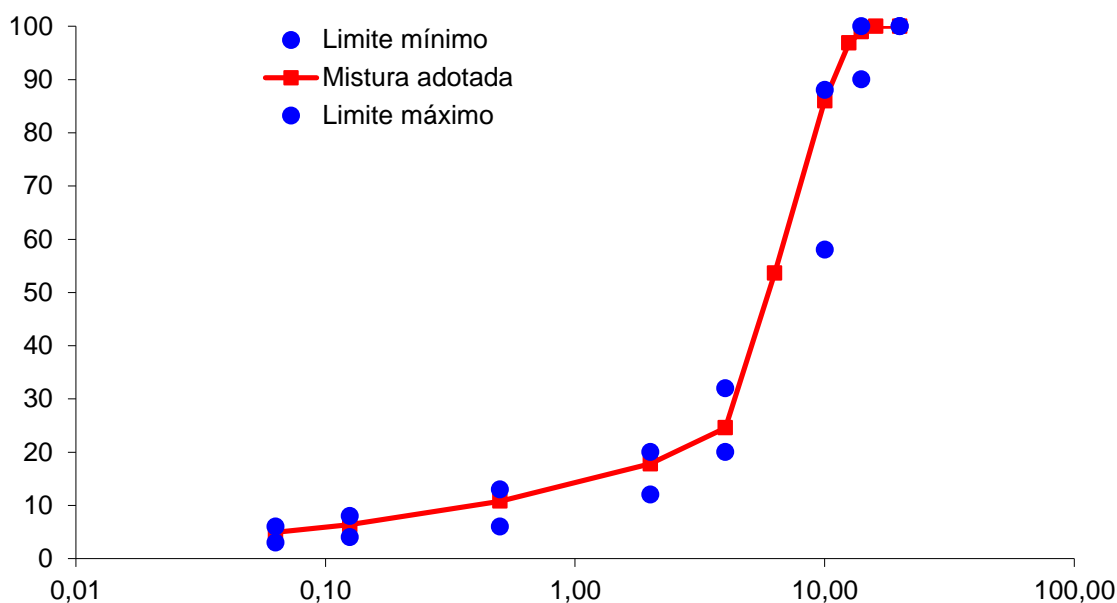


Figura 28 - Curva granulométrica da mistura em estudo

### 3.5. Métodos de ensaio utilizados para caracterização das misturas

#### 3.5.1. Ensaio de Compactabilidade

Os provetes cilíndricos para ensaio foram preparados de acordo com a norma EN 12697-30:2004+A1:2007, que descreve a preparação de provetes por compactador de impacto, vulgarmente conhecidos por “provetes de Marshall”.

Depois de preparadas as misturas, colocam-se as amostras necessárias à produção dos provetes dentro dos respetivos moldes e sujeita-se a mistura à compactação. A compactação é executada com recurso a um compactador de impacto (Figura 29). O procedimento convencional consiste em deixar cair o pilão de compactação a uma determinada altura e com a aplicação de 75 pancadas em cada face durante um determinado intervalo de tempo. Após as 75 primeiras pancadas o molde deve ser retirado do dispositivo e invertida a posição do provete de forma a compactar com mais 75 pancadas na outra face do provete.

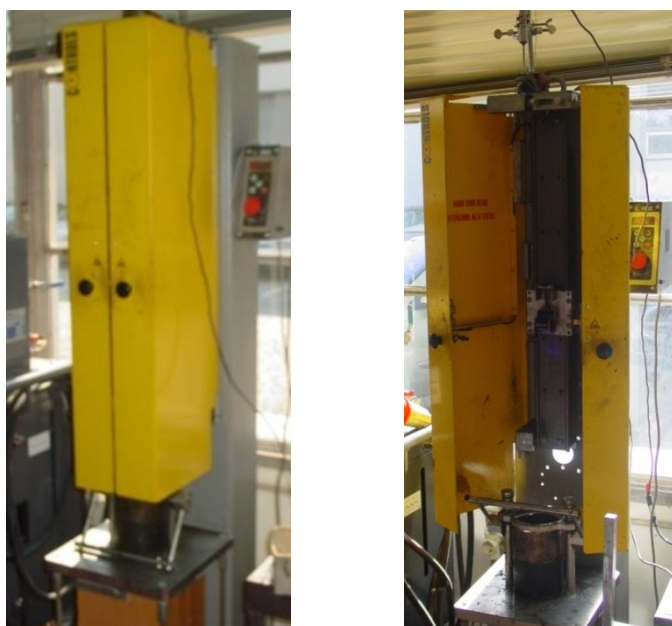


Figura 29 - Compactador de impacto

Para a determinação da compactabilidade das misturas realiza-se um procedimento ligeiramente diferente, utilizando também o compactador de impacto ao qual é anexo um LVDT que ajuda a medir a variação da altura do provete durante o processo. Desta forma é possível avaliar a maior ou menor facilidade de compactar as diferentes misturas para uma determinada energia de compactação.

Após concluída a compactação, o provete é arrefecido a temperatura ambiente. O mesmo procedimento repete-se para os três provetes.

Depois de arrefecidos os provetes, dá-se início à desmoldagem. Esse procedimento realiza-se na prensa onde o provete é colocado sobre o braço da prensa, que como possui um diâmetro inferior ao do molde, vai permitir que este empurre o provete para fora do molde e para dentro da alonga. O mesmo procedimento é repetido para os três provetes.



### 3.5.2. Estudo da Sensibilidade à água

O ensaio de sensibilidade à água segundo a norma EN 12697-12 consiste em compactar 6 provetes de Marshall que de seguida são divididos em dois subgrupos com baridade e altura média idênticos.

O primeiro conjunto de provetes fica submerso em vácuo sujeito a uma pressão de 6,7 kPa durante 30 minutos e de seguida os provetes ficam mais 30 minutos a uma pressão de 0 kPa. O próximo passo é colocar os provetes em banho-maria a uma temperatura de 40°C entre 68 e 72 horas. Durante mais duas horas os provetes ficam em banho-maria a temperatura de 15°C.

O segundo conjunto de provetes é colocado a 20°C até duas horas antes de ser ensaiado. Findo esse período, o conjunto de provetes é transposto para uma câmara climática onde é mantido a uma temperatura de 15°C.

De seguida os provetes são submetidos ao ensaio de tração indireta que consiste em aplicar uma força vertical (na direção diametral do provete) a uma velocidade constante (Figura 30). O ensaio termina quando se atingir a força máxima de compressão diametral. Os resultados do ensaio são armazenados no computador que está ligado à prensa para posterior análise. Com base nestes resultados é possível representar um gráfico que traduz a força exercida pela prensa em função da deformação do provete (Figura 31). No final é registada a força máxima exercida pela prensa durante o ensaio, que representa a força de rotura.

Com base no valor da força de rotura e das dimensões dos provetes calcula-se o valor da resistência à tração indireta (ITS) segundo a Equação 4:

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (4)$$

Onde:

P é a força de rotura em kPa

d é o diâmetro do provete, em mm

h é a altura do provete, em mm

A partir do valor médio da resistência à tração indireta dos provetes molhados ( $ITS_w$ ) e dos provetes secos ( $ITS_d$ ) é calculada a resistência conservada em tração indireta (ITSR) através da Equação 5:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \quad (5)$$



Figura 30 - Ensaio de tração indireta

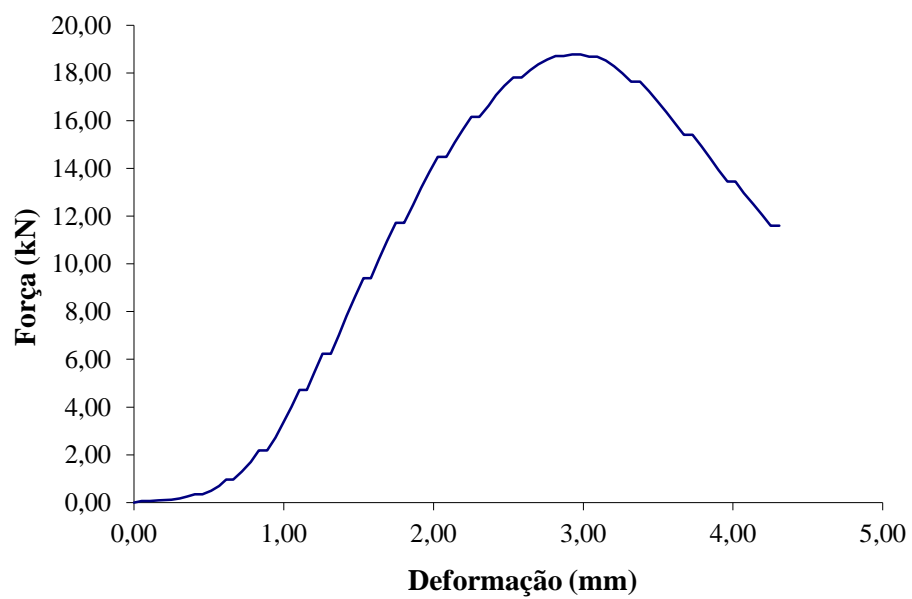


Figura 31 - Gráfico resultante do ensaio de tração indireta



## 4. Resultados

### 4.1. Ponto de amolecimento determinado pelo Método do Anel e Bola

Nas Figuras 32 e 33 apresentam-se os resultados para o ponto de amolecimento determinado pelo Método do Anel e Bola do Betume Modificado com Borracha produzido com diferentes percentagens de aditivos orgânicos, respetivamente Sasobit e Leadcap.

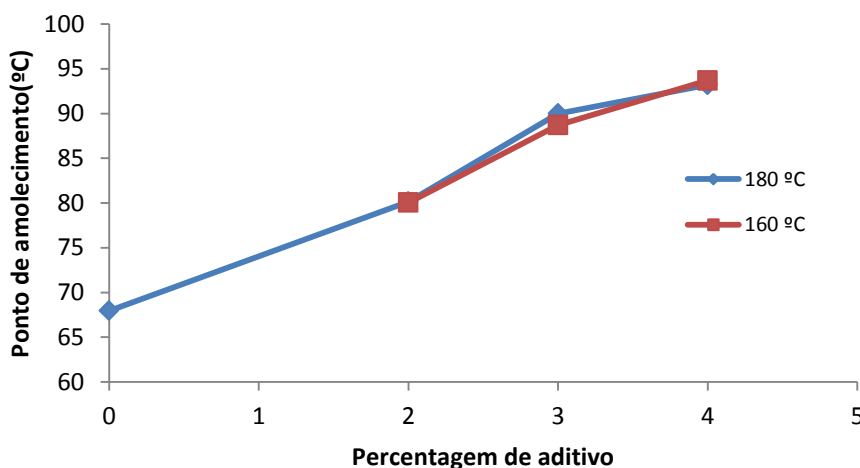


Figura 32 - Influência da % de Sasobit no Ponto de amolecimento

Como se pode analisar na Figura 32, a adição de Sasobit no Betume Modificado com Borracha tem uma grande influência no ponto de amolecimento porque torna o betume menos sensível à temperatura. Com o aumento da percentagem de aditivo verifica-se que o ponto de amolecimento do Betume Modificado com Borracha também aumenta.

Pode também verificar-se que Betumes Modificados com Borracha produzidos com a mesma percentagem de Sasobit apresentam resultados bastante próximos quando são produzidos a 180 e a 160 °C.

Quanto ao Leadcap, a análise da Figura 33 demonstra que a adição deste aditivo ao Betume Modificado com Borracha produzido a 180 °C não tem influência no ponto de amolecimento.

Quando produzido a 160 °C, o Betume Modificado com Borracha torna-se mais mole, menor ponto de amolecimento, mas a quantidade de aditivo na mistura não influencia o Ponto de amolecimento, uma vez que com adição de 2, 3 e 4 % de Leadcap o ponto de amolecimento é constante.

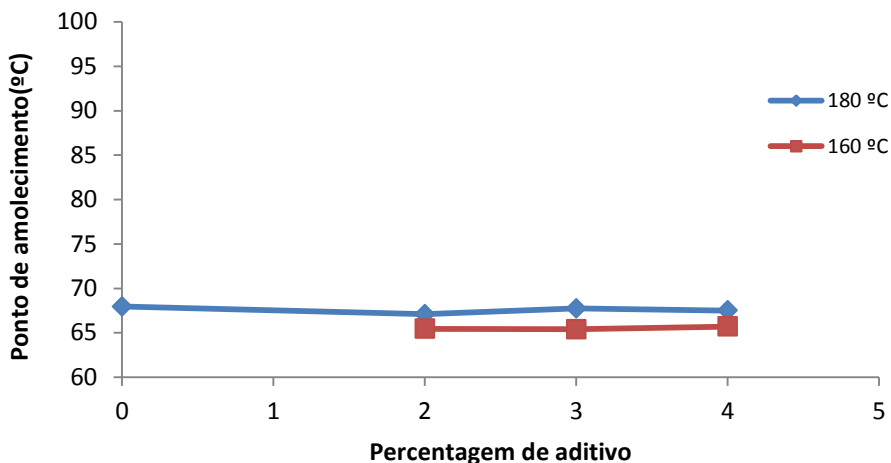


Figura 33 - Influência da porcentagem de Leadcap no ponto de amolecimento

Quanto ao ponto de amolecimento para os aditivos químicos Rediset e o Iterlow, estes são apresentados respectivamente na Figuras 34 e 35.

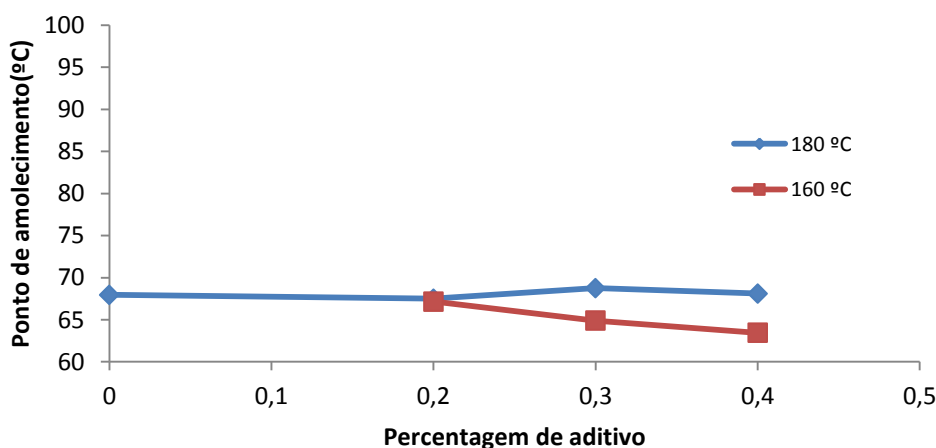


Figura 34 - Influência da porcentagem de Rediset no ponto de amolecimento

Os resultados do ponto de amolecimento do Betume Modificado com Borracha produzido sem adição de Rediset são em tudo semelhantes ao Betume Modificado com Borracha com 0,2 % de Rediset quer seja a 160 ou a 180 °C.

No Betume Modificado com Borracha com adição de Rediset produzido a 180 °C nota-se que há um ligeiro aumento do ponto de amolecimento com o aumento da porcentagem de aditivo.

Quando produzido a 160 °C o ponto de amolecimento do Betume Modificado com Borracha diminui com o aumento da porcentagem de Rediset.

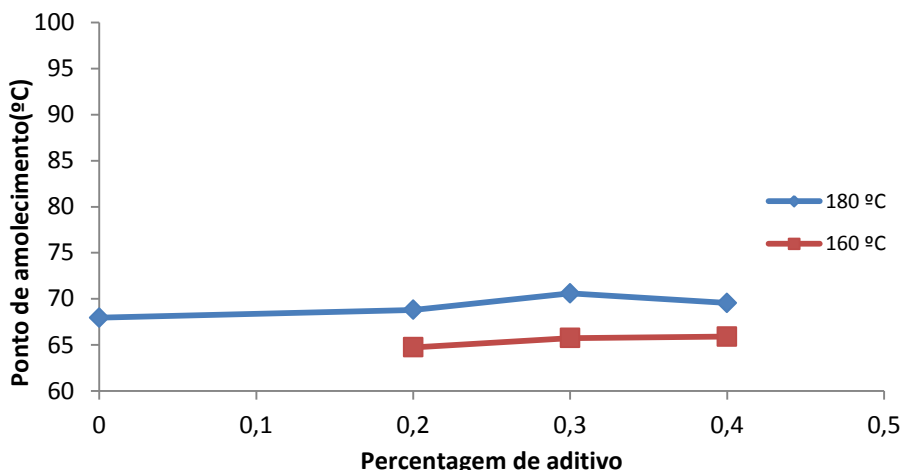


Figura 35 - Influência da % de Iterlow no Ponto de amolecimento

Quando produzido a 180 °C, o ponto de amolecimento do Betume Modificado com Borracha com adição de Iterlow apresenta um aumento ligeiro do ponto de amolecimento. No entanto, para 0,4 % de aditivo o resultado é ligeiramente inferior ao obtido para 0,3 %.

O Betume Modificado com Borracha com adição de Iterlow produzido a 160 °C fica mais mole do que o Betume Modificado com Borracha sem aditivo, sendo de referir também que com o aumento da percentagem de aditivo o ponto de amolecimento do ligante aumenta ligeiramente.

A influência da temperatura de produção nos Betumes Modificados com Borracha com aditivos redutores de temperatura é apresentada na Figura 36 para uma adição de 3% nos casos dos aditivos orgânicos (Sasobit e Leadcap) e para 0,3 % nos casos dos aditivos químicos (Rediset e Iterlow), tendo sido estudadas as temperaturas de produção para 180, 160 e 140 °C.

