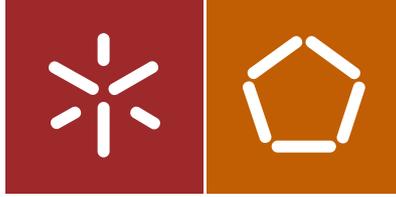




Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Hélder Pereira Torres

Utilização de betumes modificados na  
regeneração de misturas com elevadas  
percentagens de reciclagem



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Hélder Pereira Torres

Utilização de betumes modificados na  
regeneração de misturas com elevadas  
percentagens de reciclagem

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

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva  
Professor Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira

## AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho só foi possível devido a um conjunto de condições e meios postos à disposição, bem como à dedicação, empenho e vontade de vários intervenientes, a quem gostaria de expressar os meus mais profundos e sinceros agradecimentos.

Desde logo, gostaria de deixar o agradecimento ao Laboratório de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pelas condições e meios colocados à disposição.

Ao Professor Hugo Silva e ao Professor Joel Oliveira, o meu agradecimento pela orientação, apoio, incentivo, as longas horas concedidas e pela formação e ensinamentos prestados. Por tudo o que me ensinaram e me demonstraram ao longo deste período, um enorme obrigado.

Ao colega e Eng. Carlos Palha pela disponibilidade, bem como por todos os ensinamentos, ao longo de todos estes anos de trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Engenharia Civil, pelos bons momentos e ajuda preciosa que nunca me foi recusada.

À minha família, em especial aos meus pais, à minha irmã, ao meu cunhado e a minha sobrinha Mariana quero agradecer pelo apoio, compreensão, incentivo e paciência demonstrada, pois tudo é possível por estarem sempre comigo.

À Leninha por todo o carinho e paciência que demonstrou ao longo deste caminho e por toda a ajuda e apoio que sem dúvida nunca esquecerei.

Queria também deixar aqui uma palavra a todos que considero uma família de amigos de sempre e para sempre, só graças ao seu contributo e ajuda, foi possível fazer este trabalho. Por todos os bons momentos em trabalho e fora dele, pela confiança e dedicação, um enorme obrigado.

Porque é também importante em todos os momentos, um agradecimento ao grupo dos solteirões, pelo companheirismo e amizade.

Este trabalho é financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional de Competitividade (COMPETE) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do projeto PLASTIROADS (PTDC/ECM/119179/2010 ou FCOMP-01-0124-FEDER-020335), sendo ainda suportado pela MonteAdriano (material fresado e agregados), CEPSA (betume), GIntegral (polímeros) e Fenixfalt (Regefalt).



## **Utilização de betumes modificados na regeneração de misturas com elevadas percentagens de reciclagem**

### **RESUMO**

Atualmente, a reciclagem de materiais assume uma importância crescente para a Sociedade, e em particular no que diz respeito ao sector da construção. Nas infraestruturas rodoviárias caminha-se no mesmo sentido, uma vez que a reutilização de materiais nas misturas betuminosas permite fazer frente ao gradual aparecimento duma grande diversidade de resíduos, sendo ainda possível reduzir os custos de produção.

O presente estudo tem como objetivo avaliar as vantagens da utilização de betumes modificados comerciais e produzidos em laboratório na regeneração de misturas com elevadas taxas de reciclagem. Os materiais utilizados foram material fresado, agregados novos, polímeros e betumes. Na modificação dos betumes base foram utilizados polímeros virgens (SBS), reciclados (EVA) e reativos (Regefalt), e ainda um betume modificado comercial.

Os ensaios laboratoriais demonstram que a utilização de betumes modificados como materiais regeneradores melhora significativamente o desempenho das misturas nos ensaios de fadiga e deformação permanente, por comparação com uma mistura de referência que utilize um rejuvenescedor comercial. No que diz respeito à sensibilidade à água todas as misturas produzidas com estes betumes regeneradores demonstram um excelente resultado. Porém, a mistura produzida com o betume modificado comercial destaca-se das restantes pela maior capacidade em resistir a este fenómeno. Quanto à resistência ao envelhecimento, os ligantes modificados apresentam um resultado equivalente à mistura de referência, ou ligeiramente melhor no caso do betume regenerador com polímero SBS. Os ensaios químicos permitem concluir que a utilização dos betumes modificados como materiais regeneradores permite baixar os índices de carbonilo, associados ao envelhecimento do betume, sendo que o betume regenerador com SBS é o que apresenta maior capacidade para reduzir a oxidação do ligante.

### **Palavras-Chave:**

Reciclagem de misturas betuminosas

Elevadas taxas de reciclagem

Regeneração

Betumes modificados

Desempenho das misturas betuminosas



---

## Use of modified bitumens in the regeneration of mixtures with high RAP contents

### ABSTRACT

Nowadays, the recycling materials has gained a growing importance for our Society, and especially in the construction sector. The same path is being followed in terms of road infrastructures, since the reuse of materials in asphalt mixtures allows facing the gradual emergence of a great diversity of waste, being also possible to reduce the production costs.

The current study has the objective of evaluating the advantages of using commercial and laboratory produced modified bitumens for regeneration of asphalt mixtures with high recycling rates. The materials used were reclaimed asphalt pavement (RAP), new aggregates, polymers and bitumens. The polymers applied in the modification of the base bitumens were virgin (SBS), recycled (EVA) and reactive (Regefalt). In addition, a commercial modified bitumen was also used.

The laboratory tests demonstrate that using modified bitumens as regenerators improves significantly the mixtures performance concerning fatigue and permanent deformation, namely when compared to a reference mixture that contains a commercial rejuvenator. In regard to water sensitivity all the mixtures produced with these regenerating bitumens showed excellent results. However, the mixture produced with a commercial modified bitumen stands out from the rest because of its higher resistance to that phenomenon. About the aging resistance, the modified binders reveal results equivalent to those of the reference mixture, or slightly better in the case of the regenerating bitumen with SBS polymer. Chemical tests allow concluding that the modified bitumens used as regenerators are able to reduce the carbonyl rates, associated to bitumen aging, wherein the regenerating bitumen with SBS is the one showing higher capacity to reduce the binder's oxidation.

#### Key Words:

Asphalt recycling

High RAP contents

Regeneration

Modified bitumens

Asphalt mixtures' performance



**ÍNDICE**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Enquadramento do trabalho .....  | 1         |
| 1.2. Objetivos.....   | 2         |
| 1.3. Organização da dissertação.....  | 3         |
| <b>2. ESTADO DA ARTE SOBRE REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS EM<br/>MISTURAS BETUMINOSAS.....</b> | <b>5</b>  |
| 2.1. Introdução .....   | 5         |
| 2.2. Reciclagem de pavimentos rodoviários .....   | 7         |
| 2.2.1. Tipos de reciclagem .....  | 8         |
| 2.2.2. Condicionantes à incorporação do material fresado .....                            | 12        |
| 2.2.3. Processo de oxidação de betumes .....  | 18        |
| 2.2.4. Soluções aos desafios colocados à reciclagem .....                                 | 20        |
| 2.3. Incorporação de polímeros nas misturas betuminosas.....                              | 23        |
| 2.3.1. Polímeros .....  | 23        |
| 2.3.2. Técnicas de introdução dos polímeros nas misturas betuminosas .....                | 24        |
| 2.4. Betumes modificados com polímeros.....   | 27        |
| 2.4.1. Influência das condições de produção .....   | 28        |
| 2.4.2. Características dos betumes modificados com polímeros .....                        | 29        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>  | <b>31</b> |
| 3.1. Materiais .....  | 31        |
| 3.1.1. Material fresado .....   | 31        |
| 3.1.2. Agregados novos.....   | 32        |
| 3.1.3. Polímeros .....  | 32        |
| 3.1.4. Betumes .....  | 33        |
| 3.2. Metodologia do estudo .....  | 34        |
| 3.2.1. Caracterização do material fresado e formulação da mistura.....                    | 34        |
| 3.2.2. Estudo e caracterização de betumes .....   | 37        |
| 3.2.3. Avaliação do desempenho das misturas .....   | 43        |