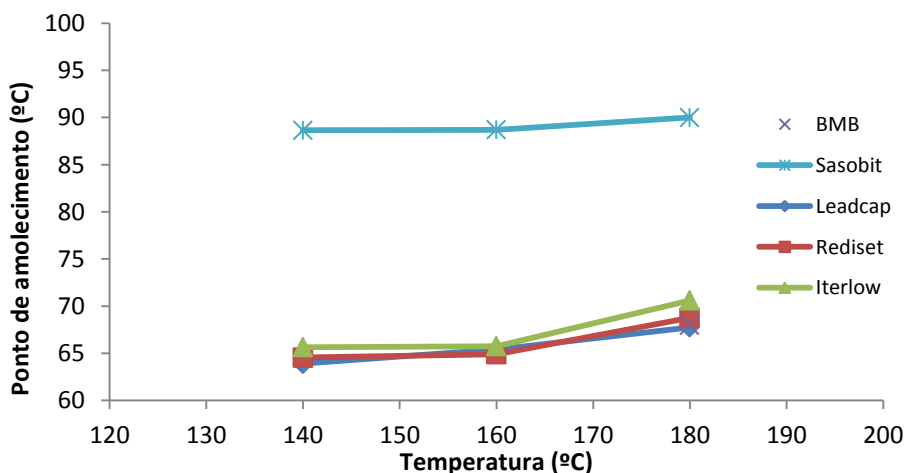


Figura 36 - Influência da temperatura no ponto de amolecimento do BMB

A análise da Figura 36 permite concluir que o aumento da temperatura de produção do Betume Modificado com Borracha aumenta o ponto de amolecimento para qualquer um dos aditivos estudados, não havendo grande diferença entre aditivos à exceção do Sasobit, o qual aumenta consideravelmente o ponto de amolecimento do betume. Em relação ao Betume Modificado com Borracha sem aditivo, a diminuição da temperatura provoca uma ligeira diminuição do ponto de amolecimento.

## 4.2. Penetração

Quando à penetração do betume, na Figura 37 pode observar-se a influência da percentagem de Sasobit utilizada na produção do Betume Modificado com Borracha.

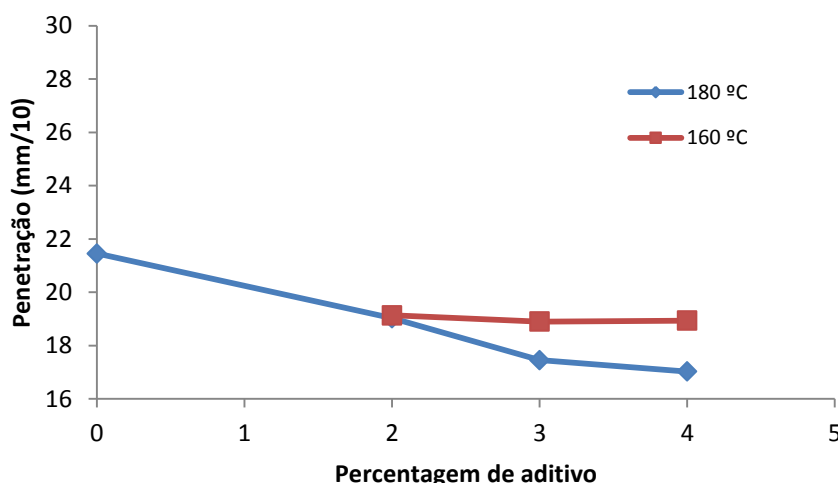


Figura 37 - Penetração do BMB produzido com diferentes percentagens de Sasobit

Para betumes modificados com borracha aditivados com Sasobit produzidos a 180°C verifica-se uma diminuição da penetração com o aumento da percentagem de Sasobit. Estes resultados vão ao encontro dos resultados do ensaio do Ponto de Amolecimento, onde se verificou que com o aumento da percentagem de Sasobit torna o betume mais duro. Com 2% de aditivo, a penetração é igual para betumes modificados com borracha aditivados quer sejam produzidos a 180 quer seja a 160°C.

Em betumes modificados com borracha com Sasobit produzidos a 160°C a evolução da penetração não é tão notória. No entanto, verifica-se uma ligeira diminuição da penetração com o aumento da percentagem de aditivo.

Os resultados do ensaio de penetração para Betumes modificados com Borracha aditivados com Leadcap (Figura 38) demonstram que a presença deste aditivo torna os betumes mais moles, verificando-se que a penetração aumenta com o aumento da percentagem de aditivo. No entanto, para 3% de Leadcap verificou-se uma diminuição da penetração, mais notória a 160°C, que poderá não ter grande significado dada a gama de valores em que se enquadra a penetração.

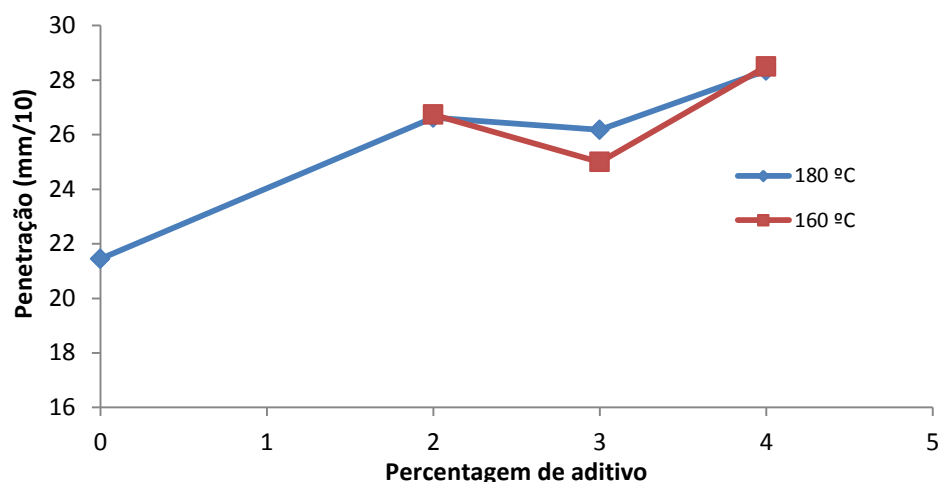


Figura 38 - Penetração do BMB produzido com diferentes percentagens de Leadcap

Quanto ao betume aditivado do Rediset, a Figura 39 mostra que o Betume Modificado com Borracha produzido a 180°C com 0,2 % de Rediset tem uma penetração inferior ao Betume Modificado com Borracha sem aditivo. Quando produzido a 180°C o Betume Modificado com Borracha aditivado com Rediset aumenta a sua penetração à medida que se aumenta a percentagem de aditivo. Já nos betumes produzido a 160°C a penetração diminui com o aumento da percentagem de aditivo.

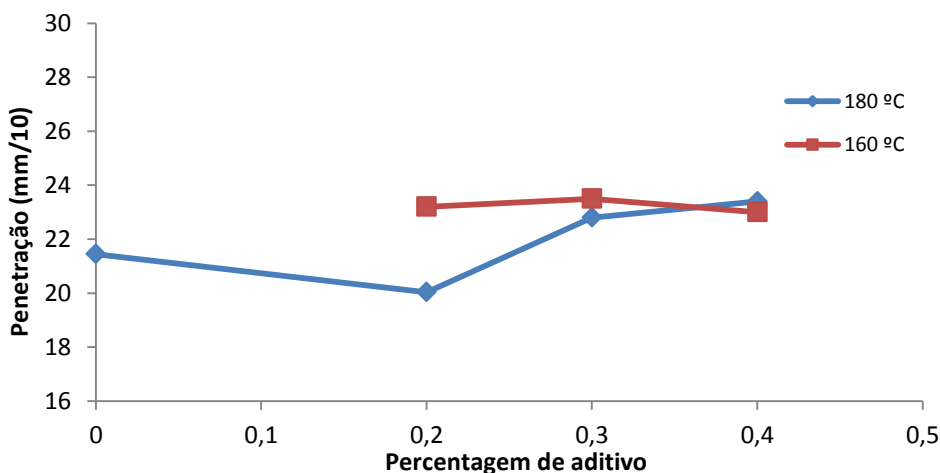


Figura 39 - Penetração do BMB produzido com diferentes percentagens de Rediset



Através da Figura 40 pode observar-se a penetração de betumes produzidos com Iterflow, sendo que com 0.2 % de aditivo a penetração aumenta comparativamente ao betume sem aditivo, quer para 180°C quer para 160 °C.

Com o aumento da percentagem de aditivo a penetração diminui, sendo que para 0.4% de aditivo a penetração é ligeiramente superior à verificada para 0.3%. No entanto, esta diferença não é significativa dada a gama de valores envolvidos.

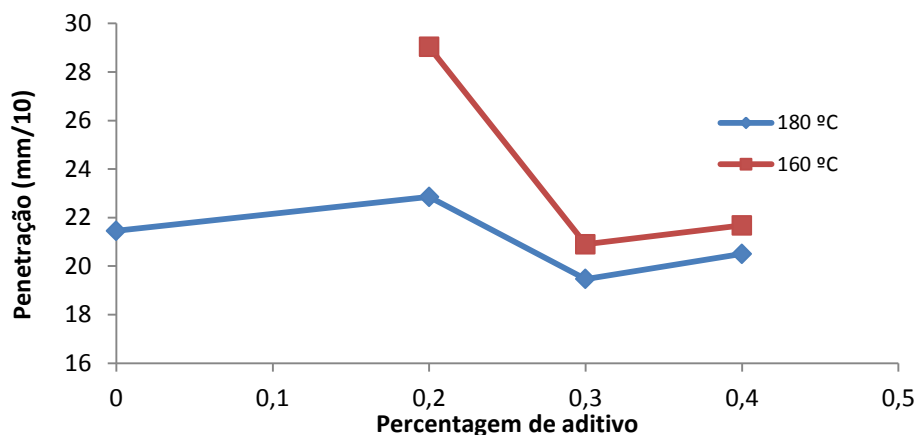


Figura 40 - Penetração do BMB produzido com diferentes percentagens de Iterlow

Na Figura 41 apresentam-se os resultados da penetração para diferentes temperaturas de produção dos Betumes Modificados com Borracha com aditivos redutores de temperatura.

Esta análise foi realizada para os Betumes Modificados com Borracha com adição de 3% nos casos dos aditivos orgânicos (Sasobit e Leadcap) e para 0.3% nos casos dos aditivos químicos (Rediset e Iterlow). As temperaturas de produção estudadas foram de 140, 160 e 180°C.

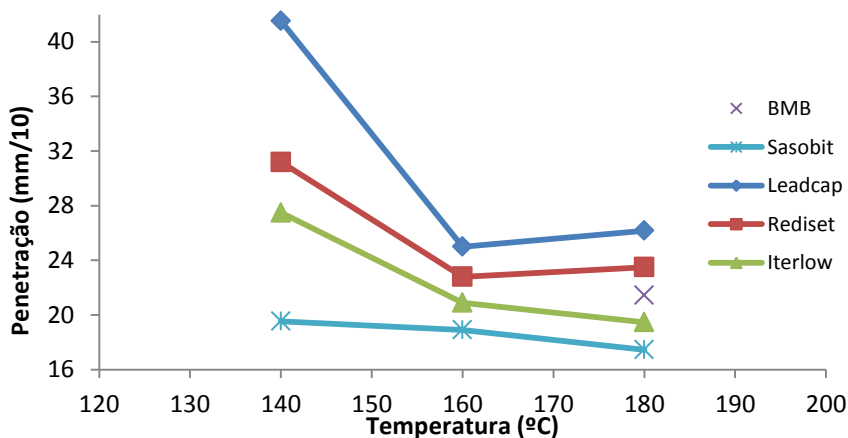


Figura 41 - Influência da temperatura na penetração do BMB

Os resultados da Figura 41 demonstram que o Betume Modificado com Borracha aditivado tem uma penetração que diminui à medida que se aumenta a temperatura verificando-se que para o Leadcap e para o Rediset há um aumento da penetração ao passar de 160 °C para 180°C. Nesta figura também se pode observar o posicionamento do BMB aditivado comparativamente ao BMB sem aditivo, principalmente para 180 °C não podendo o posicionamento ser atribuído à natureza do aditivo.

### 4.3. Viscosidade dinâmica

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de viscosidade dinâmica realizados com um viscosímetro rotacional.

A Figura 42 apresenta a viscosidade dinâmica do BMB aditivado com diferentes percentagens de Sasobit produzido a 160°C.

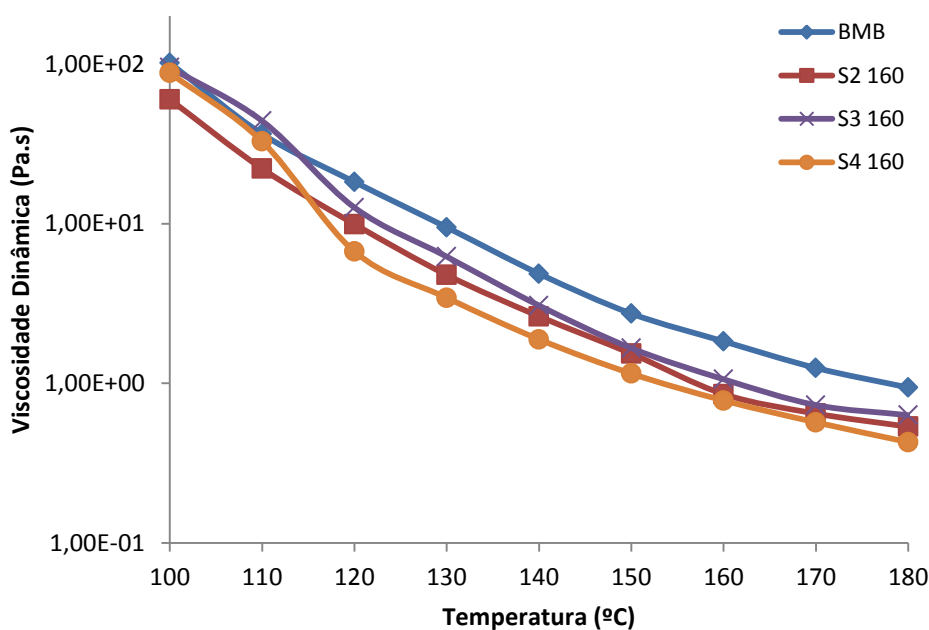


Figura 42 - Viscosidade dinâmica do BMB aditivado com diferentes percentagens de Sasobit

Os resultados na Figura 42 demonstram que a adição de Sasobit ao BMB teve influência na viscosidade, reduzindo-a comparativamente ao BMB sem aditivo. Em BMB aditivado com 3 e 4% de Sasobit produzido a 160 °C nota-se a cristalização da Sasobit no patamar dos 110°C em que há uma redução da viscosidade.

Segundo os resultados anteriores, 2% é uma adequada percentagem deste aditivo, porque com esta quantidade não ocorre a cristalização do BMB aditivado.

As Figuras 43 e 44 dizem respeito respetivamente à influência da quantidade de aditivo Leadcap e da temperatura na viscosidade do BMB.

A análise da influência da percentagem de Leadcap no BMB é inferior à observada para o BMB não aditivado, não havendo influência da percentagem de Leadcap para temperaturas superiores a 130 °C. Abaixo desta temperatura, apenas para 4% de Leadcap é que se verifica um menor efeito do aditivo.

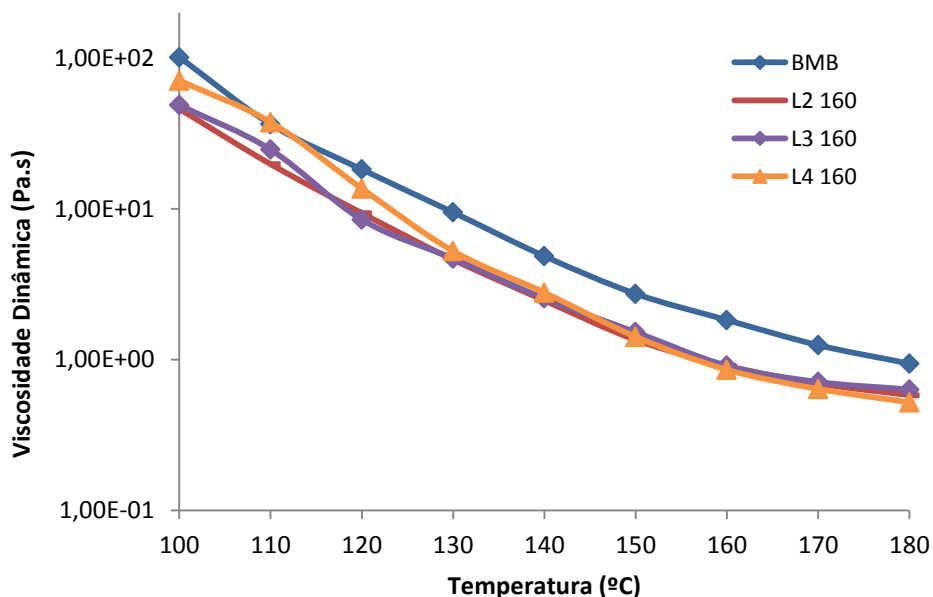


Figura 43 - Influência da percentagem de Leadcap na viscosidade do BMB

Quanto à influência da temperatura de produção do BMB na viscosidade, verifica-se que o aumento da temperatura de produção aumenta a viscosidade do BMB, podendo isto ser justificado pelo facto do aumento da temperatura aumentar a interação do betume com a borracha.

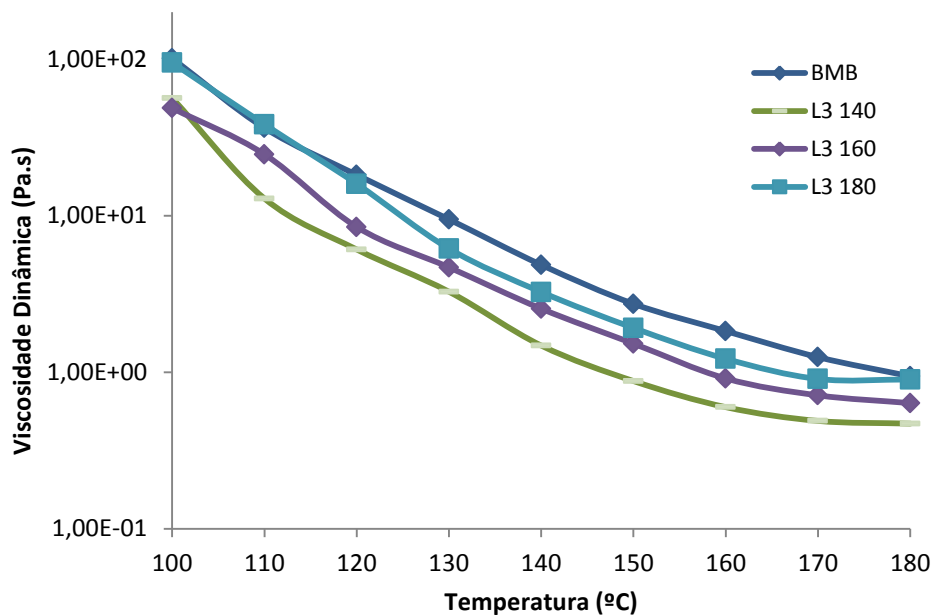


Figura 44 - Influência da temperatura na viscosidade do BMB aditivado com Leadcap

Quanto à influência da quantidade de Rediset na viscosidade dinâmica do BMB, a Figura 45 apresenta os resultados para o BMB produzido a 160°C, podendo concluir-se que para as percentagens de aditivo estudadas, a quantidade de aditivo não tem grande influência nos resultados da viscosidade. É também de referir que a viscosidade dos BMB aditivados com Rediset é ligeiramente inferior ao BMB convencional.

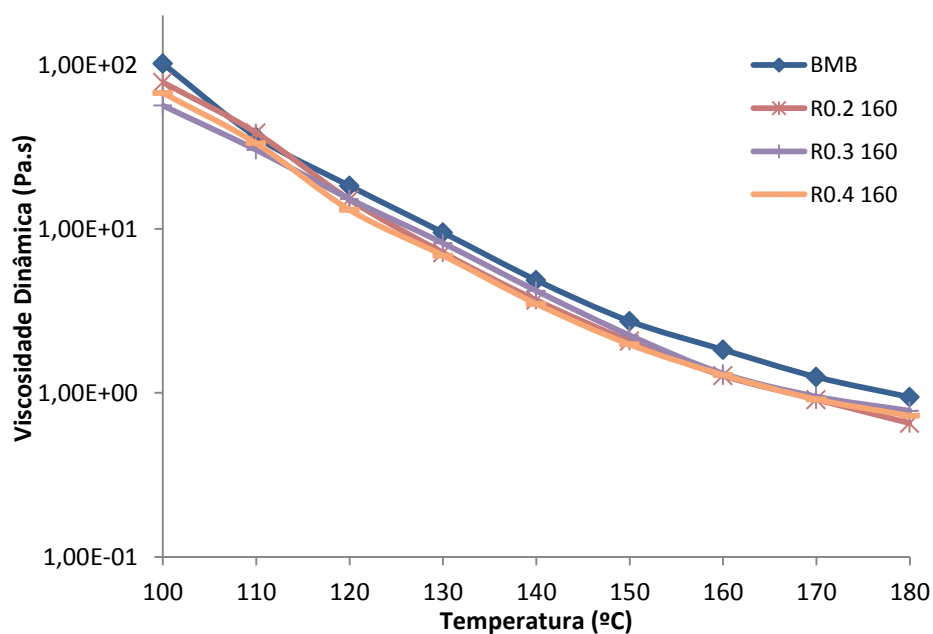


Figura 45 - Influência da percentagem de Rediset na viscosidade do BMB

A influência do Iterlow no BMB é apresentada nas Figuras 46 e 47, respectivamente para a quantidade de aditivo e para a temperatura de produção do BMB.

Quanto à percentagem de aditivo utilizada a 160 °C pode concluir-se que permite reduzir a viscosidade do BMB, sendo que para 0.2% de aditivo a redução da viscosidade é pouco significativa ou nula se a temperatura for inferior a 130°C. Para 0.3 e 0.4 % de aditivo a viscosidade é muito semelhante e é inferior a viscosidade da mistura de referência.

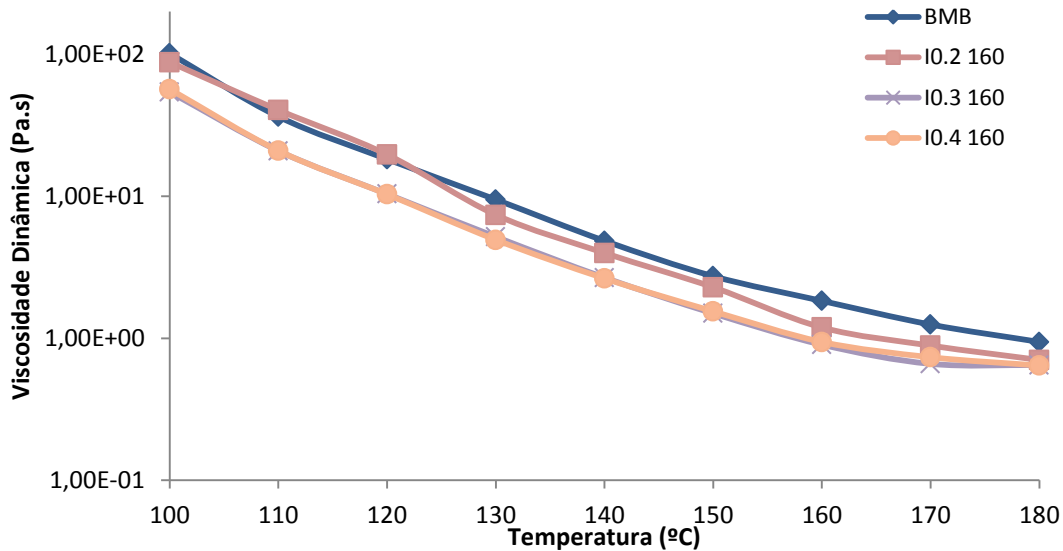


Figura 46 - Influência da percentagem de Iterlow na viscosidade do BMB

Quanto à temperatura de produção do BMB verifica-se que a viscosidade diminui, comparativamente ao BMB convencional, para as temperaturas de 160 e 180 °C. Para 140 °C, a viscosidade é superior ao BMB não aditivado.

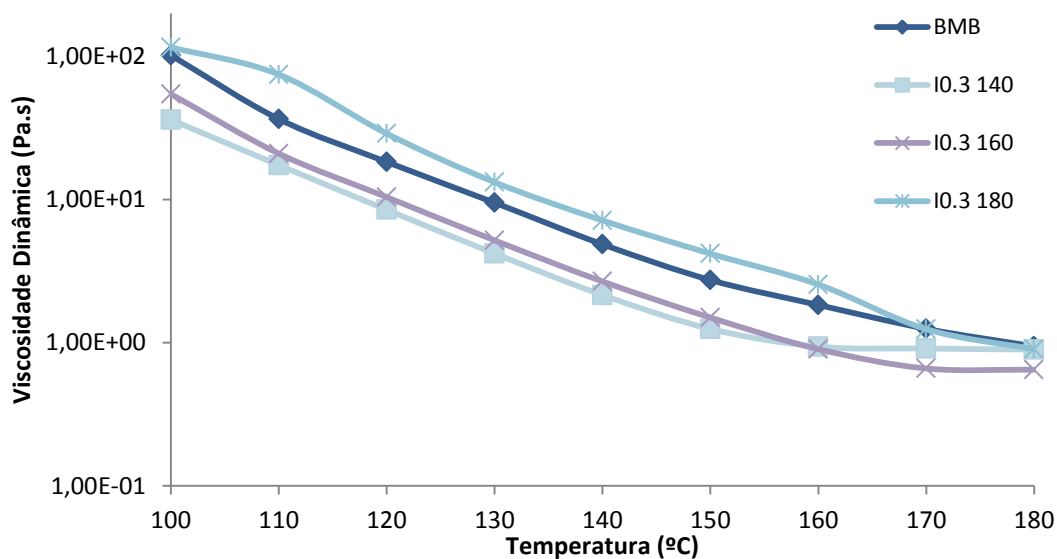


Figura 47 - Influência da temperatura na viscosidade do BMB com Iterlow

#### 4.4. Resiliência

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados do ensaio de resiliência para o estudo da influência dos aditivos e da temperatura na produção do Betume Modificado com Borracha.

As Figuras 48 e 49 dizem respeito a influência dos aditivos orgânicos na produção de Betume Modificado com Borracha aditivado.

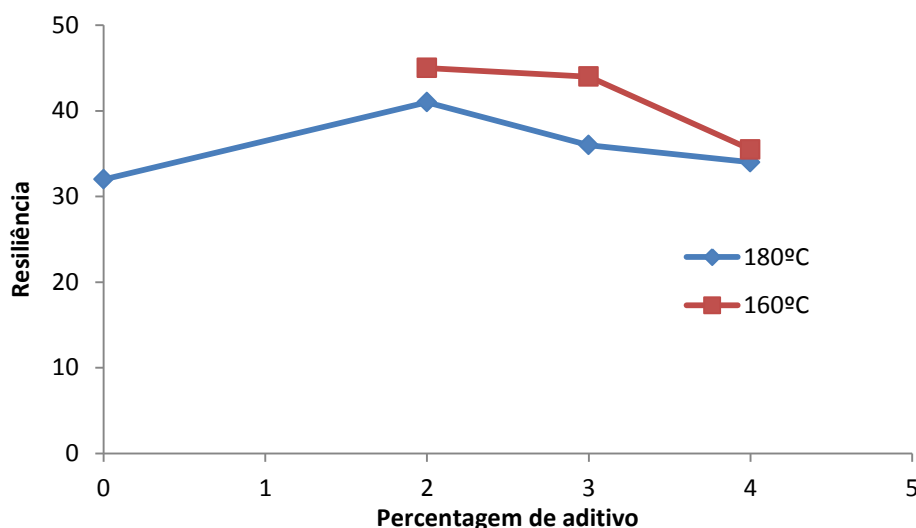


Figura 48 - Resiliência do BMB com diferentes percentagens de Sasobit

Com se pode observar através da Figura 48, os Betumes Modificados com Borracha aditivados com Sasobit apresentam uma resiliência maior do que Betumes Modificados com Borracha sem aditivo. A resiliência varia de forma inversa com a percentagem de aditivo, isto é, quanto maior a percentagem de aditivo, menor é a resiliência. Verifica-se também que Betumes Modificados com Borracha aditivados com Sasobit produzidos a 160 °C apresentam maior resiliência do que Betumes Modificados com Borracha aditivados com Sasobit produzidos a 180 °C.

Quanto à utilização de Leadcap, os resultados da Figura 49 demonstra que a aditivação do BMB aumenta a resiliência. Também se pode verificar que quanto maior a quantidade de aditivo, menor é a resiliência. Os Betumes Modificados com Borracha aditivados com Leadcap apresentam maior resiliência quando são produzidos a 180 °C do que quando são produzidos a 160 °C.

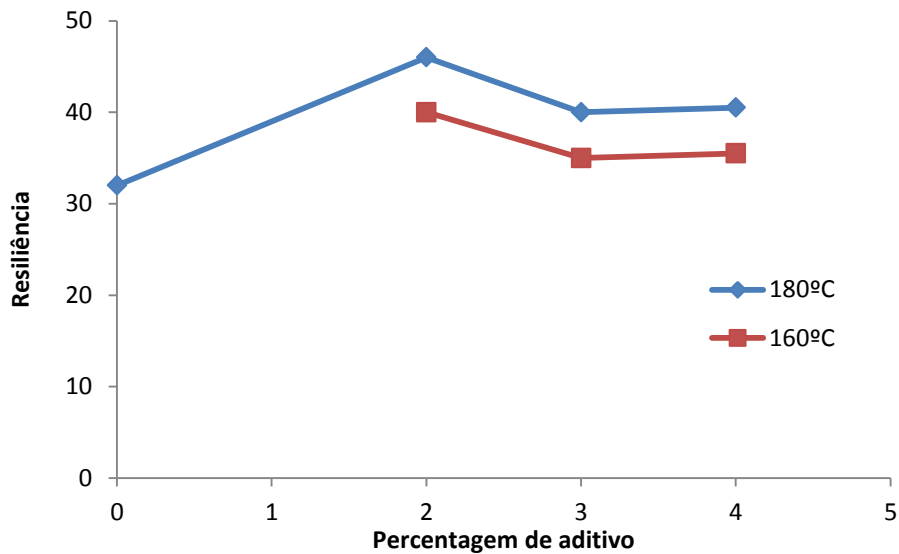


Figura 49 - Resiliência do BMB com diferentes percentagens de Leadcap

Nas Figuras 50 e 51 apresentam-se os resultados do ensaio de resiliência para o estudo da influência de aditivos químicos (Rediset e Iterlow) na produção de Betumes Modificados com Borracha.

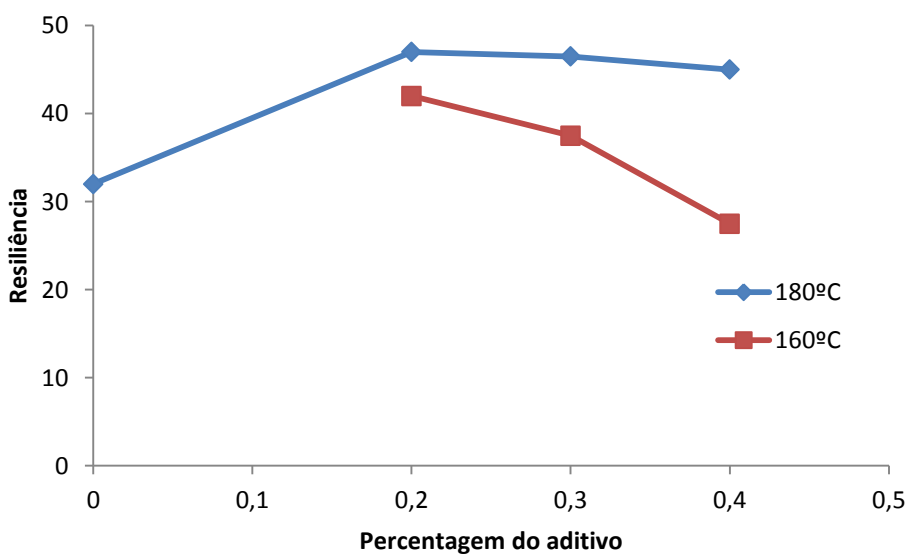


Figura 50 - Resiliência do BMB com diferentes percentagens de Rediset

Na Figura 50 pode observar-se que Betumes Modificados com Borracha aditivados com Rediset apresentam maior resiliência do que Betumes Modificados com Borracha sem aditivo e que os betumes produzidos a 160 °C apresentam uma resiliência mais baixa do que os mesmos produzidos a 180 °C. No caso do Betume Modificado com Borracha aditivado com

0.4% de Rediset produzido a 160 °C, a resiliência chega a ser mais baixa do que no betume de referência. Pode também depreender que quanto maior a percentagem de aditivo, menor é a resiliência.

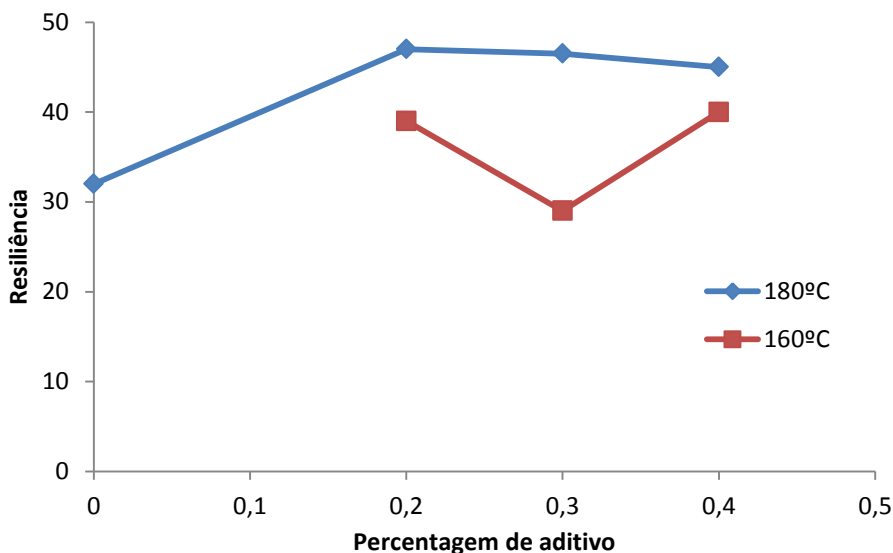


Figura 51 - Resiliência do BMB com diferentes percentagens de Iterlow

Quanto à utilização de Iterlow (Figura 51) pode concluir-se que a aditivação do BMB aumenta a resiliência. No entanto, quanto maior a percentagem de aditivo, menor é a resiliência para betumes modificados com borracha produzidos a 180 °C. Quanto aos resultados do Betume Modificado com Borracha aditivados com Iterlow produzidos a 160 °C, estes apresentam resultados um pouco diferentes do esperado. Mantêm-se a tendência para diminuir a resiliência com o aumento da percentagem de aditivo. No entanto, para 0.4 % de Iterlow a resiliência aumenta de forma inesperada, podendo isto dever-se a um erro na realização do ensaio uma vez que para todos os outros Betumes aditivados a resiliência diminui com o aumento da percentagem de aditivo.

De seguida (Figura 52) apresentam-se os resultados do ensaio de resiliência para BMB produzido a diferentes temperaturas. Para este estudo adotou-se as percentagens de 3% para aditivos orgânicos e 0.3% para aditivos químicos. As temperaturas de produção do betume modificado com borracha aditivado são de 140, 160 e 180 °C.



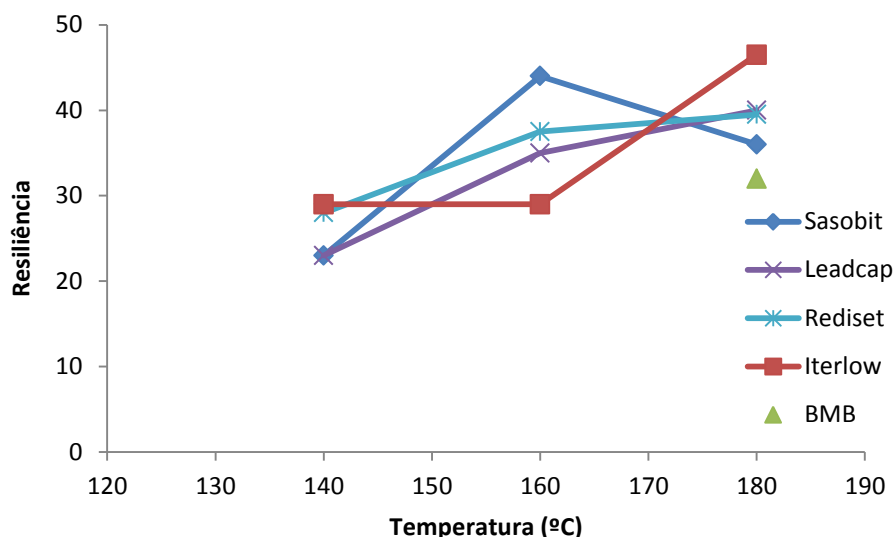


Figura 52 - Resiliência do BMB produzido a diferentes temperaturas

A observação dos resultados da Figura 52 permite observar a tendência de aumento da resiliência com o aumento da temperatura. Esta tendência é quase linear para os aditivos Rediset e Leadcap sendo que para os outros verifica-se que a 160 °C os resultados apresentam algum afastamento desta tendência.