---

|   |            |
|---|------------|
| 3.2.4. Avaliação do envelhecimento .....                            | 46         |
| 3.2.5. Análise química dos ligantes .....                           | 47         |
| 3.3. Métodos de produção.....                                       | 49         |
| 3.3.1. Produção de betumes regeneradores e ligantes.....            | 49         |
| 3.3.2. Produção de misturas betuminosas .....                       | 50         |
| <b>4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>                                | <b>55</b>  |
| 4.1. Estudo de betumes .....  | 55         |
| 4.1.1. Caracterização base dos betumes.....                         | 55         |
| 4.1.2. Caracterização reológica.....                                | 59         |
| 4.1.3. Análise ao estudo dos betumes .....                          | 67         |
| 4.2. Caracterização Mecânica das Misturas Betuminosas.....          | 68         |
| 4.2.1. Sensibilidade à água.....                                    | 68         |
| 4.2.2. Trabalhabilidade das misturas .....                          | 72         |
| 4.2.3. Deformação permanente .....                                  | 73         |
| 4.2.4. Módulo de rigidez.....                                       | 75         |
| 4.2.5. Fendilhamento por fadiga .....                               | 78         |
| 4.3. Avaliação da resistência ao envelhecimento .....               | 80         |
| 4.3.1. Caracterização base dos betumes.....                         | 80         |
| 4.3.2. Caracterização reológica.....                                | 83         |
| 4.4. Caracterização química através da espectroscopia de FTIR ..... | 89         |
| 4.5. Avaliação económica.....                                       | 94         |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                 | <b>99</b>  |
| 5.1. Conclusões.....  | 99         |
| 5.2. Trabalhos futuros .....  | 101        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                             | <b>103</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Resíduos de pavimentos flexíveis .....   | 5  |
| Figura 2.2 – Resíduos plásticos .....   | 6  |
| Figura 2.3 – Degradações dos pavimentos flexíveis .....   | 7  |
| Figura 2.4 – Reciclagem <i>in situ</i> .....  | 9  |
| Figura 2.5 – Reciclagem <i>in situ</i> (a) com betume espuma e (b) com rejuvenescedor .....   | 10 |
| Figura 2.6 – Reciclagem <i>in situ</i> (a) a frio e (b) a quente .....  | 10 |
| Figura 2.7 – Central de produção de misturas betuminosas .....  | 10 |
| Figura 2.8 – Esquema de reciclagem a quente em central (adaptado de Wirtgen, 2003)....  | 11 |
| Figura 2.9 – Metodologia de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente.....   | 13 |
| Figura 2.10 – Esquema da central betuminosa contínua (adaptado de EAPA (1998)) .....  | 15 |
| Figura 2.11 – Esquema da central betuminosa descontínua ou de torre (EAPA, 1998) .....  | 15 |
| Figura 2.12 – Exemplo de central descontínua ou de torre .....  | 16 |
| Figura 2.13 – Absorvância relativa às ligações C=O (Petersen, 1986) .....   | 19 |
| Figura 2.14 – Evolução dos índices $I_s = o$ e $I_c = o$ durante o envelhecimento do betume<br>(Petersen, 1998) .....                               | 19 |
| Figura 2.15 – Técnicas de introdução de polímeros nas misturas betuminosas (adaptado de<br>Costa (2013)) .....                                      | 25 |
| Figura 2.16 – Adição de polímeros como agregados .....  | 26 |
| Figura 2.17 – Modificação do betume com polímero .....  | 27 |
| Figura 2.18 – Elementos dos misturadores usados para produção de betumes modificados<br>(a) Agitador RW 20 e (b) Dispersador ULTRA TURRAX T65 ..... | 29 |
| Figura 2.19 – Resultados microscopia de betumes produzidos com (a) agitador RW 20 e<br>com (b) dispersador ULTRA TURRAX T65 .....                   | 29 |
| Figura 3.1 – Material fresado .....   | 31 |
| Figura 3.2 – Agregados novos utilizados no estudo .....   | 32 |
| Figura 3.3 – Polímero (a) virgem SBS (b) reativo REG e (c) reciclado EVA .....  | 33 |
| Figura 3.4 – Classificador utilizado para separação do MF em duas frações .....   | 35 |
| Figura 3.5 – Aspecto visual da separação do fresado em (a) finos e (b) grossos .....  | 35 |
| Figura 3.6 – Determinação da percentagem em betume do MF.....   | 36 |
| Figura 3.7 – Peneiração mecânica do material fresado .....  | 37 |
| Figura 3.8 – Fases do método Marshall de determinação da percentagem ótima em<br>betume.....  | 37 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.9 – Fases do processo de recuperação do betume .....  | 38 |
| Figura 3.10 – Dispersador de alto corte IKA ULTRA TURRAX T65 .....                                     | 40 |
| Figura 3.11 – Ensaio de (a) Anel e Bola (b) Penetração e (c) Resiliência.....                          | 42 |
| Figura 3.12 – Ensaio de (a) viscosidade rotacional e (b) reómetro DSR.....                             | 43 |
| Figura 3.13 – Equipamento usado no ensaio de sensibilidade à água.....                                 | 44 |
| Figura 3.14 – Equipamento utilizado no ensaio de pista.....  | 45 |
| Figura 3.15 – Equipamento utilizado no ensaio de fadiga .....  | 46 |
| Figura 3.16 – Integração das bandas para determinação das áreas .....                                  | 48 |
| Figura 3.17 – Área das bandas (a) de carbonilo e sulfóxido (b) entre 2000 a 600 $\text{cm}^{-1}$ ..... | 48 |
| Figura 3.18 – Esquema de produção dos betumes regeneradores e ligantes.....                            | 50 |
| Figura 3.19 – Definição das temperaturas do ligante BM1 .....  | 51 |
| Figura 3.20 – Viscosidade do betume regenerador B1 .....   | 52 |
| Figura 3.21 – Esquema de produção das misturas betuminosas .....                                       | 53 |
| Figura 3.22 – Esquema dos processos de espalhamento e compactação.....                                 | 54 |
| Figura 4.1 – Características dos betumes regeneradores (a) B3 e (b) B4 .....                           | 55 |
| Figura 4.2 – Produção dos ligantes (a) BM2 e (b) BM3 .....   | 56 |
| Figura 4.3 – Mistura do betume B0 com betume B2.....   | 56 |
| Figura 4.4 – Produção do ligante BM1 .....   | 57 |
| Figura 4.5 – Mistura do betume B0 com REG .....  | 58 |
| Figura 4.6 – Produção do ligante BM4 .....   | 58 |
| Figura 4.7 – Características base dos vários ligantes em estudo .....                                  | 59 |
| Figura 4.8 – Reologia do ligante BM1: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....                   | 61 |
| Figura 4.9 – Viscosidade do ligante BM1 no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional ....               | 61 |
| Figura 4.10 – Reologia do ligante BM2: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....                  | 62 |
| Figura 4.11 – Viscosidade do ligante BM2 no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional ..                | 63 |
| Figura 4.12 – Reologia do ligante BM3: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....                  | 63 |
| Figura 4.13 – Viscosidade do ligante BM3 no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional ..                | 64 |
| Figura 4.14 – Reologia do ligante BM4: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....                  | 64 |
| Figura 4.15 – Viscosidade do ligante BM4 no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional ..                | 65 |
| Figura 4.16 – Reologia dos ligantes regeneradores: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....      | 65 |
| Figura 4.17 – Viscosidade dos ligantes regeneradores no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional.....  | 66 |
| Figura 4.18 – Reologia dos vários ligantes: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase ....              | 67 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.19 – Viscosidades dos vários ligantes no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional.....    | 67 |
| Figura 4.20 – Valores de ITS e deformação dos provetes secos das misturas .....                    | 69 |
| Figura 4.21 – Valores de ITSR e volume de vazios das misturas .....                                | 70 |
| Figura 4.22 – Rotura dos provetes de sensibilidade à água.....                                     | 71 |
| Figura 4.23 – Aspeto visual da (a) mistura MR e (b) mistura M1 .....                               | 72 |
| Figura 4.24 – Aspeto visual da (a) mistura M3 e (b) mistura M4 .....                               | 73 |
| Figura 4.25 – Evolução da deformação das misturas em estudo.....                                   | 74 |
| Figura 4.26 – Rodeira da mistura M3.....   | 75 |
| Figura 4.27 – Rodeira da mistura M4.....   | 75 |
| Figura 4.28 – Rodeira da mistura M1 .....  | 75 |
| Figura 4.29 – Curvas mestras do módulo complexo ( $T_{REF} = 20\text{ °C}$ ).....                  | 76 |
| Figura 4.30 – Curvas mestras do ângulo de fase ( $T_{REF} = 20\text{ °C}$ ).....                   | 77 |
| Figura 4.31 – Curvas mestras do módulo viscoso ( $T_{REF} = 20\text{ °C}$ ).....                   | 77 |
| Figura 4.32 – Curvas mestras do módulo elástico ( $T_{REF} = 20\text{ °C}$ ).....                  | 78 |
| Figura 4.33 – Leis de fadiga das misturas .....  | 79 |
| Figura 4.34 – Degradação por fadiga duma das vigas ensaiadas .....                                 | 80 |
| Figura 4.35 – Caraterísticas do ligante BM1 antes e após o processo de fabrico .....               | 81 |
| Figura 4.36 – Caraterísticas do ligante BM3 antes e após o processo de fabrico .....               | 81 |
| Figura 4.37 – Caraterísticas do ligante BM4 antes e após o processo de fabrico .....               | 81 |
| Figura 4.38 – Caraterísticas do ligante BR antes e após o processo de fabrico .....                | 82 |
| Figura 4.39 – Reologia dos ligantes BM1 e BM1R: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....     | 83 |
| Figura 4.40 – Viscosidade dos ligantes BM1 e BM1R no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional..... | 84 |
| Figura 4.41 – Reologia dos ligantes BM3 e BM3R: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....     | 84 |
| Figura 4.42 – Viscosidade dos ligantes BM3 e BM3R no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional..... | 85 |
| Figura 4.43 – Reologia dos ligantes BM4 e BM4R: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....     | 85 |
| Figura 4.44 – Viscosidade dos ligantes BM4 e BM4R no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional..... | 86 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.45 – Reologia dos ligantes BR e BRR: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase .....           | 86 |
| Figura 4.46 – Viscosidade dos ligantes BR e BRR no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional.....       | 87 |
| Figura 4.47 – Espectro de FTIR (a) da constituição do ligante BM1 e (b) banda espectral analisada..... | 89 |
| Figura 4.48 – Espectro de FTIR (a) da constituição do ligante BM3 e (b) banda espectral analisada..... | 89 |
| Figura 4.49 – Espectro de FTIR (a) da constituição do ligante BM4 e (b) banda espectral analisada..... | 90 |
| Figura 4.50 – Espectro de FTIR (a) do ligante BM1 e BM1R e (b) banda espectral analisada.....          | 90 |
| Figura 4.51 – Espectro de FTIR (a) do ligante BM3 e BM3R (b) banda espectral analisada.....            | 90 |
| Figura 4.52 – Espectro de FTIR (a) do ligante BM4 e BM4R e (b) banda espectral analisada.....          | 91 |
| Figura 4.53 – Espectro de FTIR (a) dos ligantes e (b) banda espectral analisada.....                   | 91 |
| Figura 4.54 – Espectro de FTIR (a) dos ligantes recuperados e (b) banda espectral analisada.....       | 91 |
| Figura 4.55 – Índices de carbonilo (C=O).....  | 93 |
| Figura 4.56 – Índices de sulfóxido dos ligantes (a) antes e (b) após o processo de fabrico             | 93 |
| Figura 4.57 – Custos das misturas .....  | 97 |

**ÍNDICE DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Parâmetros de distinção das técnicas de reciclagem.....                    | 8  |
| Tabela 2.2 – Polímeros adequados para modificação do betume (Isacson e Lu, 1998) ...    | 30 |
| Tabela 3.1 – Constituição dos betumes regeneradores produzidos em laboratório.....      | 49 |
| Tabela 3.2 – Constituição dos ligantes finais em estudo.....                            | 50 |
| Tabela 3.3 – Média ponderada das temperaturas dos materias .....                        | 52 |
| Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura M1 .....           | 68 |
| Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura M2 .....           | 68 |
| Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura M3 .....           | 68 |
| Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura M4 .....           | 68 |
| Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura MR .....           | 69 |
| Tabela 4.6 – Características da compactação dos provetes Marshall.....                  | 73 |
| Tabela 4.7 – Parâmetros do ensaio de pista.....   | 74 |
| Tabela 4.8 – Parâmetros das leis de fadiga das misturas.....                            | 79 |
| Tabela 4.9 – Variação das características dos ligantes após o processo de fabrico ..... | 82 |
| Tabela 4.10 – Variação do módulo e ângulo de fase após o processo de fabrico (T=20°C)   | 87 |
| Tabela 4.11 – Variação do módulo e ângulo de fase após o processo de fabrico (T=50°C)   | 88 |
| Tabela 4.12 – Índices espectroscópicos dos ligantes estudados .....                     | 92 |
| Tabela 4.13 – Custos com o tratamento do MF.....  | 95 |
| Tabela 4.14 – Custos com o ligante.....   | 95 |
| Tabela 4.15 – Custo com os agregados .....  | 96 |
| Tabela 4.16 – Custo de fabrico.....   | 96 |
| Tabela 4.17 – Custo total das misturas betuminosas .....                                | 97 |