Quanto à posição relativa de cada aditivo, ela não é clara para todas as percentagens, principalmente devido aos resultados verificados a 160 °C. Em relação ao BMB não aditivado, a presença de aditivo aumenta a resiliência do BMB.

#### 4.5. Reologia

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados do ensaio de reologia para o estudo da influência dos aditivos e da temperatura na produção do Betume Modificado com Borracha.

Nas Figuras 53 e 54 estão representadas respectivamente, a influência da percentagem de aditivo e da temperatura de produção para 3% de aditivo no módulo complexo de corte do Betume Modificado com Borracha aditivado com Sasobit.

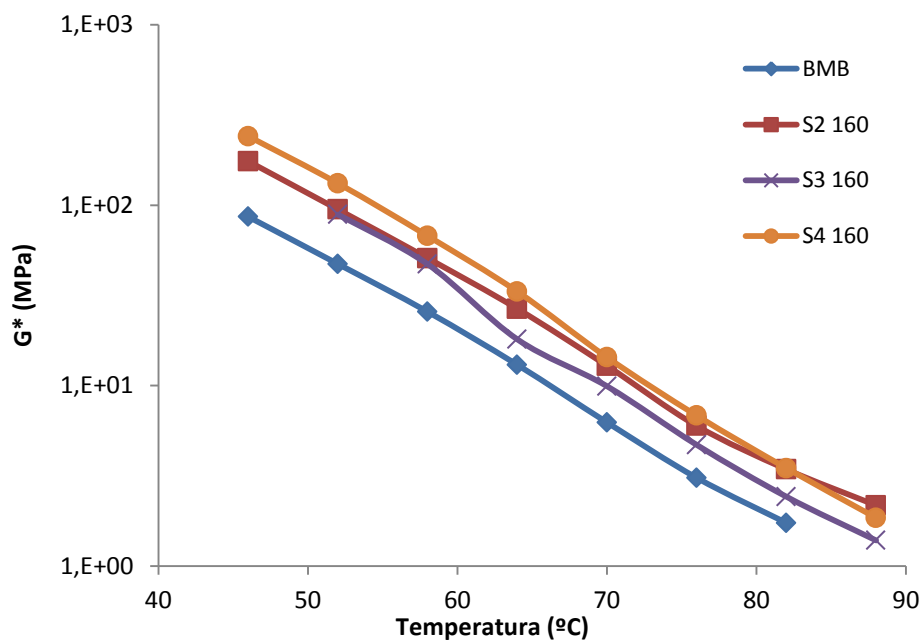


Figura 53 - Influência da porcentagem de Sasobit no módulo complexo de corte do BMB

Como se pode observar na Figura 53, os betumes modificados com borracha aditivados com Sasobit apresentam um módulo complexo de corte maior do que o betume de referência, não havendo grande influência da porcentagem de aditivo no módulo.

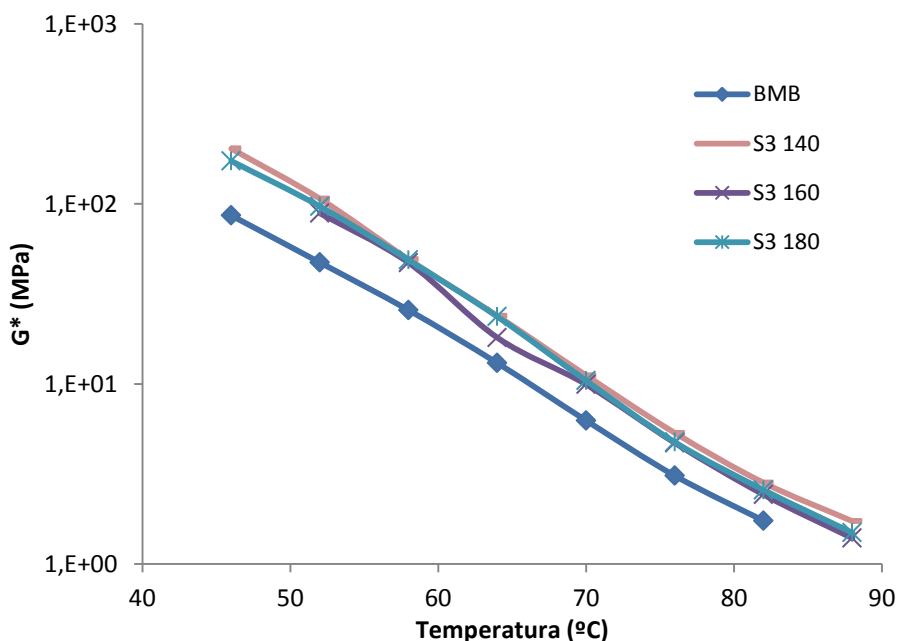


Figura 54 - Influência da temperatura de produção no módulo complexo de corte do BMB com Sasobit

Conforme está representado na Figura 54, os betumes modificados com borracha aditivados com Sasobit apresentam resultados muito semelhantes quando produzidos a 140, 160 e

180 °C. Também é possível verificar que a adição de Sasobit ao Betume aumenta o módulo complexo de corte.

A influência da percentagem de aditivo no módulo complexo de corte do betume modificado com borracha aditivado com Leadcap produzido a 160 °C é apresentada na Figura 55, onde se pode verificar que os betumes aditivados com 2 e 4 % de Leadcap apresentam um módulo complexo de corte ligeiramente inferior ao do betume de referência. No entanto, a diferença para o betume sem aditivo é extremamente reduzida.

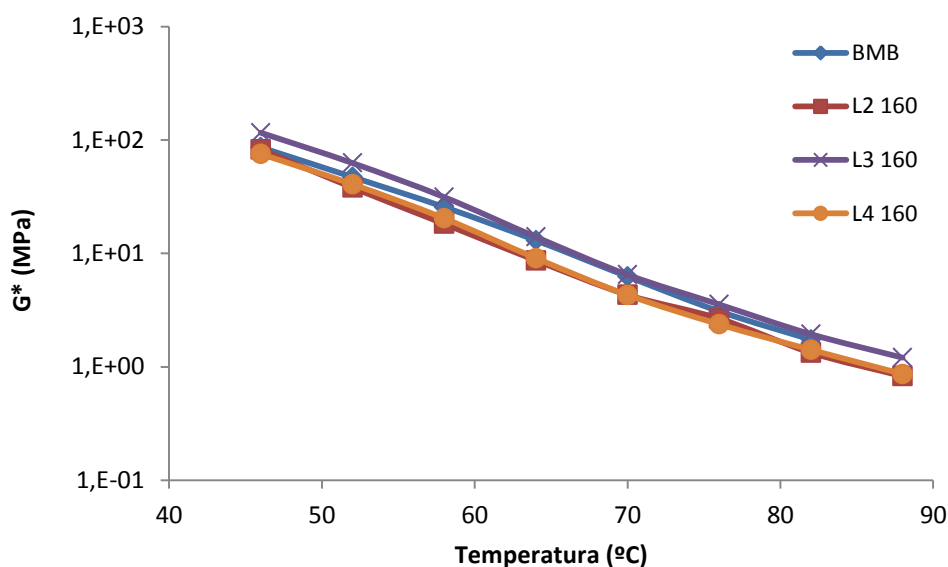


Figura 55 - Influência da percentagem de Leadcap no módulo complexo de corte do BMB

Na Figura 56 está representada a influência da temperatura de produção na viscosidade do Betume Modificado com Borracha aditivado com Leadcap produzido com 3% de Leadcap, verificando-se resultados muito semelhantes para as várias temperaturas de produção do BMB, e semelhantes aos do BMB sem aditivo.

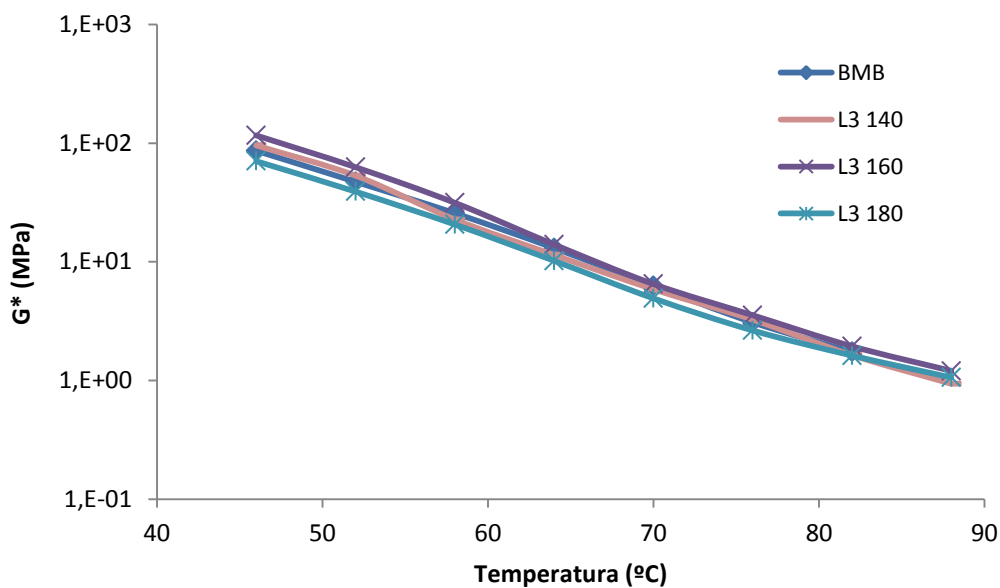


Figura 56 - Influência da temperatura de produção no módulo complexo do BMB com Leadcap

Nas Figuras 57 e 58 estão representadas respetivamente, a influência da percentagem de aditivo e da temperatura de produção para 0.3% de aditivo no módulo complexo de corte do Betume Modificado com Borracha aditivado com Rediset.

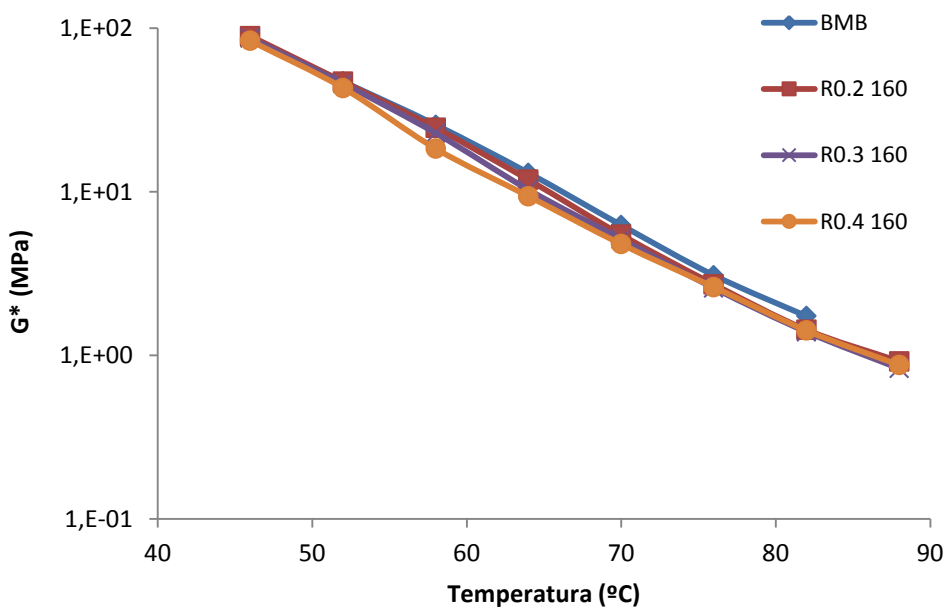


Figura 57 - Influência da percentagem de Rediset no módulo complexo de corte do BMB

A análise à Figura 57 permite concluir que o Betume Modificado com Borracha aditivado com Rediset apresenta menor módulo complexo de corte quando comparado com o Betume de referência. Também é visível que quanto maior a percentagem de aditivo, menor é o

módulo complexo de corte, sendo que todas estas diferenças não têm significado na gama de valores envolvidos.

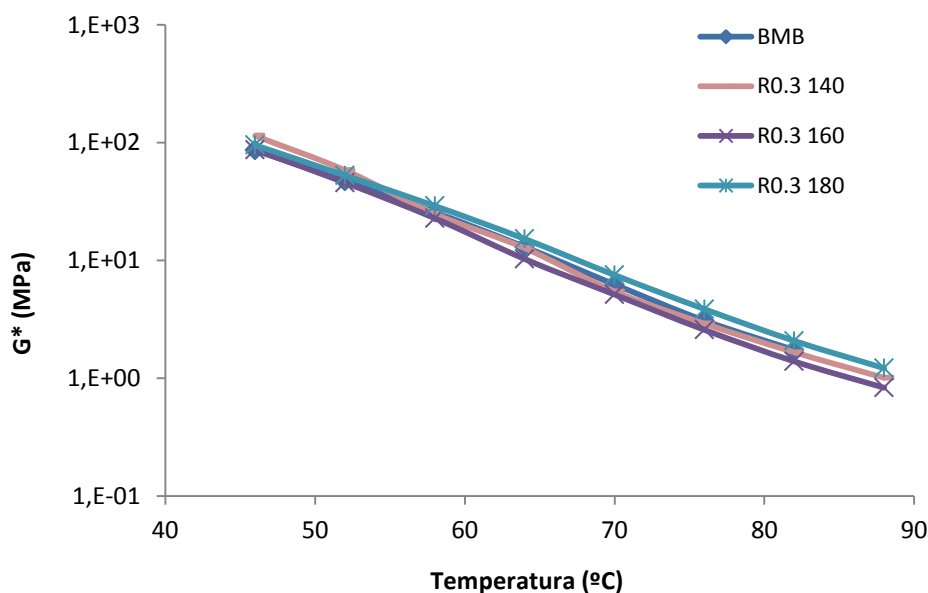


Figura 58 - Influência da temperatura de produção no módulo complexo de corte do BMB com Rediset

A análise da Figura 58 permite concluir que os betumes modificados com borracha aditivados com Rediset produzidos a temperaturas mais baixas apresentam resultados muito semelhantes ao betume de referência.

A Figura 59 apresenta o resultado da influência da percentagem de aditivo no módulo complexo de corte do Betume Modificado com Borracha aditivado com Iterlow produzido a 160 °C. A análise desta figura permite concluir que o betume aditivado com 0.2% de Iterlow produzido a 160°C apresenta maior módulo complexo de corte do que o betume de referência. Já o betume aditivado com 0.4% de Iterlow produzido a 160 °C apresenta menor módulo complexo de corte quando comparado com o betume de referência. No entanto, as diferenças observadas quase não têm significado, podendo concluir-se pela reduzida influência da percentagem de aditivo no módulo complexo de corte.

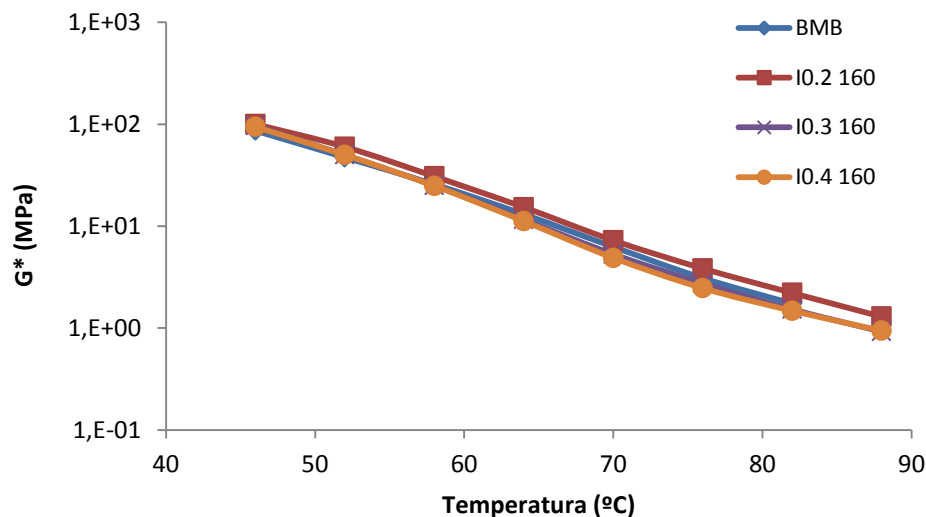


Figura 59 - Influência da percentagem de Iterlow no módulo complexo de corte do BMB

Na Figura 60 está representada a influência da temperatura de produção no módulo complexo de corte do Betume Modificado com Borracha aditivado com 0.3 % de Iterlow, podendo concluir-se que o betume modificado com Iterlow produzido a 140 °C e a 160 °C apresenta módulo complexo de corte idêntico ao betume de referência, enquanto que o módulo complexo de corte do betume modificado com borracha com Iterlow produzido a 180 °C é superior ao módulo complexo de corte do betume de referência.