---

**ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

|                    |  |
|--------------------|--|
| REG                | – Polietileno de alta densidade  |
| EVA                | – Polietileno de alta densidade  |
| SBS                | – Butadieno-estireno-butadieno   |
| PEAD               | – Polietileno de alta densidade  |
| TSM                | – Tambor-secador-misturador  |
| MF                 | – Material Fresado   |
| V <sub>v</sub>     | – Volume de vazios   |
| WTT                | – Ensaio de Pista ( <i>Wheel Tracking Test</i> )                                     |
| ITSR               | – Resistência conservada em tração indireta  |
| ITS                | – Resistência à tração por compressão diametral ( <i>Indirect Tensile Strength</i> ) |
| WTS <sub>AIR</sub> | – Deformação em ensaio de pista  |
| PRD <sub>AIR</sub> | – Profundidade média proporcional da rodeira   |
| RD <sub>AIR</sub>  | – Profundidade do cavado da rodeira  |



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento do trabalho

Atualmente, a reciclagem de materiais é muito importante para a sociedade em geral, mas em particular no que diz respeito ao sector da construção. No domínio das infraestruturas rodoviárias, caminha-se no mesmo sentido, fazendo frente à grande diversidade de materiais existentes. Em Portugal, a maior preocupação será na reciclagem de pavimentos do tipo flexível, ou seja, pavimentos constituídos por camadas de materiais granulares e de misturas betuminosas, dada a predominante expressão na rede rodoviária nacional (Batista, 2004).

A reutilização de materiais nas misturas betuminosas permite a redução dos custos, a redução do impacto ambiental, e a necessidade de utilização de novos agregados e ligantes betuminosos. Desta forma, a reciclagem de pavimentos rodoviários é uma técnica de reabilitação estrutural de pavimentos degradados, que surge como alternativa às soluções tradicionais que envolvem a colocação de um reforço no pavimento. Assim, o conceito de reciclagem constitui um ciclo fechado de vida do material (EAPA, 2007). Existem diversos processos de reciclagem que se podem distinguir entre si no que respeita ao sítio onde se produz a mistura e a temperatura a que esta se produz, pelas características do material a reciclar e pelo tipo de ligante utilizado (Fonseca, 2004).

A incorporação de material fresado na produção de novas misturas pode no entanto causar alguns problemas devido às características do betume. O facto do betume presente no material fresado se encontrar envelhecido obriga normalmente a um cuidado extra na formulação e execução de novas misturas (Abreu *et al.*, 2013b).

Os problemas que resultam do envelhecimento do betume traduzem-se essencialmente no seu endurecimento e conseqüente aumento da fragilidade (Johansson *et al.*, 1998). Este facto potencia a ocorrência de fenómenos de degradação do pavimento, como fendilhamento por fadiga, térmico e pela desagregação superficial resultante da perda de adesão entre o betume e os agregados (Antunes, 2005).

Desta forma, são colocados importantes desafios à reciclagem, no sentido de dar resposta aos problemas anteriormente enunciados. Uma forma de resolver este problema é a utilização de aditivos comerciais, conhecidos como agentes de rejuvenescimento, para restabelecer as propriedades do betume perdidas no processo de envelhecimento (Abreu *et al.*, 2013a).

Este tipo de aditivos tem, como o próprio nome indica, o objetivo de rejuvenescer as misturas betuminosas, permitindo a recuperação de parte das propriedades iniciais dos betumes envelhecidos através da reconstituição química do betume. Os rejuvenescedores são produtos com a capacidade de restaurar a parte dos maltenos que desaparecem do betume devido à oxidação (Brownridge, 2010).

Todos os aspetos abordados servem de motivação na procura de soluções alternativas às existentes atualmente, por forma a resolver o problema do envelhecimento do betume.

Um método que permite melhorar significativamente a qualidade dos pavimentos é adição de polímeros às misturas betuminosas (Becker *et al.*, 2001). Segundo Becker *et al.* (2003) a modificação do betume com polímeros é considerada a melhor opção para melhorar as propriedades da mistura.

Nesse sentido, considerou-se pertinente estudar a possibilidade de utilizar betumes modificados para solucionar os problemas associados ao envelhecimento do betume quando se produzem misturas recicladas com elevadas percentagens de material fresado. Para o efeito foram utilizados betumes modificados comerciais ou especialmente desenvolvidos em laboratório.

Para além da modificação física do betume recorrendo a polímeros virgens ou reciclados, que apenas consiste na dispersão da fase polimérica no betume, também existe a modificação química que pode ser alcançada através da utilização de polímeros reativos. O betume é composto quimicamente por asfaltenos, resinas, saturados e aromáticos. Na modificação química o polímero reage efetivamente com os asfaltenos formando um composto inseparável (Becker *et al.*, 2003, Costa e Diogo, 2013).

## **1.2. Objetivos**

O principal objetivo deste estudo é desenvolver misturas betuminosas com elevadas taxas de reciclagem, que tirem proveito das propriedades que os betumes modificados com polímeros podem conferir a essas novas misturas.

Com o percurso delineado, pretende-se a tomada de conhecimento nesta temática através de métodos de caracterização convencionais e avançados, que permitam determinar a influência nas características dos ligantes regenerados, após utilização de betumes modificados comerciais e

betumes modificados produzidos em laboratório. Depois da avaliação das propriedades dos ligantes, o estudo também compreende uma componente fundamental de validação orientada para o desempenho das respetivas misturas betuminosas.

A seguir deve-se avaliar a resistência ao envelhecimento dos ligantes e a regeneração do betume envelhecido presente no material fresado através de métodos convencionais e através da caracterização química dos ligantes.

Por fim, e para que se possa validar duma forma mais sustentada a aplicação desta tecnologia, deve ser avaliada a viabilidade económica das misturas produzidas com os betumes regeneradores desenvolvidos neste estudo.

### **1.3. Organização da dissertação**

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos distintos incluindo o capítulo atual que serve de introdução à dissertação.

No Capítulo 2, é apresentada uma visão sobre a reciclagem, a sua importância e a forma como esta é realizada. No caso da reciclagem de pavimentos, é feita uma descrição sumária das diversas técnicas existentes bem como das suas principais vantagens. A reciclagem é abordada relativamente aos outros materiais que serão utilizados nas misturas. Ainda neste capítulo, é realizada uma avaliação sobre a investigação atual que tem vindo a ser desenvolvida.

No terceiro capítulo, é realizada uma breve descrição dos materiais a serem incorporados nas misturas, bem como dos métodos utilizados nas diversas fases do trabalho. Relativamente aos métodos, estes abordam não só os métodos de ensaio, mas também os métodos de produção dos ligantes modificados e das misturas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, estando dividido nas diversas etapas, começando pela análise do material fresado, seguida da formulação da mistura e do estudo do processo de fabrico. Seguidamente são apresentados os dados relativos às percentagens de aditivos que devem ser incluídos no betume, e por último é realizada a análise do comportamento das misturas estudadas.

No quinto e último capítulo apresentam-se as considerações finais bem como trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos no domínio de investigação desta dissertação.



## 2. ESTADO DA ARTE SOBRE REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS EM MISTURAS BETUMINOSAS

### 2.1. Introdução

Os pavimentos rodoviários após a sua construção sofrem um processo de degradação sob a ação do tráfego e das condições atmosféricas. Esse processo ocorre durante a vida útil do pavimento, podendo no entanto, ser mais lento se o pavimento for bem concebido, bem construído e bem conservado. As solicitações a que os pavimentos rodoviários estão sujeitos devido ao tráfego têm aumentado, quer em volume, quer em agressividade, assim como as exigências dos utentes. Deste modo, e paralelamente à construção de novas infraestruturas rodoviárias, surge a necessidade de reabilitar uma parte da rede construída, que se encontra degradada.

Normalmente, a reabilitação de pavimentos é frequentemente conseguida pela reconstrução ou reforço tradicional. A reciclagem aparece como uma alternativa, reaproveitando os materiais provenientes dos pavimentos degradados (Figura 2.1) associando vantagens ambientais, técnicas e económicas (Gomes, 2005).



Figura 2.1 – Resíduos de pavimentos flexíveis

Em muitos países as políticas governamentais procuram minimizar a utilização de matérias-primas, promovendo a reutilização e a reciclagem de materiais (resíduos) da indústria da construção (PIARC, 2002).

As principais razões que levam à crescente utilização da técnica de reciclagem de pavimentos são as seguintes:

- Os recursos naturais limitados;
- As limitações ambientais em relação à abertura e funcionamento de novas pedreiras;

- Utilização de depósitos (vazadouros) é cada vez mais regulamentada e onerosa;
- Utilização de materiais disponíveis no local e, portanto, mais económicos;
- Inevitabilidade da ocorrência de degradações nos reforços de pavimentos.

Este processo permite reduzir a utilização de novos agregados e ligantes betuminosos. A utilização da reciclagem de pavimentos flexíveis como fonte de matéria-prima reduz os volumes de resíduos a vazadouro e a utilização de recursos naturais (Batista, 2004), e desta forma o conceito de reciclagem constitui um ciclo fechado de vida do material (EAPA, 2007).

Atualmente, quando se aborda a temática da reciclagem, fala-se necessariamente em valorização de resíduos. Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2006), que apresenta a caracterização da situação dos resíduos urbanos em Portugal continental, os resíduos plásticos (Figura 2.2) representam uma parte significativa dos resíduos urbanos produzidos em Portugal.



Figura 2.2 – Resíduos plásticos

Devido ao tempo de decomposição e pela sua grande quantidade em volume, os plásticos são considerados como um dos resíduos mais problemáticos. No entanto, o processo de recuperação é relativamente fácil para a maioria dos plásticos, excluindo os que não têm a possibilidade de ser novamente processados, tais como os termoendurecíveis e elastómeros.

A pavimentação rodoviária é, potencialmente, uma área relevante para a reutilização de grandes volumes de resíduos plásticos, devido ao grande volume de materiais necessários na construção e manutenção dos pavimentos rodoviários. A quantidade de materiais novos utilizados em pavimentação, tais como os agregados, é elevada, sendo esta de aproximadamente trinta toneladas por metro construído de autoestrada (Mota-Engil, 2010).

## 2.2. Reciclagem de pavimentos rodoviários

Não é difícil encontrar hoje em dia pavimentos em ruína total por não terem sido entretanto adaptados, por reabilitação e reforço, às condições de tráfego atual, como é apresentado nas imagens da Figura 2.3. Normalmente, os materiais existentes que já perderam as suas características iniciais devido às condições de tráfego atual e também ao envelhecimento, poderão ser utilizados quase na totalidade (Martinho *et al.*, 2004).



Figura 2.3 – Degradações dos pavimentos flexíveis

A reciclagem de pavimentos rodoviários é uma técnica de reabilitação estrutural de pavimentos degradados, que surge como alternativa às soluções tradicionais que envolvem a colocação de um reforço no pavimento. Consiste em reutilizar os materiais existentes na construção de uma nova camada, mediante a desagregação mecânica ou fresagem dos mesmos numa certa profundidade, juntamente com a adição de um ligante (Fonseca, 2004). Com a técnica de reciclagem, o material resultante do processo de fresagem não é colocado em zonas de vazadouro. Pelo contrário, parte deste material e em alguns casos a totalidade volta a ser reutilizado.

Os tipos de reciclagem dos materiais são muito variados, tendo em conta o elevado número de variáveis que é necessário considerar. As técnicas podem distinguir-se quanto ao local de reciclagem, que pode ser no próprio local da obra (*in situ*) ou em central. No que diz respeito à temperatura de fabrico da mistura reciclada, poderá ser a quente ou a frio. Outra variável muito importante é o ligante utilizado, que pode ser betume, emulsão betuminosa, cimento entre outros (Batista, 2009).

### 2.2.1. Tipos de reciclagem

Os tipos de reciclagem podem-se distinguir-se no que respeita ao sítio onde se produz a mistura e a temperatura a que esta se produz, pelas características do material a reciclar e pelo tipo de ligante utilizado.

Segundo Fonseca (2004) existem parâmetros que permitem fazer a distinção entre as diferentes técnicas de reciclagem e que se apresentam na Tabela 2.1

Tabela 2.1 – Parâmetros de distinção das técnicas de reciclagem

| Tipo de reciclagem |                            |    |                      |
|--------------------|----------------------------|----|----------------------|
| 1                  | Local de produção          | a) | <i>In Situ</i>       |
|                    |                            | b) | Em central           |
| 2                  | Temperatura                | a) | A frio               |
|                    |                            | b) | A quente             |
| 3                  | Caraterísticas do material | a) | Camadas homogéneas   |
|                    |                            | b) | Duas ou mais camadas |
| 4                  | Tipo de ligante            | a) | Hidráulico           |
|                    |                            | b) | Emulsão Betuminosa   |
|                    |                            | c) | Betume Espuma        |
|                    |                            | d) | Betume               |

Os processos de reciclagem dos pavimentos flexíveis são muito variados, tendo em atenção o elevado número de variáveis a considerar. Entretanto, face às condicionantes particulares de cada tipo e estado de pavimento, nem todas as alternativas apresentam as mesmas potencialidades (Branco *et al.*, 2005).