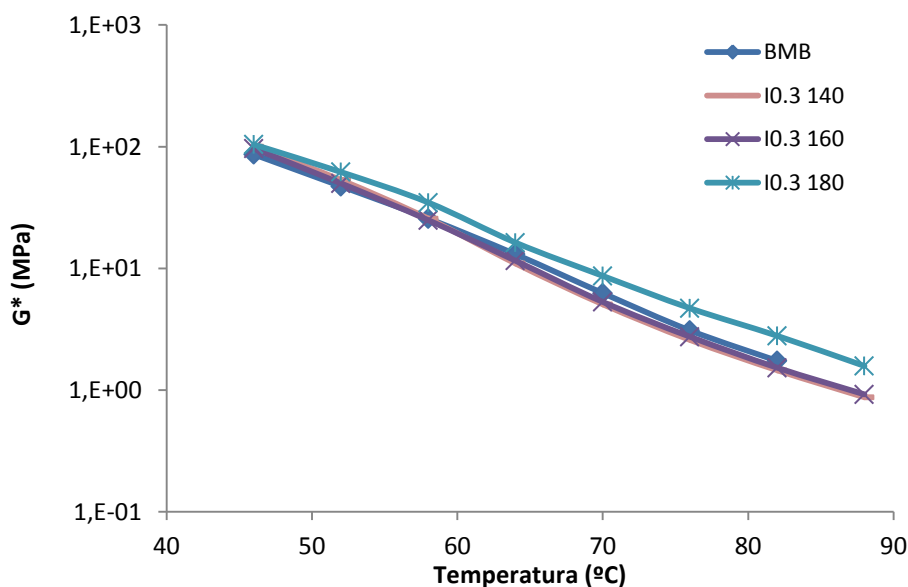


Figura 60 - Influência da temperatura de produção no módulo complexo de corte do BMB com Iterlow

A Figura 61 traduz a influência da percentagem de aditivo no ângulo de fase do Betume Modificado com Borracha aditivado com Sasobit produzido a 160 °C. Como se pode verificar, o ângulo de fase diminui com o aumento da percentagem de aditivo. O betume modificado com borracha aditivado com 2% de Sasobit só tem um ângulo de fase maior que o betume de referência até aos 60°C. Desde essa temperatura o betume de referência tem ângulo de fase maior.

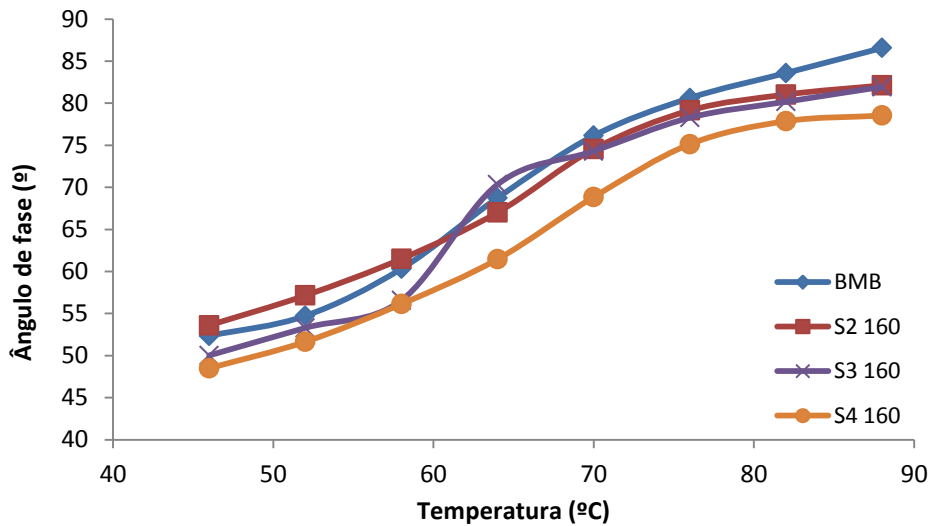


Figura 61 - Influência da percentagem de Sasobit no ângulo de fase do BMB

A Figura 62 apresenta a influência da temperatura no ângulo de fase do Betume Modificado com Borracha aditivado com 3% de Sasobit, não sendo perceptível a influência da temperatura de produção do betume, principalmente devido ao facto dos valores obtidos são muito idêntico e relativamente irregulares.

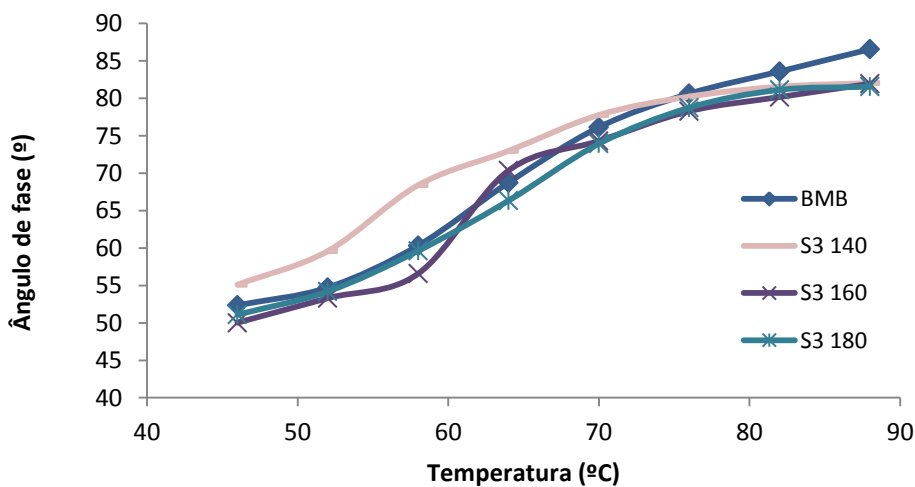


Figura 62 - Influência da temperatura no ângulo de fase do BMB aditivado com Sasobit

A Figura 63 representa a influência da percentagem de aditivo no ângulo de fase do Betume Modificado com Borracha aditivado com Leadcap produzido a 160°C, podendo concluir-se que os betumes aditivados apresentam um ângulo de fase maior do que o betume de referência até aos 76°C. Também é visível que o ângulo de fase diminui com o aumento da percentagem de Leadcap.

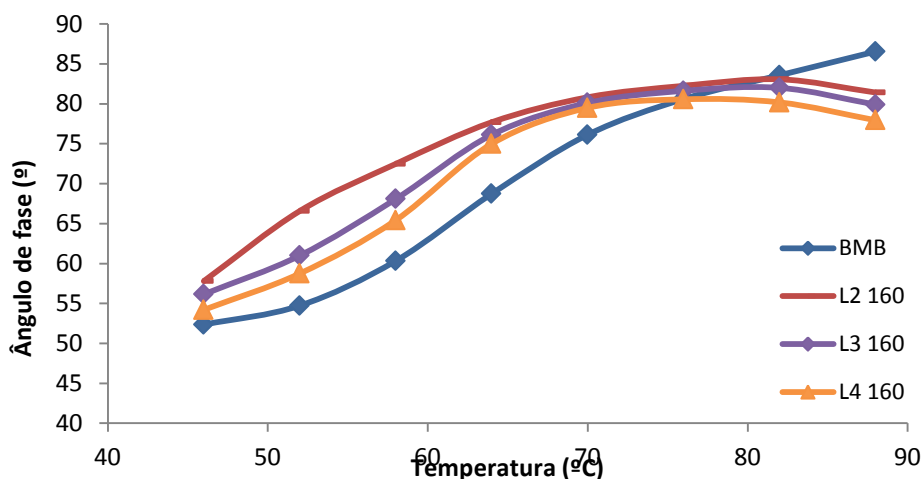


Figura 63 - Influência da percentagem de Leadcap no ângulo de fase do BMB

A Figura 64 apresenta a influência da temperatura no ângulo de fase do Betume Modificado com Borracha aditivado com 3% de Leadcap, sendo possível concluir que até 76 °C os betumes aditivados apresentam um ângulo de fase superior ao betume de referência. É também perceptível que até 76 °C o ângulo de fase é mais baixo para misturas produzidas a temperaturas mais elevadas.

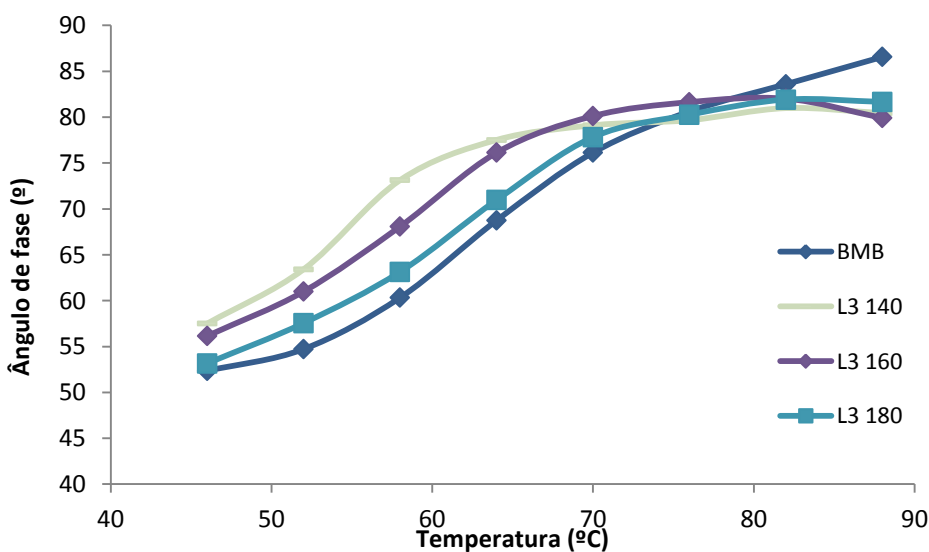


Figura 64 - Influência da temperatura no ângulo de fase do BMB aditivado com Leadcap



Nas Figuras 65 e 66 apresentam-se os resultados do ângulo de fase para os betumes aditivados com Rediset, respetivamente quanto à influência da percentagem de aditivo e da temperatura de produção para 0.3% de aditivo.

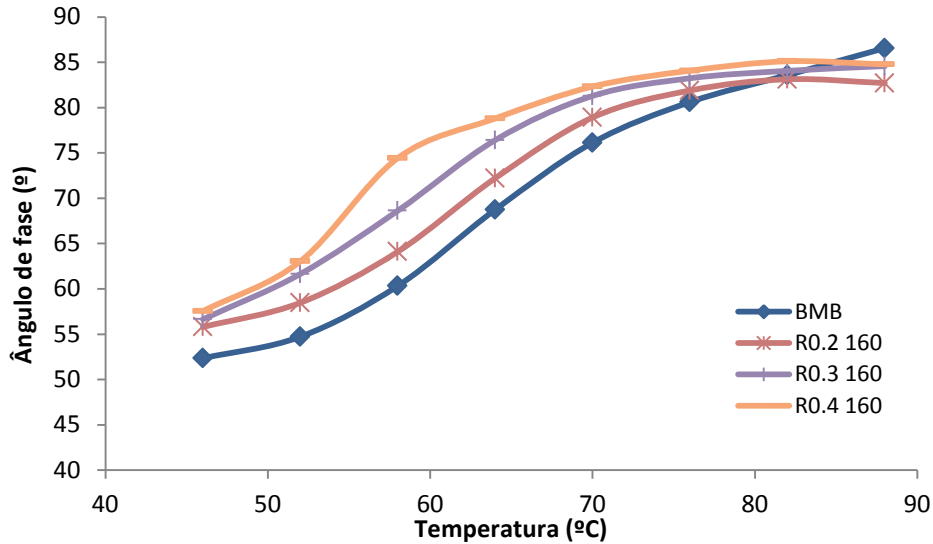


Figura 65 - Influência da percentagem de Rediset no ângulo de fase do BMB

Como se pode ver na Figura 65, para betumes modificados com borracha aditivados com Rediset, o ângulo de fase aumenta com o aumento da percentagem de Rediset. Até aos 82 °C o ângulo de fase dos betumes aditivados é maior do que o ângulo de fase do betume de referência. Verifica-se também que o aumento da percentagem de aditivo aumenta o ângulo de fase.

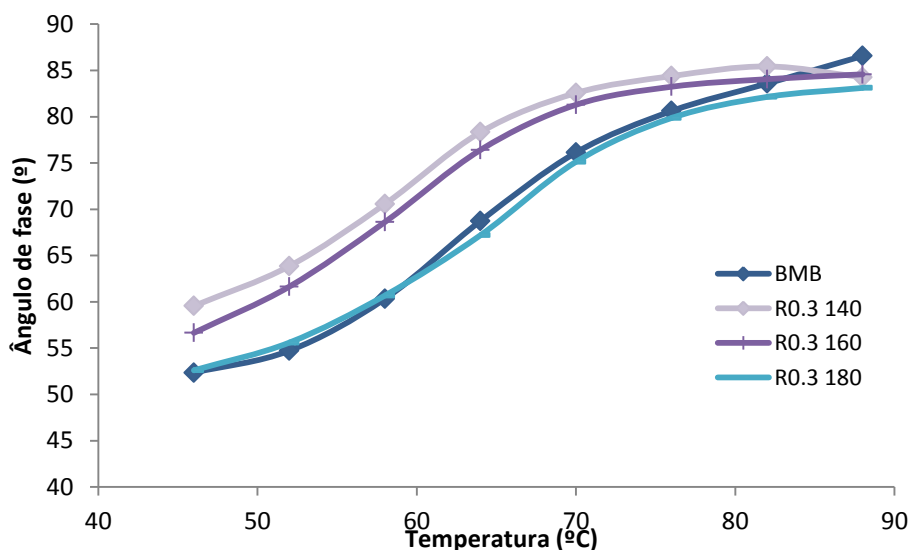


Figura 66 - Influência da temperatura na produção de BMB aditivado com Rediset

Como se pode observar através da Figura 66, o aumento da temperatura de produção do betume faz diminuir o ângulo de fase, verificando-se que para 180°C o ângulo de fase é idêntico para betume aditivado e betume não aditivado.

Na Figura 67 está representada a influência da percentagem de aditivo em betumes modificados com borracha aditivados com Iterlow, podendo concluir-se que a utilização de Iterlow na produção de Betume Modificado com Borracha aditivado aumenta o ângulo de fase, fazendo com que este seja maior para Betumes aditivados do que para o betume de referência. Quanto à percentagem de aditivo, não é evidente a sua influência no ângulo de fase.

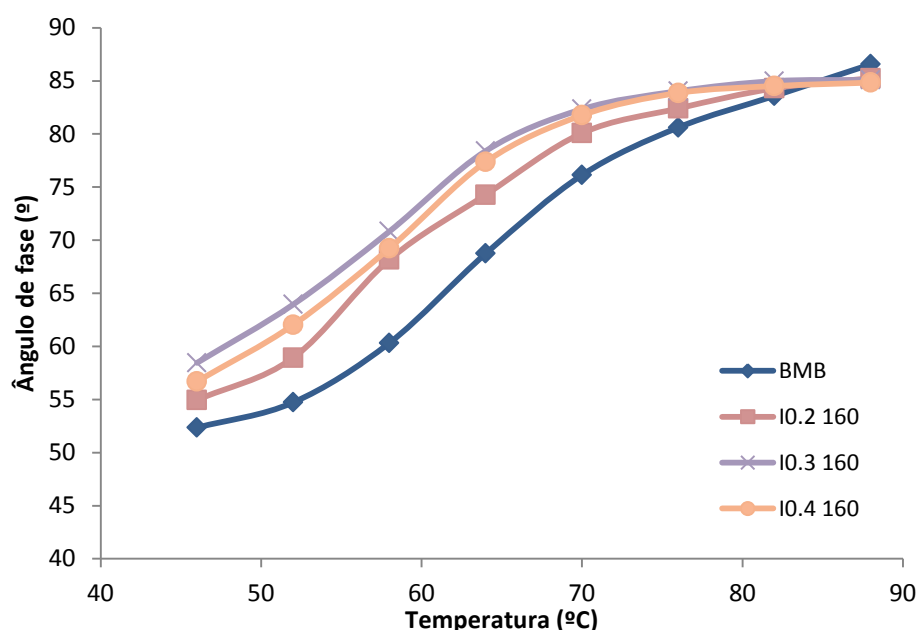


Figura 67 - Influência da percentagem de Iterlow no ângulo de fase do BMB

A Figura 68 traduz a influência da temperatura na produção de Betume Modificado com Borracha aditivado com 0.3% de Iterlow e produzido a 140, 160 e 180 °C. Como se pode verificar, o ângulo de fase diminui com o aumento da temperatura de produção, isto é, betumes aditivado com Iterlow produzidos a 140°C têm maior ângulo de fase do que betumes aditivados com Iterlow produzidos a 180°C. É também possível verificar que os betumes aditivados produzidos a 140 e 160°C tem maior ângulo de fase do que o betume de referência.

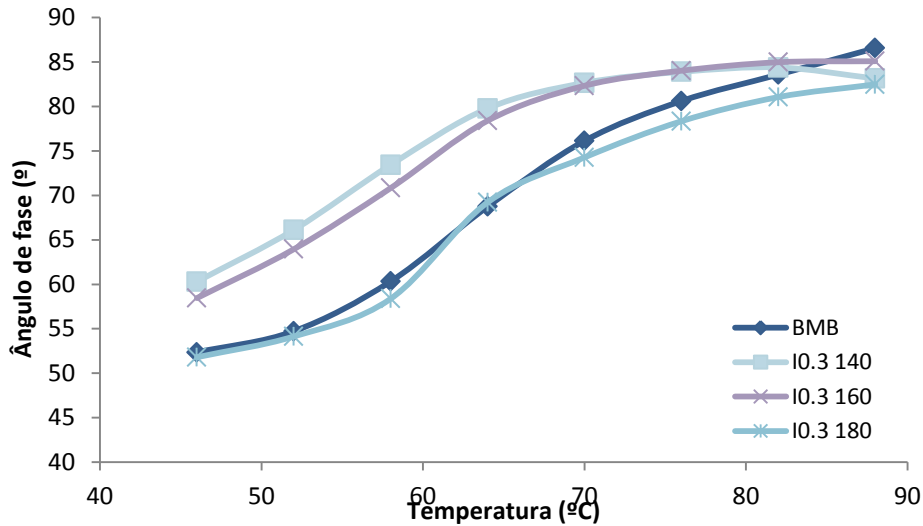


Figura 68 - Influência da temperatura no ângulo de fase do BMB aditivado com Iterlow

Após os ensaios de reologia em que foi determinado o módulo complexo de corte e o ângulo de fase, as amostras de betume foram utilizadas para determinar a viscosidade do BMB a baixas temperaturas, permitindo assim obter a viscosidade para uma gama de temperaturas desde os 46 °C até aos 88 °C (ensaios com reómetro) e dos 100 °C aos 180 °C (ensaios com viscosímetro Brookfield).

Os resultados da viscosidade obtido para baixas temperaturas com reómetro dinâmico de corte encontram-se nas Figuras 69 a 76, para as mesmas configurações utilizadas nos ensaios de reologia.