Desta forma, cabe ao Engenheiro selecionar a técnica de reciclagem que mais se adequa ao pavimento a reabilitar, de forma a conciliar a melhor solução do ponto de vista da funcionalidade requerida para esse pavimento, devendo ter sempre em atenção a relação custo/benefício da solução adotada (Fonseca, 2004).

Considerando as variáveis como o local de execução, a temperatura de produção e os ligantes a adicionar, podem-se definir diferentes processos de reciclagem (Branco *et al.*, 2005). A seguir apresentam-se as diferentes técnicas de reciclagem e as principais características que as distinguem.

### *i. Técnicas de Reciclagem in Situ*

As técnicas de reciclagem *in situ* são técnicas em que a desfragmentação do pavimento a reciclar e a produção da nova mistura realizam-se no mesmo local (Figura 2.4). O recurso a este tipo de técnicas apresenta vantagens face às técnicas de reciclagem em central, tais como um menor custo, menor consumo energético e menor degradação de outras estradas existentes, uma vez que não é necessário transportar o material (Fonseca, 2004).



Figura 2.4 – Reciclagem *in situ*

Embora este tipo de vantagem seja atualmente muito valorizada, devido à conjuntura económica, existe uma desvantagem neste tipo de reciclagem no que respeita à qualidade final da mistura. De facto, as misturas preparadas *in situ* apresentam normalmente características inferiores às produzidas em central (Martinho, 2004).

Quanto ao processo de execução das misturas betuminosas neste tipo de técnicas, estes variam de acordo com o tipo de ligante (Figura 2.5) que é utilizado, bem como a temperatura a que a mistura é produzida no local (Figura 2.6). Tendo em conta estes parâmetros podem-se definir os seguintes processos (Branco *et al.*, 2005):

- Reciclagem *in situ* a frio, com cimento;
- Reciclagem *in situ* a frio, com emulsão betuminosa;
- Reciclagem *in situ* a frio, com betume espuma;
- Reciclagem *in situ* a quente, com betume e/ou rejuvenescedor;

### *ii. Técnicas de Reciclagem em Central*

Enquanto na reciclagem *in situ* o processo de desfragmentação do pavimento e produção da nova mistura são realizados no mesmo local, na reciclagem em central todos os materiais a reciclar têm de ser deslocados até ao local onde a central se encontra (Figura 2.7).



(a)

(b)

Figura 2.5 – Reciclagem *in situ* (a) com betume espuma e (b) com rejuvenecedor



(a)

(b)

Figura 2.6 – Reciclagem *in situ* (a) a frio e (b) a quente



Figura 2.7 – Central de produção de misturas betuminosas

Nesta alternativa de reciclagem há que fresar o pavimento existente, transportar o material fresado para o local onde se encontra a central e transportar novamente a mistura produzida para o pavimento em reabilitação. Deve-se ter em atenção que, dado o número e tipo de operações envolvidas, é fundamental procurar avaliar todos os custos de modo a justificar a

viabilidade desta opção de reciclagem (Branco *et al.*, 2005). No entanto, o facto da qualidade da nova mistura ser claramente superior à obtida nas técnicas de reciclagem *in situ* faz com que este tipo de reciclagem em central seja por vezes preferido ao nível técnico.

É importante distinguir o tipo de central em que a reciclagem é feita. No caso das centrais betuminosas descontínuas, estas permitem um melhor controlo da qualidade da mistura do que as centrais betuminosas contínuas (EAPA, 2007). Na reciclagem em central podem ser definidos os seguintes processos:

- Reciclagem em central a frio, com emulsão betuminosa;
- Reciclagem em central a frio, com betume espuma;
- Reciclagem em central temperada, com emulsão betuminosa;
- Reciclagem em central a quente, com betume.

Ainda no que respeita à reciclagem, existem algumas limitações ao nível técnico como sendo a percentagem de material usado a incorporar na nova mistura. Assim sendo, por limitações ao nível das próprias centrais, a percentagem máxima de material usado a incorporar, quando o material fresado é incorporado a quente, ronda os 50% (INIR, 2011).

No contexto deste estudo, tem especial interesse fazer uma abordagem ao processo de reciclagem a quente em central (Figura 2.8), já que se apresenta como uma das técnicas mais utilizadas no mercado. Estas utilizam o betume como ligante, sendo no entanto possível a incorporação de outros aditivos, como por exemplo um rejuvenescedor comercial, necessário para recuperar as propriedades do betume presente no material fresado, obtendo-se assim uma melhor qualidade da mistura reciclada resultante.



Figura 2.8 – Esquema de reciclagem a quente em central (adaptado de Wirtgen, 2003)

A reciclagem a quente também apresenta vantagens de ordem económica e ambiental. Desde logo pela economia ao nível dos agregados e do betume, esta última mais acentuada com o aumento que se tem verificado nos últimos anos no preço do petróleo bruto. Ao nível ambiental podem indicar-se o menor consumo de recursos naturais (betume e agregados) e uma melhor aplicação dos materiais provenientes da fresagem. Comparativamente às restantes técnicas identifica-se a vantagem da mistura reciclada apresentar características mecânicas idênticas às das misturas tradicionais, não baixando assim a sua contribuição em termos de resistência estrutural (Branco *et al.*, 2005).

Quando se fala da reciclagem em central a quente, de acordo com o tipo de centrais que estão a ser utilizadas, existem diferentes taxas máximas de reciclagem que podem ser aplicadas. Quando não existe um pré-aquecimento do material fresado, isto é, o material fresado é adicionado a frio, a taxa máxima de reciclagem situa-se entre os 35% e os 40%. No caso de existir um pré-aquecimento do material fresado, a taxa de reciclagem pode atingir valores que rondam os 65% a 70% (Branco *et al.*, 2005). Estas taxas estão normalmente associadas ao rendimento das centrais.

Mesmo limitando a taxa de reciclagem, existe normalmente um decréscimo da ordem dos 20% de rendimento, levando a que muitas empresas não adiram à produção deste tipo de mistura. Este método tem ainda o inconveniente das temperaturas de produção e aquecimento dos agregados serem mais elevadas, o que pode originar a libertação de maiores quantidades de emissões para a atmosfera, para além de aumentar o envelhecimento do betume, o que pode a curto prazo comprometer o desempenho das misturas recicladas.

### **2.2.2. Condicionantes à incorporação do material fresado**

As misturas betuminosas recuperadas provêm de obras de construção, reabilitação, conservação e demolição de pavimentos rodoviários e aeroportuários. Estas misturas podem ser constituídas por misturas betuminosas fresadas, por placas retiradas de camadas de pavimento posteriormente desagregadas ou britadas, ou por materiais excedentários da produção de misturas betuminosas (Especificação LNEC E 472, 2009).

No entanto, a incorporação de material fresado levanta alguns problemas ao nível da formulação, da tecnologia de fabrico das misturas betuminosas e do envelhecimento do betume. Este último é um aspeto ao qual foi dada especial relevância no presente estudo. A seguir

explica-se de que forma estas condicionantes influenciam a produção das novas misturas betuminosas recicladas.