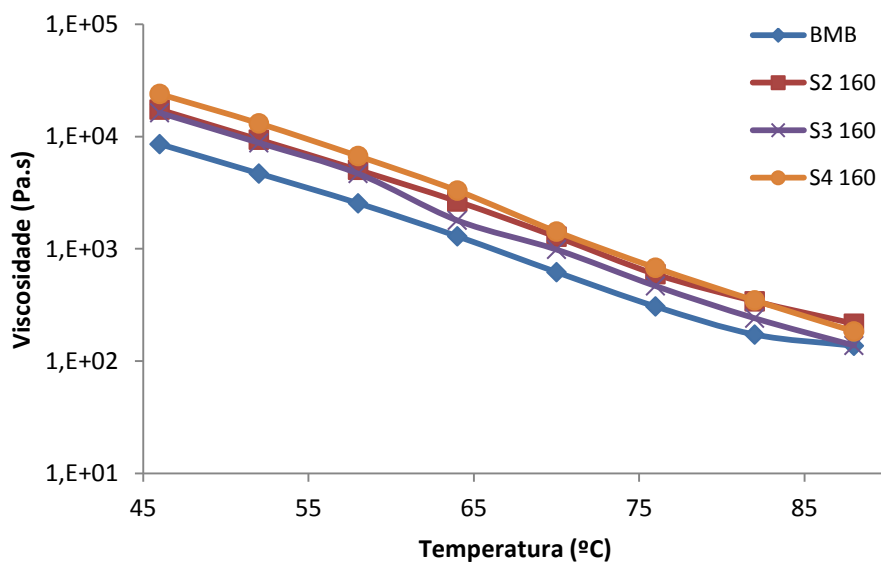


Figura 69 - Influência da percentagem de Sasobit na viscosidade do BMB

O comportamento da viscosidade para os vários aditivos e para as várias temperaturas de produção do BMB é extremamente idêntico, exceto para o caso do Sasobit, sendo que a viscosidade dos betumes aditivados é muito idêntica à obtido para o BMB não aditivado.

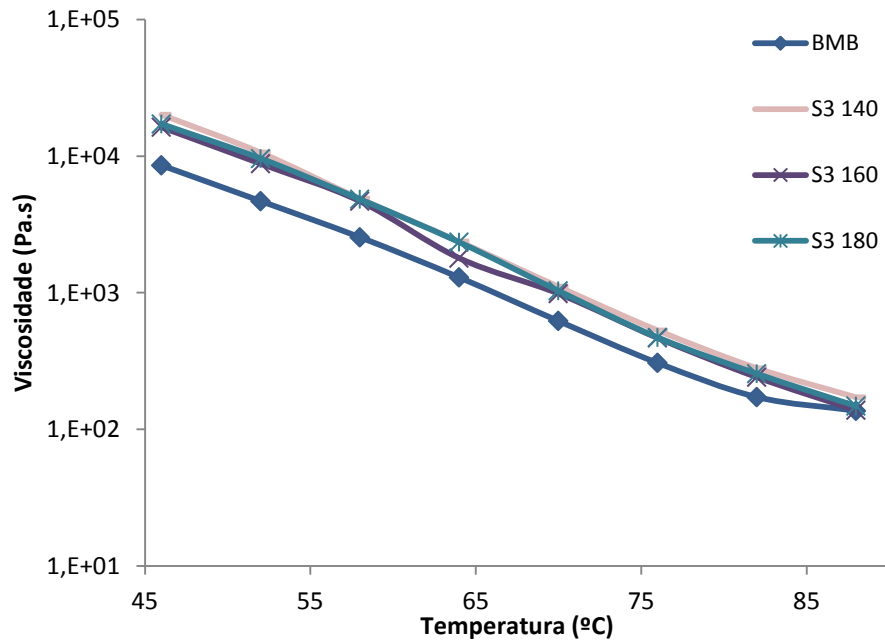


Figura 70 - Influência da temperatura na produção na viscosidade do BMB aditivado com Sasobit

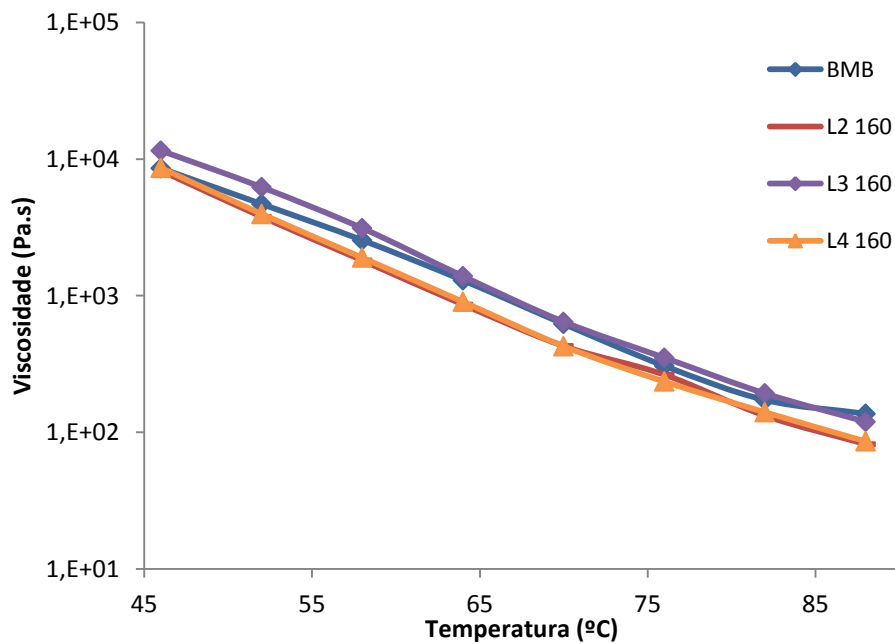


Figura 71 - Influência da percentagem de Leadcap na viscosidade do BMB

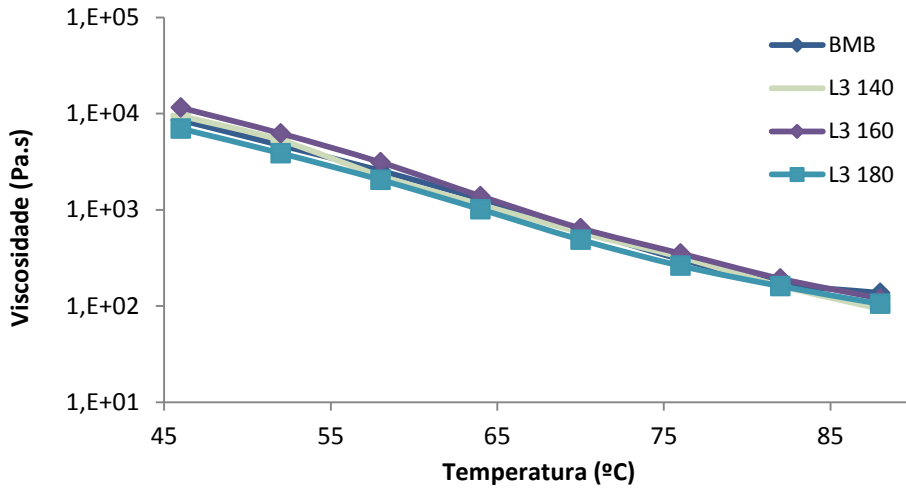


Figura 72 - Influência da temperatura de produção na viscosidade do BMB aditivado com Leadcap

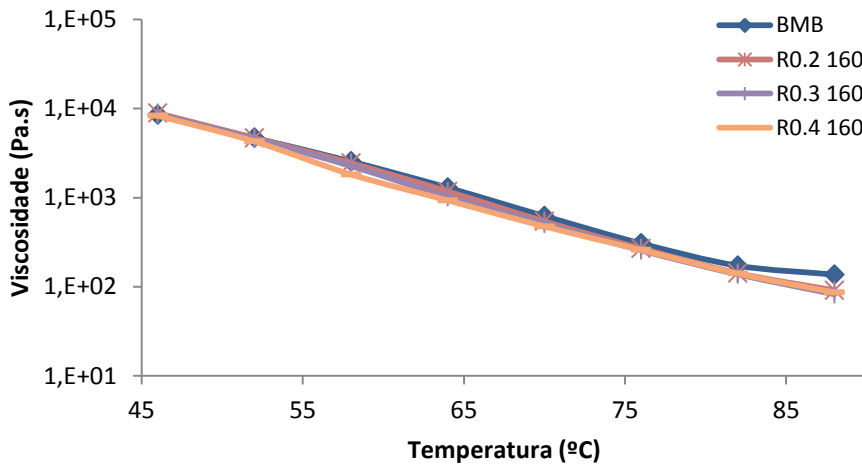


Figura 73 - Influência da percentagem de Rediset na viscosidade do BMB

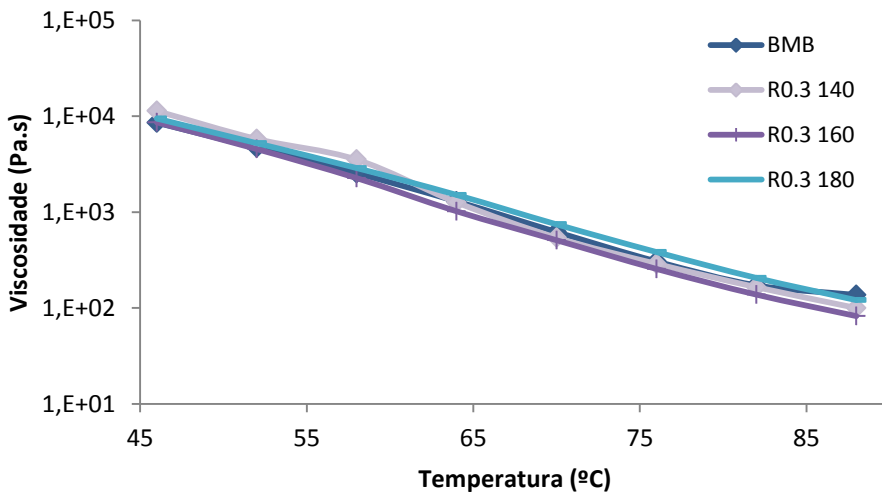


Figura 74 - Influência da temperatura na produção do BMB aditivado com Rediset

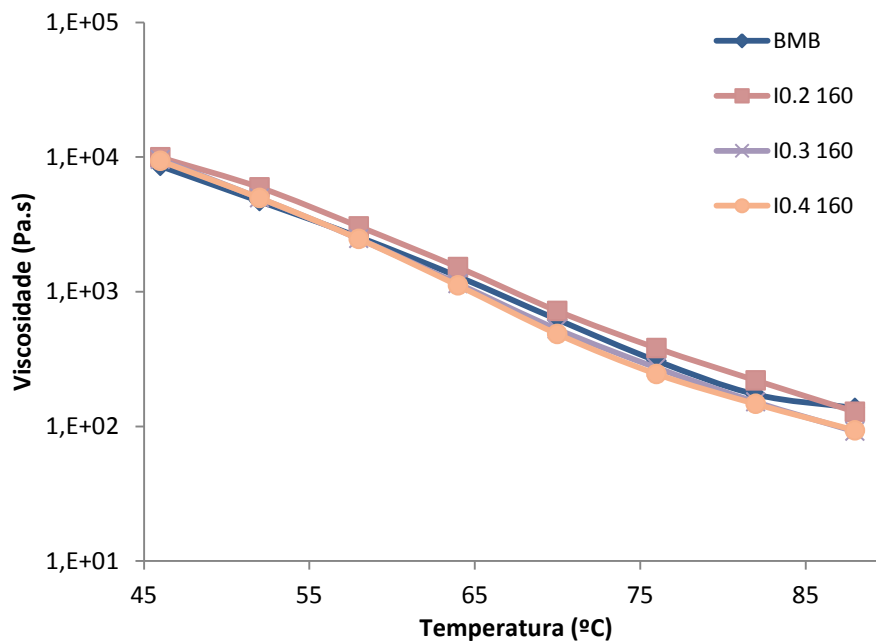


Figura 75 - Influência da percentagem de Iterlow na viscosidade do BMB

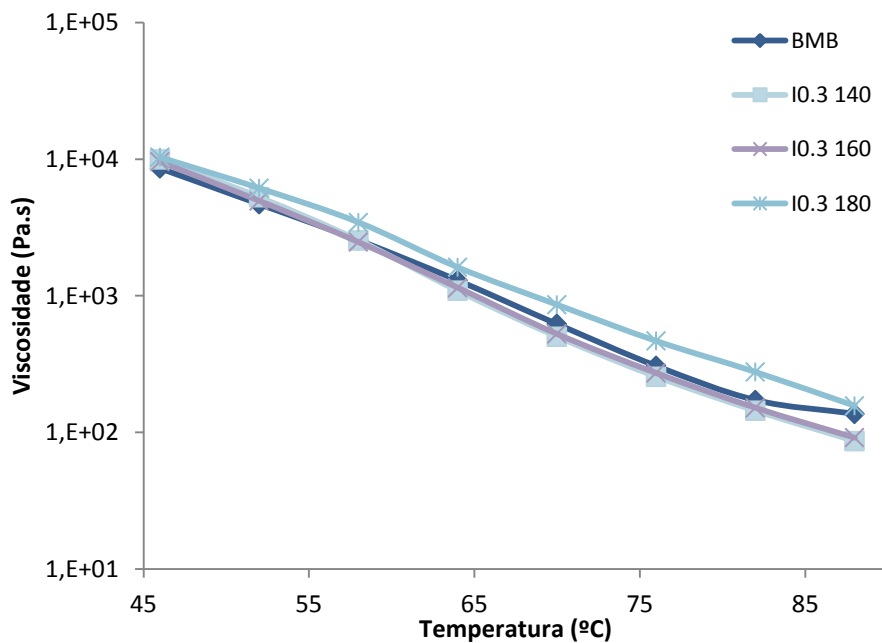


Figura 76 - Influência da temperatura na viscosidade do BMB aditivado com Iterlow

#### 4.6. Compactabilidade

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados do ensaio de compactabilidade onde se pode avaliar a influência dos aditivos e da temperatura de produção no volume de vazios de misturas betuminosas.

Na Figura 77 está representada a evolução do volume de vazios no ensaio de compactabilidade de misturas betuminosas produzidas com BMB com 2% de Sasobit a 140 °C e a 160 °C, onde se pode verificar que as misturas produzidas com Sasobit apresentam menor volume de vazios quando comparadas com a mistura de referência, apresentando a mistura betuminosa com Sasobit produzida a 160 °C menor volume de vazios do que a mesma produzida a 140 °C.

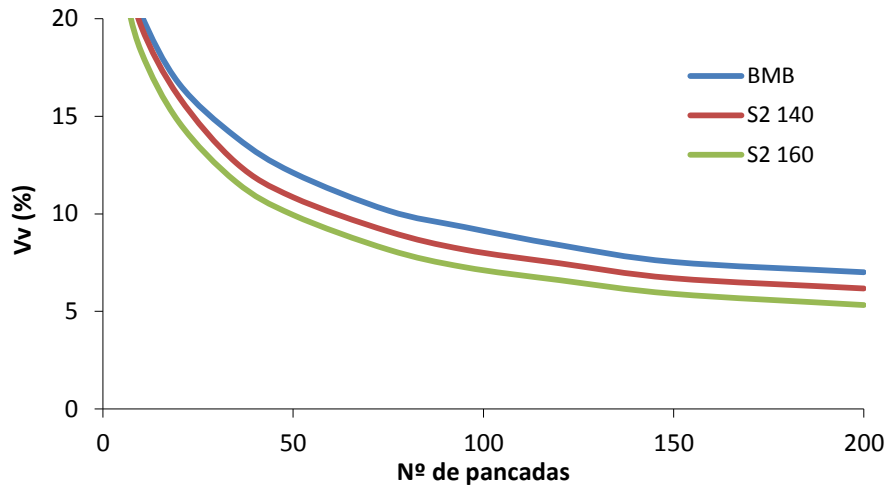


Figura 77 - Evolução do volume de vazios para misturas produzidas com BMB com Sasobit

Na Figura 78 apresenta-se a evolução do volume de vazios para no ensaio de compactabilidade de misturas betuminosas produzidas com BMB com 2% de Leadcap a 140 e a 160 °C, podendo verificar que as misturas betuminosas com Leadcap apresentam menor volume de vazios do que a mistura de referência. Também é possível ver que as misturas produzidas a 140 e a 160 °C apresentam resultados muito semelhantes.

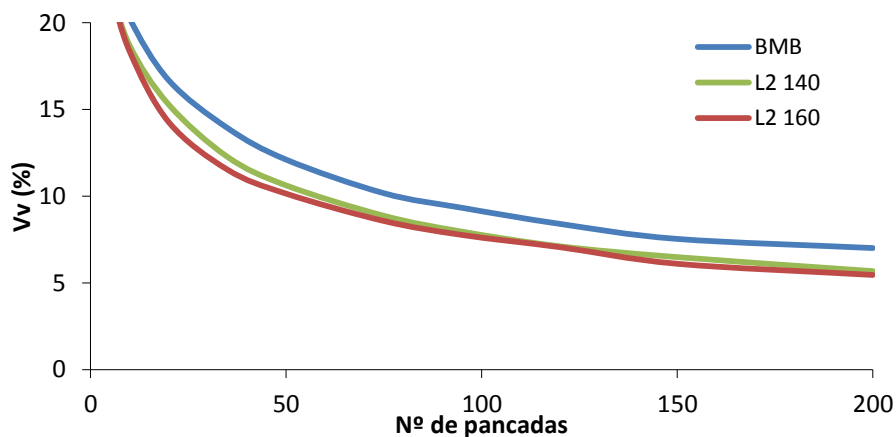


Figura 78 - Evolução do volume de vazios para misturas produzidas com Leadcap

Na Figura 79 está representada a evolução do volume de vazios das misturas aditivadas com BMB com 0.2 % de Rediset, podendo-se verificar que a mistura betuminosa com Rediset produzida a 140°C apresenta maior volume de vazios do que a mistura de referência. Já a mistura betuminosa com Rediset produzida a 160 °C apresenta menor volume de vazios do que a mistura de referência. Apesar da mistura a 140 °C apresentar maior volume de vazios que a mistura de referência, a diferença é muito reduzida não inviabilizando a produção a esta temperatura.

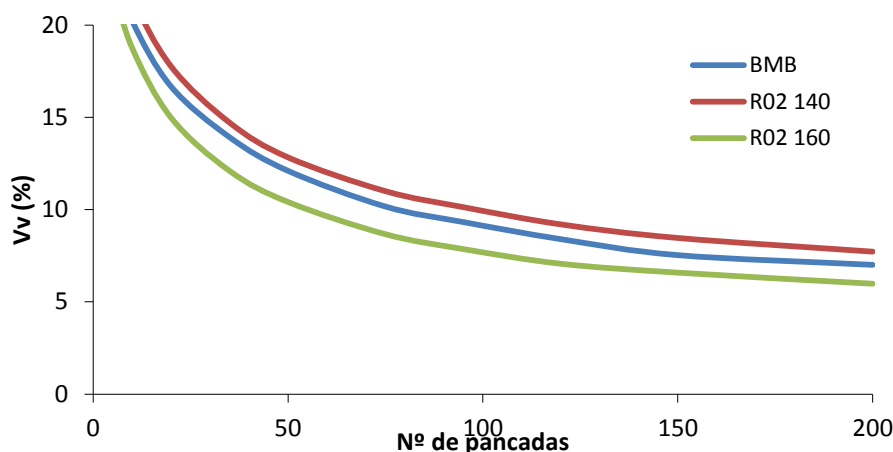


Figura 79 - Evolução do volume de vazios para misturas produzidas com Rediset

Quanto à compactabilidade da mistura com BMB com Iterlow, na Figura 80 pode verifica-se que tanto a mistura produzida a 160 °C como a 140 °C apresentam um volume de vazios inferior à mistura de referência. A mistura betuminosa com Iterlow produzida a 160°C apresenta menor volume de vazios do que a mesma produzida a 140°C.

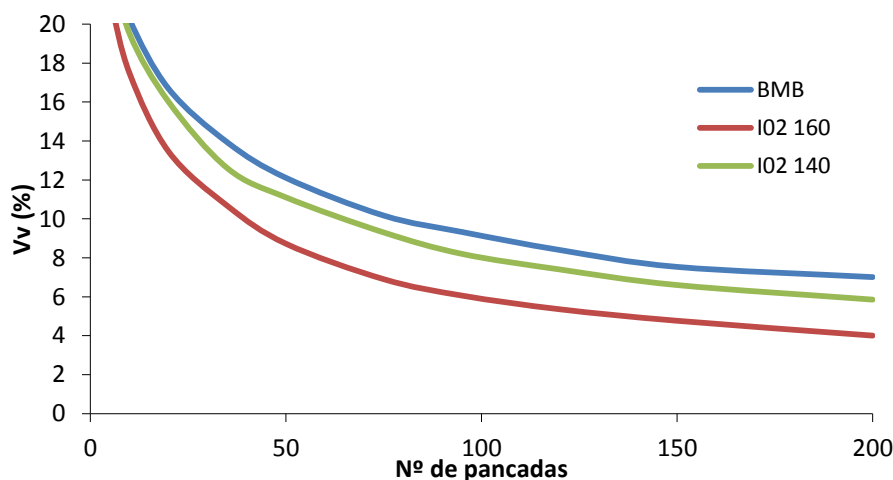


Figura 80 - Evolução do volume de vazios para misturas produzidas com Iterlow



#### 4.7. Sensibilidade à água

Neste capítulo apresentam-se os resultados de sensibilidade à água das misturas betuminosas produzidas com diferentes aditivos às temperaturas de 140 e 160°C.

Na Figura 81 apresentam-se os resultados da força de rotura dos provetes condicionados ao ar onde é possível observar que as misturas betuminosas com BMB aditivado produzidas a 160°C aumentaram a sua resistência em relação à mistura betuminosa de referência e às misturas produzidas a 140°C. Pode-se também concluir que das misturas betuminosas produzidas a 140°C a única que teve ganhos de resistência em relação à mistura betuminosa de referência foi a mistura betuminosa aditivada com Sasobit.

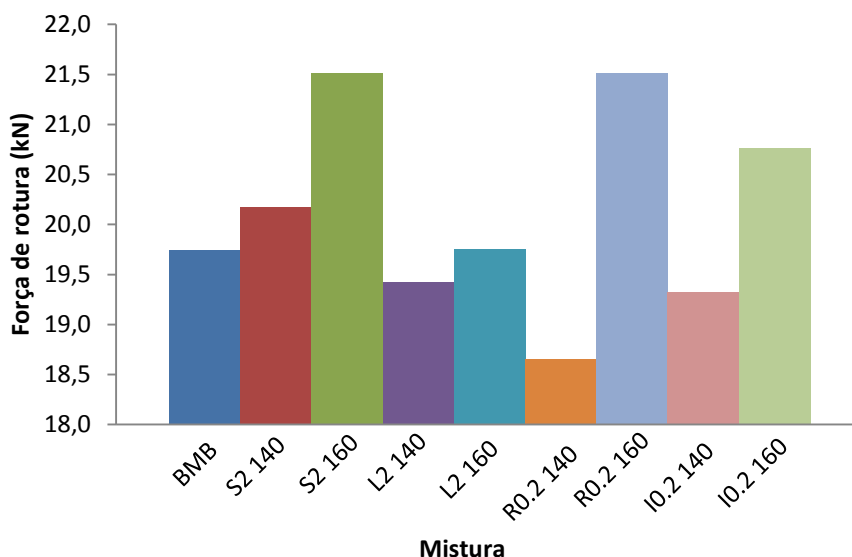


Figura 81 - Força de Rotura dos provetes condicionados ao ar

Na Figura 82 apresentam-se os resultados da força de rotura dos provetes condicionados em água, podendo-se concluir que as Misturas Betuminosas com BMB aditivado com Sasobit produzidas a 140 e 160°C aumentaram a sua resistência em relação à mistura de referência. As misturas betuminosas com Leadcap obtiveram uma força de rotura aproximada da mistura de referência. Das misturas betuminosas produzidas com aditivos químicos a única que obteve uma força de rotura superior à mistura de referência foi a mistura aditivada com Iterlow produzida a 160°C.

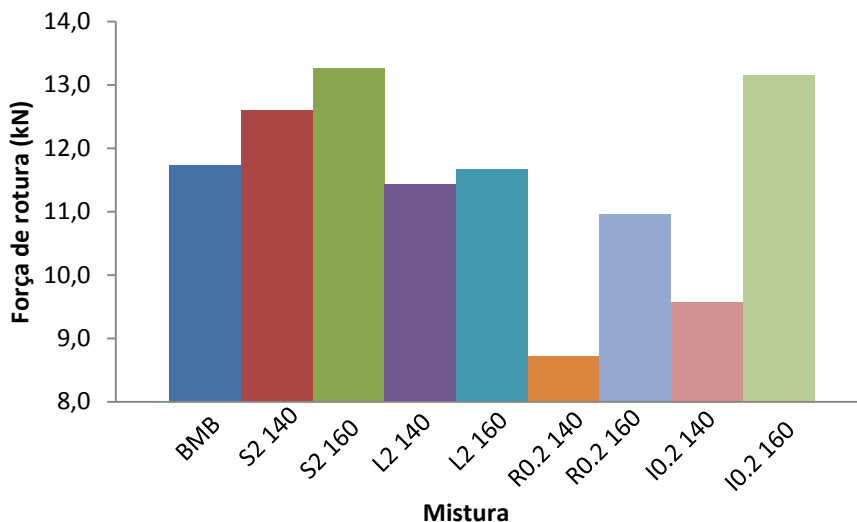


Figura 82 - Força de Rotura dos provetes condicionados em água

O efeito do condicionamento em água pode ser observado na Figura 83 onde se verifica que há uma redução considerável na resistência dos provetes. As misturas betuminosas produzidas com aditivos químicos perdem em média, mais resistência do que as misturas betuminosas produzidas com aditivos orgânicos.

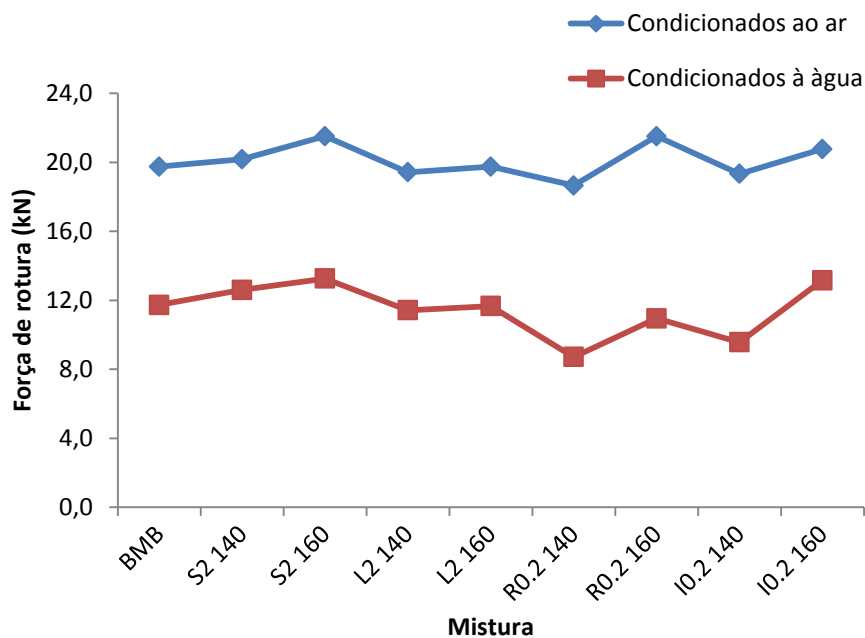


Figura 83 - Comparação da Força de Rotura para os dois tipos de condicionamento

Os resultados da deformação na rotura encontram-se na Figura 84 onde é possível verificar que as misturas betuminosas produzidas com aditivos apresentam uma maior deformação na

rotura comparativamente à mistura de referência. Pode ainda verificar-se que as misturas betuminosas condicionadas em água deformam-se menos do que as misturas betuminosas condicionadas ao ar, com exceção da mistura betuminosa com BMB aditivado com Iterlow produzida a 160°C.

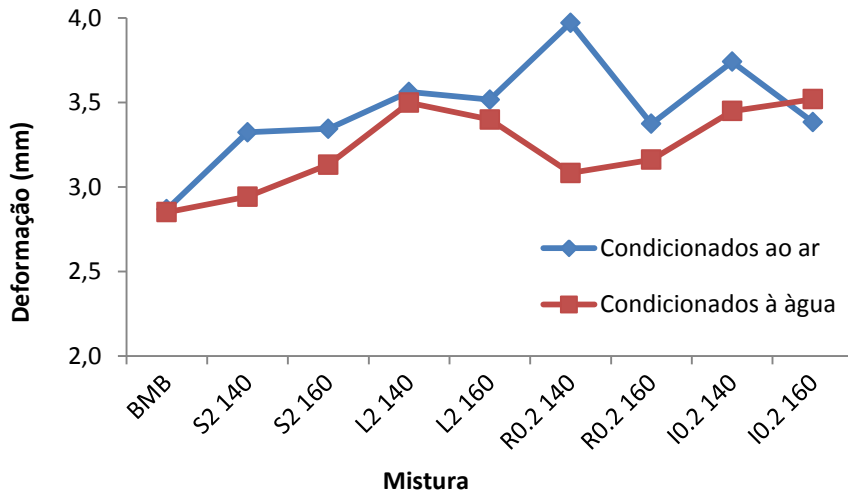


Figura 84 - Deformação na rotura

Na Figura 85 comparam-se os resultados da força na rotura com a deformação na rotura para os provetes condicionados ao ar, onde não é possível encontrar uma relação direta entre estas duas grandezas. No entanto verifica-se que para os aditivos orgânicos há uma relação direta com a temperatura entre a força e a deformação enquanto que para os aditivos químicos a relação é inversa.

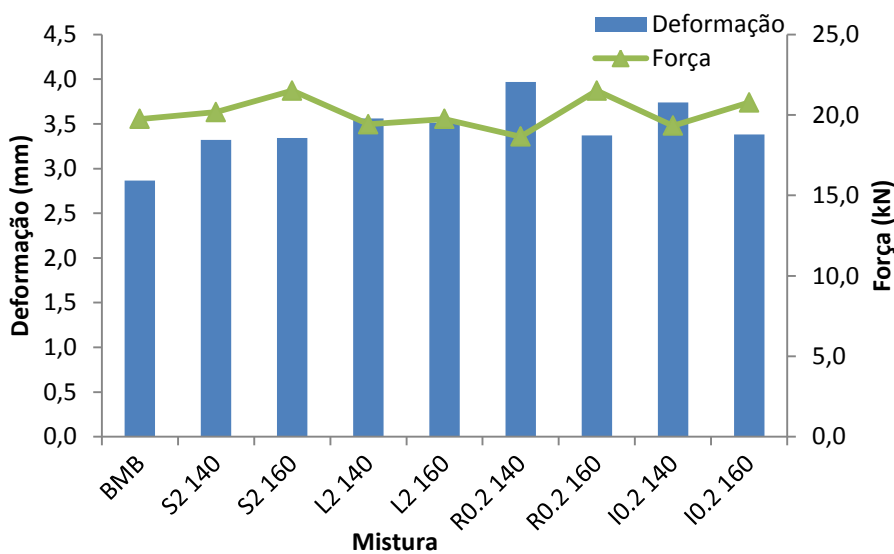


Figura 85 - Comparação da força com a deformação na rotura dos provetes condicionados ao ar

A resistência conservada das misturas betuminosas produzidas com aditivos redutores de temperatura é apresentada na Figura 86 onde se constata que a temperatura de produção da mistura influencia de forma significativa os resultados principalmente para as misturas com aditivos químicos. Para as misturas com aditivo orgânico não há influência da temperatura na resistência conservada. É também possível observar que as misturas betuminosas aditivadas com Sasobit são as únicas com uma resistência conservada maior do que a mistura de referência.

As misturas betuminosas produzidas com aditivos químicos apresentam melhores resultados para temperaturas de produção na ordem dos 160 °C do que para 140 °C.

Misturas betuminosas aditivadas com Rediset apresentam resistência conservada inferior à mistura de referência, enquanto a mistura betuminosa aditivada com Iterlow apresenta uma ótima resistência quando é produzida a 160 °C mas quando é produzida a 140 °C a resistência conservada é inferior à mistura de referência.

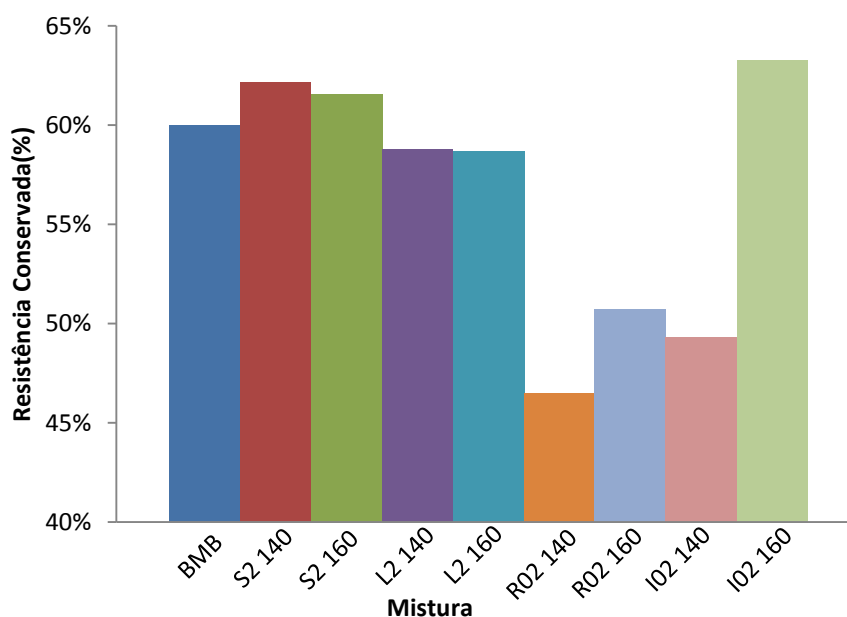


Figura 86 - Resistência conservada das misturas betuminosas

Na Figura 87 compara-se o resultado da resistência conservada com o resultado do volume de vazios. Como se pode verificar, as misturas produzidas com aditivos orgânicos apresentam uma resistência conservada idêntica à obtida pela mistura de referência para volumes de

vazios inferiores, o que poderá indicar que caso estas misturas tivessem a mesma porosidade, a resistência conservada seria menor.

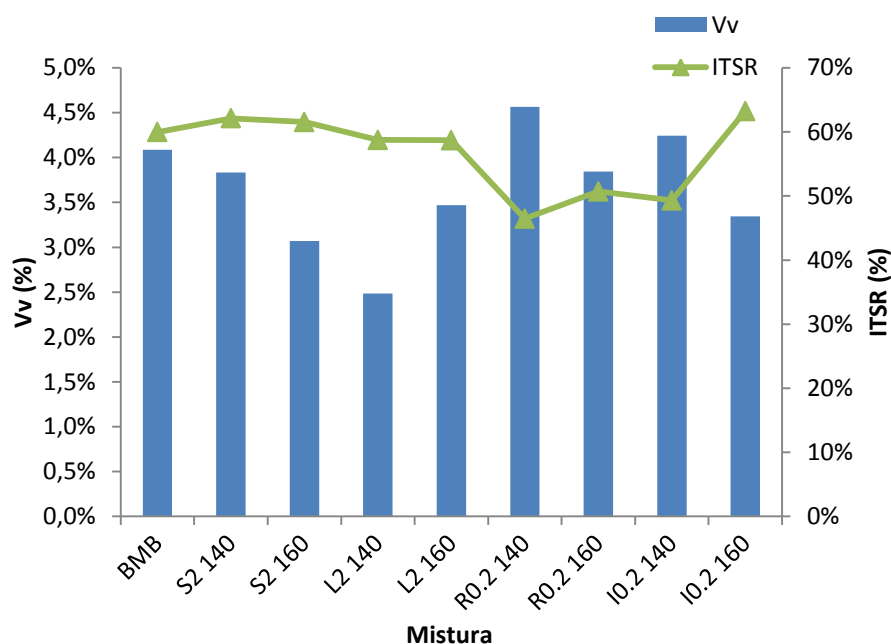


Figura 87 - Influência do volume de vazios na sensibilidade à água

Quanto às misturas betuminosas produzidas com aditivos químicos nota-se que regra geral apresentam uma resistência conservada mais baixa que a mistura de referência, exceto a mistura betuminosa aditivada com Iterlow produzida a 160 °C que consegue atingir resistência conservada elevada. Nas misturas betuminosas produzidas com aditivos químicos nota-se a suscetibilidade à temperatura de produção. As misturas produzidas a 160 °C apresentam resistência conservada superior e volume vazios mais baixo do que as misturas betuminosas produzidas a 140 °C.