### i. Formulação

A formulação das misturas betuminosas recicladas depende das características do material fresado, dos seus constituintes e da taxa de incorporação que irá condicionar a seleção de “novos” materiais (Guimarães, 2012). De modo a facilitar a compreensão do processo de formulação deste tipo de misturas, é apresentado na Figura 2.9 um organograma com a metodologia que se deve seguir na formulação de misturas recicladas a quente em central (Batista *et al.* (2000) e Batista (2006)).

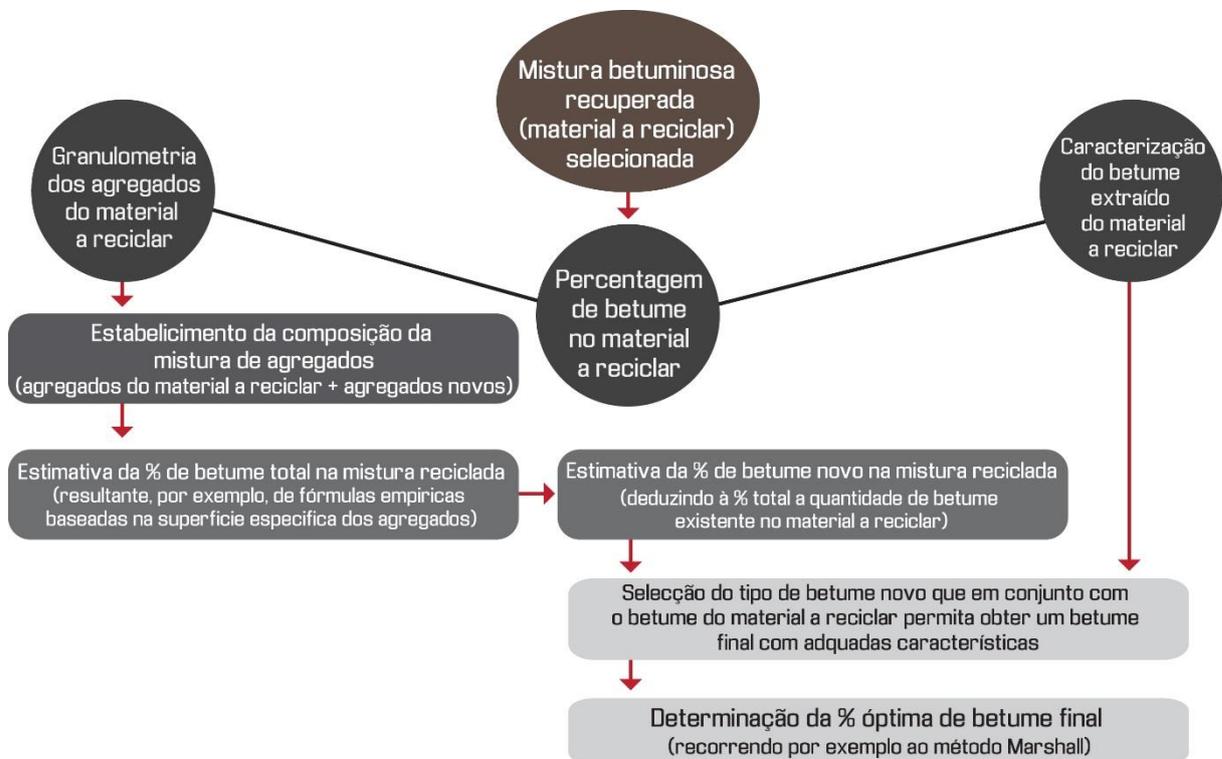


Figura 2.9 – Metodologia de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente

Esta metodologia de formulação compreende quatro fases. A primeira fase trata-se da caracterização da mistura recuperada (material fresado ou RAP) e do estudo da composição da mistura de agregados (agregados reciclados e agregados virgens). Os agregados novos são selecionados de modo a que, juntamente com os agregados reciclados, se obtenha uma composição granulométrica que cumpra as especificações do caderno de encargos. Na fase seguinte, é estimada a quantidade total de betume da mistura recorrendo a fórmulas empíricas baseadas na superfície específica dos agregados.

A terceira fase procura seleccionar o tipo de betume, que juntamente com o betume presente no material a reciclar e eventualmente com um rejuvenescedor, cumpra as características pretendidas para o ligante. Na última fase otimiza-se a mistura, recorrendo ao método Marshall ou outro método que aplique ensaios mecânicos e que permita determinar a quantidade final de betume a utilizar na mistura (Batista, 2006, Batista *et al.*, 2000).

*ii. Tecnologia de fabrico de misturas betuminosas recicladas a quente em central*

Para a reciclagem a quente em central de misturas betuminosas podem utilizar-se centrais de fabrico contínuas ou descontínuas, devidamente adaptadas para este efeito. Deverão estar munidas dos dispositivos necessários a uma adequada incorporação do material fresado, de forma a evitar degradação de mistura e em particular do betume presente no material fresado (Especificação LNEC E 472, 2009). A seguir, descreve-se as principais características das centrais betuminosas que devem ser utilizadas na reciclagem.

▪ *Centrais Contínuas*

As centrais contínuas deverão dispor de um sistema que permita a introdução de misturas betuminosas numa zona do tambor-misturador onde se encontrem protegidas do queimador. O aquecimento e desidratação destes materiais são feitos pelos gases de combustão quentes, e pelo contacto com os agregados virgens que deverão ser sobreaquecidos. Tendo em conta o tipo de tambor secador-misturador (TSM) da central e as adaptações efetuadas para adição do material fresado, as taxas de incorporação deste tipo de material poderá variar numa gama que varia entre os 10% e os 50% (EAPA, 1998, Especificação LNEC E 472, 2009).

Na Figura 2.10 apresenta-se um esquema de uma central betuminosa contínua adaptada para o fabrico de misturas betuminosas recicladas a quente.

Neste tipo de centrais, existem ainda diferentes métodos para o fabrico das misturas betuminosas recicladas a quente, sendo os principais: central com TSM de fluxos paralelos, central com TSM de fluxos contracorrentes e central contínua de tambor duplo (EAPA, 1998).

▪ *Centrais Descontínuas*

Nas centrais descontínuas, as técnicas de reciclagem existentes, também denominadas de reciclagem em central de torre, incluem os métodos a frio, a quente e ainda um método *Recyclelean* (reciclagem limpa).