#### 4.8. Conclusões

Da análise aos resultados obtidos pode concluir-se que na generalidade os betumes modificados com borracha aditivados apresentam uma diminuição da penetração com o aumento da temperatura de produção. Os betumes aditivados produzidos a 140 °C apresentam um ponto de amolecimento muito mais baixo e penetração muito maior o que significa que torna o betume muito mais mole do que o betume de referência.

Os ensaios realizados permitiram também concluir que a adição de Sasobit ao betume produzido a 160 °C torna-o mais duro ao contrário dos restantes aditivos estudados que tornam o betume mais mole.

Para as temperaturas entre 100 e 180 °C, o ensaio de viscosidade dinâmica permite concluir que a viscosidade dos betumes aditivados produzidos a 160 °C é inferior à viscosidade do betume de referência.

Através da análise aos resultados do ensaio de resiliência pode afirmar-se que a resiliência diminui com o aumento da percentagem de aditivo. A justificação para isto pode estar na proporção de borracha. Com o aumento da percentagem de aditivo, a proporção de borracha diminui, o que leva a perda de resiliência por parte do Betume Modificado com Borracha aditivado.

A resiliência dos Betumes Modificados com Borracha produzidos a 140 °C são muito baixos o que vem de encontro aos resultados do ensaio do ponto de amolecimento e de penetração que permitiam concluir que os betumes produzidos a 140 °C são muito moles.

O ensaio de reologia permite concluir que o módulo complexo de corte dos betumes aditivados produzidos a 140 e a 160 °C apresentam resultados muito semelhantes ao betume de referência, com exceção para o betume aditivado com Sasobit produzido a 140 e a 160 °C em que o módulo complexo de corte é maior.

Através do ensaio de reologia pôde-se também concluir que o ângulo de fase do betume aditivado com Sasobit é inferior ao ângulo de fase do betume de referência, enquanto que para o betume aditivado com Leadcap, o ângulo de fase é superior ao do betume de referência assim como os betumes aditivados com Rediset e com Iterlow em que o ângulo de fase é maior que o ângulo de fase do betume de referência.

A viscosidade avaliada através do ensaio de reologia para a gama de temperaturas entre 46 e 88 °C de betumes produzidos a 140 e a 160 °C é idêntica à viscosidade do betume de referência, com exceção dos betumes aditivados com Sasobit em que a viscosidade é superior à viscosidade do betume de referência.

Na generalidade, a utilização de aditivos na produção de misturas betuminosas a temperaturas na ordem dos 140 e 160 °C diminui o volume de vazios. Os resultados do ensaio de

compactabilidade permitem também concluir que há maior redução no volume de vazios das misturas aditivadas produzidas a 160 °C do que nas misturas aditivadas produzidas a 140 °C.

O Caderno de Encargos Tipo da Estradas de Portugal, S.A. estabelece que para misturas do tipo MBR-BBA o volume de vazios deve estar compreendido entre 3.5 e 6.5. Os resultados do ensaio de compactação das misturas aditivadas produzidas a 160 °C cumprem este requisito, já as misturas aditivadas produzidas a 140 °C apresentam um volume de vazios superior ao limite máximo.

Os resultados do ensaio de sensibilidade à água permitiram aferir que as misturas aditivadas produzidas a 160 °C suportam maior força de rotura do que a mistura de referência. Neste aspeto, as misturas aditivadas produzidas a 140 °C ficaram muito aquém do desempenho das misturas produzidas a 160°C e da mistura de referência.

No desempenho à resistência conservada destacam-se as misturas com BMB aditivado com Sasobit que apresentaram bons resultados para misturas produzidas a 140 e a 160 °C. Também é de destacar a resistência apresentada pela mistura aditivada com Iterlow produzida a 160 °C.

O Caderno de Encargos Tipo Obrada Estradas de Portugal, S.A. estabelece que para misturas do tipo MBR-BBA o ITSR deve ser superior a 65%. Neste aspeto nenhuma mistura aditivada supera esse valor. No entanto, como já foi referido anteriormente, as misturas que se aproximam mais desse valor e até se podem considerar como aceitáveis são as misturas aditivadas com Sasobit produzidas a 140 e a 160 °C que obtiveram um ITSR de 62% e a mistura aditivada com Iterlow produzida a 160°C que obteve um ITSR de 63%.

As misturas betuminosas aditivadas produzidas a 140 e a 160 °C apresentam maior deformação na roturado que a mistura de referência. Esta é uma excelente característica de desempenho porque as misturas betuminosas que se deformam mais na rotura têm tendência para fendilhar menos quando sujeitas ao tráfego automóvel.

## **5. Considerações Finais**

### **5.1. Conclusões**

O presente trabalho avaliou o efeito da utilização de aditivos para reduzir as temperaturas de produção das misturas betuminosas com betume modificado com borracha.

Através dos resultados obtidos foi possível concluir que o betume modificado com borracha produzido a 160 °C pode ser utilizado como ligante de misturas betuminosas. A viscosidade às temperaturas de serviço dos betumes aditivados é semelhante ao betume modificado com borracha o que viabiliza a sua utilização.

Os resultados do ensaio de penetração e anel e bola demonstram que os betumes aditivados produzidos a 140 °C tornam-se muito moles, o que pode comprometer a sua utilização na produção de misturas betuminosas a temperaturas temperadas.

O desempenho das misturas betuminosas produzidas a temperaturas temperadas foi muito bom, sendo que na maior parte dos casos as misturas produzidas a 160 °C superaram os resultados da mistura de referência. Isto foi verificado principalmente na diminuição do volume de vazios, no aumento da deformação na rotura o que leva a misturas resistentes ao fendilhamento, no aumento da força de rotura que mostra que as misturas aditivadas têm maior resistência.

Por todas as razões apresentadas anteriormente e também pelas vantagens ambientais, sociais e económicas a produção de misturas betuminosas a temperaturas temperadas deve ser tida em linha de conta para obras de pavimentos rodoviários.

### **5.2. Desenvolvimentos futuros**

Quanto a desenvolvimentos futuros é importante caracterizar de uma forma ainda mais aprofundada o comportamento mecânico das misturas betuminosas temperadas, sendo de referir a resistência à desagregação, módulo de rigidez, resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente

Para complementar este estudo deve caracterizar-se o comportamento do betume modificado com borracha com aditivos diferentes (por exemplo: Asphaltan B, Cecabase, ou outros que foram referidos na Tabela 1).



É também proposta uma avaliação dos benefícios ambientais e económicos com a utilização dos pneus usados e o impacto da redução dos custos energéticos com a redução da temperatura de produção das misturas

Propõe-se ainda a construção de um trecho experimental com o intuito de avaliar a qualidade dos processos de fabrico e compactação e as características das misturas betuminosas produzidas a temperaturas temperadas, nomeadamente através da avaliação das características funcionais da camada de desgaste, como seja a resistência à derrapagem (atrito) e a avaliação da rugosidade superficial (textura).

---

## Referências bibliográficas

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) -T315-10- Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), Washington, D.C, 2010
- Amirkhanian, S., Shen, J. “The influence of Crumb Rubber Modifier (CRM) Microstructures on the High Temperature Properties of CRM Binders”. The International Journal of Pavement Engineering, Vol.6, 2005
- Anderson, R. M. ; Baumgardner, G; May, R. ; Reike, G. “Engineering Properties, Emissions and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies”, Iterim Report, 2008.
- Antunes, I., Giuliani, F. Sousa, J.B.”Caracterização reológica de betumes modificados CRM sujeitos a envelhecimento artificial”, 3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2004
- Arieira, S., Maia J., Pais J.C.,Fonseca P.”Avaliação do comportamento reologico do betume modificado com borracha de pneus usados” 4º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2006
- ASTEC – Astec Industrie Companie Products, 2009.  
<[http://www.astecinc.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=117&Itemid=188](http://www.astecinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=117&Itemid=188)> (última visita a 9 Fevereiro de 2013)
- Baker, T.E., Allen, T.M., Jenkins, D.V., Mooney, T., Pierce, L.M., Christie, R.A., Weston, J.T., “Evluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington”, Washington State Department of Transportation, Washington, D.C., 2003
- Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K.F.R.S. “Na introduction to Rheology”, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 1989
- Baumgardner, Gaylon L. Revix™ - Waterless technology for production of reduced temperature asphalt mistures. Northeastern Asphalt User/Producer Group, Annual Meeting, Atlantic City, NJ, 2008
- Behl, A., Chandra S., Aggarwal V.K. “Rheological characterization of bituminous binder containing wax based warm mix asphalt additive” IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 9, 2013

Bernucci L.B., Ceratti J.A.P., Soares J.B., Motta L.M.G. “Pavimentação Asfáltica - Formação básica para engenheiros”, Rio de Janeiro, 2008

Branco, F., Pereira P., Santos, L.P. “Pavimentos Rodoviários” Almedina, Coimbra, 2006

Caltrans, “Maintenance Technical Advisory Guide (TAG)”, Caltrans, State of California Department of Transportation, Sacramento, California, 2003.

CECA “Green Road Formulation - Warm Mix Asphalt” La Garenne Colombes, 2013  
[http://www.cecachemicals.com/sites/ceca/en/business/bitumen\\_additives/warm\\_coated\\_material/warm\\_coated\\_material.page](http://www.cecachemicals.com/sites/ceca/en/business/bitumen_additives/warm_coated_material/warm_coated_material.page) (última visita a 8 Fevereiro 2013)

Chowdhury, A., Button, J.W. “A review of warm mix asphalt”. Texas A&M University System, 2008

Corrigan, M. “Warm Mix Asphalt Technologies and Research”. FHWA., 2008  
<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm> (última visita a 8 de Fevereiro de 2013 ).

D’Angelo, J., E. Harm, J. Bartoszek, G. Baumgardner, M. Corrigan, J. Cowser, T. Harman, M. Jamshidi, W. Jones, D. Newcomb, B. Prowell, R. Sines and B. Yeaton. “Warm-Mix Asphalt: European Practice”, 2008

EAPA “Environmental guidelines on best available techniques (BAT) for the production of asphalt paving mixes”, 2007

Estradas de Portugal, S.A. “Caderno de Encargos Tipo Obra - Volume 14.03-Pavimentação- Características dos Materiais”, 2012

European Committee for Standardization (CEN) -EN 933-1-Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle size distribution. Sieving method, Bruxelas 2007

European Committee for Standardization (CEN) -EN 1426- Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration, Bruxelas 2007

European Committee for Standardization (CEN) -EN 1427- Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method, Bruxelas 2007

- European Committee for Standardization (CEN) -EN 12591-Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens, Bruxelas 2009
- European Committee for Standardization (CEN) -EN 12594- Bitumen and bituminous binders – Preparation of test samples, Bruxelas 2007
- European Committee for Standardization (CEN) -EN 12697-12 Bituminous mixtures- Test methods for hot mix asphalt. Determination of the water sensitivity of bituminous specimens, Bruxelas 2008
- European Committee for Standardization (CEN) -EN 12697-30:2004+A1:2007 Bituminous mixtures- Test methods for hot mix asphalt. Specimen preparation by impact compactor, Bruxelas 2007
- European Committee for Standardization (CEN) -EN 13302- Bitumen and bituminous binders - Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus, Bruxelas 2010
- European Committee for Standardization (CEN) -EN 13880-3- Hot applied joint sealants. Test methods for the determination of penetration and recovery (resilience), Bruxelas 2007
- Ferreira, C. “Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas” Dissertação para a Obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade do Minho, 2009.
- Ferreira, C., J. R. M. Oliveira and H. M. R. D. Silva. “Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas”. XV CILA - Congresso Latino-Americano do Asfalto. Lisboa, 2009
- FHWA, “Warm-Mix Asphalt: European Practice”, Federal Highway Administration, 2008
- Fitts, G. “Warm Mix Asphalt: Experience in Texas”. 32nd Annual Asphalt Conference, Asphalt Institute, 2008
- Gencor Industries, 2009
- <http://www.gencor.com> (última visita a 10 Fevereiro de 2013)

- Hurley, G.C., Prowell, B.D. "Evaluation of Evotherm® for use in Warm mix asphalt". National Center for Asphalt Technology, 2005a
- Hurley, G.C., Prowell, B.D. "Evaluation of Aspha-Min® Zeolite for use in Warm mix asphalt". National Center for Asphalt Technology, 2005b
- Hurley, G.C., Prowell, B.D. "Evaluation of Potential Processes for use in Warm Mix", 2006  
[http://www.warmmixasphalt.com/submissions/10\\_20071127\\_Evaluation\\_of\\_Potential\\_Processes.pdf](http://www.warmmixasphalt.com/submissions/10_20071127_Evaluation_of_Potential_Processes.pdf) (última visita a 8 de Fevereiro de 2013).
- ITERCHIMICA ,2013 <http://www.iterchimica.it/> (última visita a 13 Fevereiro de 2013)
- Jenkins, K. "Mix Design Considerations dor Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen." Stellenbosh University, 2000
- Jones,D., Rongzong, W, Barros, C., Peterson, J. "Research Findings on the Use of Rubberized Warm-Mix Asphalt in California", Asphalt Rubber 2012 Conference, Munique, Alemanha, 2012
- Kristjansdottir, O. "Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving". University of Washington. Master of Science in Civil Engineering, Washington, 2006
- Kristjánsdóttir, Ó., Muench, S.T., Michal, L., Blurke, G. "Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption". Transportation Research Record, No. 2040. Transportation Research Board, 2007
- Larsen, O., Moen, O., Robertus, C., Koenders, B. "WAM Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA". Proceedings of the 3rd Euraspalt and Eurobitume Conference, Book 1, Foundation Euraspalt, Breukelen, The Neterhlands, pp 641-650, 2004
- Matos, P.G.S. "Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados: Interação Agregado-Betume", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012
- Micaelo, R.A.L.B. "Compactação de misturas betuminosas - Ensaios de campo e modelação numérica", Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008

- Minhoto, M. J.C., Pais, J. C., Pereira, P.A.A., "A otimização das misturas betuminosas com betume modificado com borracha reciclada de pneus usados", 2º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2002
- Minhoto, Manuel J.C., Pais, J. C., Pereira, P.A.A., "Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Method", Journal of the Transportation Research Board, nº1919, pp.96-110, 2005
- Montepara A., Giuliani F., Antunes I., D'Elia L. e Italia P., "Evaluation of modified bitumen out of the Linear Viscoelastic Approach" Eurasphalt and Eurobetume Congress, Viena, 2004
- Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza F., Gallegos C., "Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens" Faculdade de Ciências Experimentais da Universidade de Huelva, 2004
- Neto, S.A.D., Farias, M.M., Pais, J.C., Pereira, P.A.A., "Influence of crumb rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties", Asphalt Rubber Conference 2006, , p.679-692. Palm Springs, USA, 2006
- Olard, F., Noan, C. "PIARC Prize for Sustainable development - Low Energy Asphalts". Routes-Roads N°336/337, 2008
- Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Abreu L.P.F., Fernandes, S.R.M. "Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures" Journal of Cleaner Production, 2012
- Pais, J. C., Pereira, P.A.A., "The improvement of pavement performance using asphalt rubber hot mixes", International Symposium on Highway and Bridge Engineering, Roménia 2007
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Maricato, S., Moura, J. "Desempenho de misturas betuminosas abertas e fechadas com betume modificado com baixa percentagem de borracha", 5º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2008a
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Gardete, D., Minhoto, M.J.C., "O comportamento de misturas betuminosas com betume modificado com borracha", 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, Moçambique, 2008b

- Pereira, P.A.A., Pais, J.C., Fontes, L.P.T.L, Trichês, G., “Rehabilitation alternatives using new asphalt rubber mixtures with brazilian materials”, Fifth Internacional Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, 2007
- Pereira, Raul X.L. “Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interacção Aditivo-Ligante” Dissertação para a Obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade de Aveiro, 2010
- Pinto, S. “Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos” Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991
- Prowell, B.D., Hurley, G.C. “National Asphalt Pavement Association Warm-Mix Asphalt: Contractors Experiences”. Quality Improvement Series 125, 2008
- Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L., Moreno, F.,”Warm mix asphalt: an overview”. Journal of Cleaner Production Volume 24, Paginas76 a 84, 2012
- Santos, A.F.R., “Temperaturas de fabrico e compactação de mistura betuminosas com betumes modificados”.Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011
- Sasol. “Sasobit Technology”. Sasol Wax GmbH Company, Hamburg, 2008.  
[http://www.sasolwax.com/Sasobit\\_Technology](http://www.sasolwax.com/Sasobit_Technology) (última visita a 8 de Fevereiro de 2013)
- Sebaaly, P.E., Hajj, E.Y., Hitti, E. “Performance of Recycled Rubber Modified Binders in Warm Mix Asphalt Mixtures”, Asphalt Rubber 2012 Conference, Munique, Alemanha 2012
- Shell Bitumes “Quand les bitumes Shell font campagne pour l’environment”. Le liant, no. 38., 2006
- Silva, H.M.D., Oliveira, J.R.M., Ferreira, C.I.G., Peralta, E.J. Evaluation of the rheological behaviour of warm mix asphalt (WMA) modified binders. Proceedings of the 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials (ATCBM09), Rhodes, Greece, 2009.

- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Peralta, J., Zoorob, S.E. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. Construction and Building Materials Volume 24, 2010
- Silva, C. “Misturas Betuminosas com Borracha” Info ValorPneu Nº18, Agosto 2012
- Virta, R. “Mineral Resource of the Month: natural and synthetic zeolites”, Geotimes.2008
- Walker, P.E.D. “Emerging Warm Mix Asphalt Technologies”, 2009  
<http://asphaltmagazine.com/news/detail.dot?id=c7a06a94-e636-4dc2-953e-24c4d317f6c6> (última visita a 8 de Fevereiro de 2013)
- Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S.N., Putman, B.J., “Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures” Construction and Building Materials Volume 31, 2012