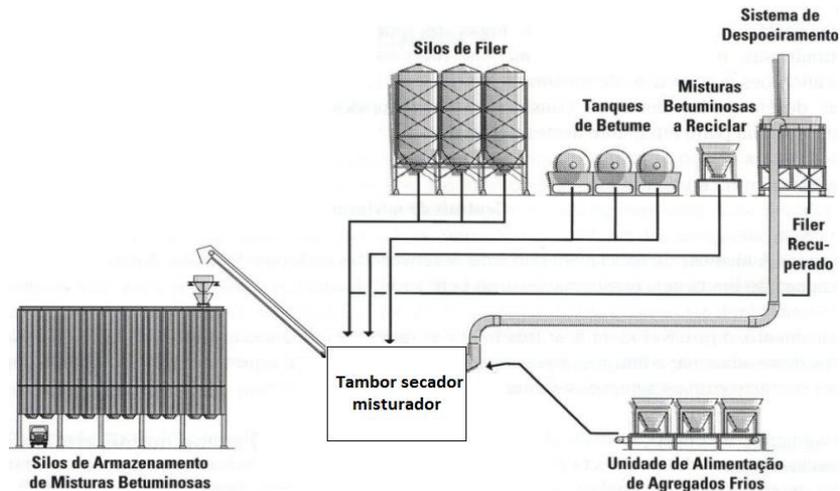


Figura 2.10 – Esquema da central betuminosa contínua (adaptado de EAPA (1998))

No método a frio, o material fresado é introduzido a frio junto com os agregados ou diretamente na unidade de mistura (Figura 2.11). Os agregados virgens são sobreaquecidos de modo a que a mistura final apresente uma temperatura adequada. Por este motivo, nestes métodos, só em condições especiais se consegue ir além de incorporações de 30%.

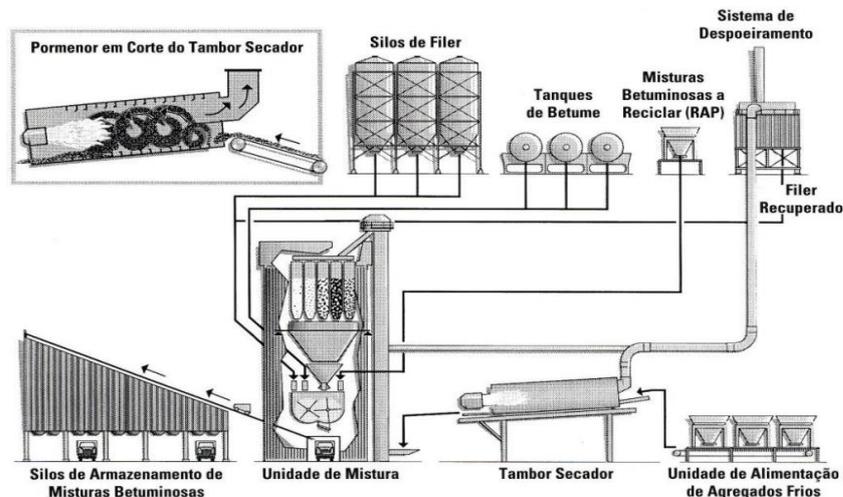


Figura 2.11 – Esquema da central betuminosa descontínua ou de torre (EAPA, 1998)

Para alcançar taxas de reciclagem mais elevadas, o material fresado pode ser aquecido e introduzido na unidade de mistura (método a quente) ou ser aquecido juntamente com os agregados (método Recyclean) antes de ser elevado para a unidade. Desta forma, conseguem-se taxas de reciclagem que podem atingir, no primeiro caso 70% e no segundo caso pelo menos 35% (EAPA, 1998).

No entanto, todos estes métodos implicam que o material fresado tenha sido britado e crivado para as dimensões adequadas, onde os materiais de maiores granulometrias são rejeitados.

As centrais betuminosas descontínuas têm uma estruturação de funcionamento muito flexível, o que permite uma variação do tipo de mistura ou da fórmula de trabalho sempre que necessário. Outro aspecto a ter em atenção quando se utiliza elevadas taxas de material fresado, é que este processo obriga a recorrer a centrais com algumas alterações relativamente às que são utilizadas na produção de misturas convencionais. Um exemplo disso é o trabalho de Palha *et al.* (2014) em que a central (Figura 2.12), se diferencia das restantes centrais descontínuas nas seguintes componentes:

- Anel especial para introdução de material fresado (MF) no interior do tambor secador;
- Linha de introdução de MF até ao misturador incluindo tolva de pesagem;
- Linha de introdução de fresados no anel do tambor secador com dosagem volumétrica;
- Sistema de betume espuma à entrada do misturador;
- Sistema automático para a introdução de fibras com dosagem ponderal;
- Sistema automático para introdução de líquidos com dosagem volumétrica.



Figura 2.12 – Exemplo de central descontínua ou de torre

Nesse trabalho de Palha *et al.* (2014), a obtenção de elevadas taxas de reciclagem é conseguida com base na separação e introdução do material fresado em diferentes fases do processo produtivo. Todo este processo permite melhorar a qualidade de produção das misturas e reduzir o envelhecimento do betume.

### *iii. Envelhecimento do betume*

Os betumes sofrem um processo de envelhecimento, a que corresponde alterações físicas e químicas, com reflexo no seu comportamento, em consequência das condições que são impostas ao longo da sua vida, desde a produção na refinaria até ao final do ciclo em serviço na camada do pavimento rodoviário (Guimarães, 2012). Todo este ciclo faz com que o betume perca

gradualmente a sua principal característica, a flexibilidade. Este processo resulta da oxidação devido à exposição ao ar e da evaporação dos componentes voláteis, que leva à perda do seu comportamento viscoelástico. Os problemas que estão associados são o endurecimento e aumento da fragilidade do betume, que potencia fenômenos de degradação, como fendilhamento térmico/fadiga e desagregação superficial pela perda de adesão entre o betume e os agregados (Antunes, 2005, Johansson *et al.*, 1998).

Os betumes ao longo da sua vida vão passando por vários estádios. Este termo é utilizado no domínio da química para indicar cada um dos momentos em que se pode dividir um processo ou evolução do envelhecimento do betume. Assim, o processo de envelhecimento pode apresentar determinados estádios tendo em conta a especificidade das condições envolvidas. Segundo Whiteoak (1991) as principais fases do envelhecimento dos betumes são:

- Durante o armazenamento e transporte do betume a temperaturas elevadas em períodos que podem ser prolongados;
- Durante a fase construtiva, envolvendo o fabrico da mistura betuminosa a quente e o seu armazenamento, transporte e colocação em obra;
- Durante o serviço, enquanto constituinte de uma camada de pavimento, sobretudo na camada de desgaste, onde fica exposto a solicitações e aos agentes atmosféricos.

Não se tem dado grande relevância à contribuição da fase de armazenamento do betume para o envelhecimento uma vez que a área da superfície do betume que está exposta ao ar é pequena quando comparada com o volume armazenado (Whiteoak, 1991).

As duas últimas etapas têm maior importância para o envelhecimento, onde se distingue a fase construtiva, como sendo a de envelhecimento a curto prazo, da fase de serviço no pavimento, como sendo a de envelhecimento de longo prazo (Guimarães, 2012).

A vida útil do betume é prolongada pela reciclagem da mistura betuminosa. Desta forma dá-se início a um novo ciclo de vida e o betume deve oferecer uma resposta equilibrada na contribuição para as propriedades funcionais e estruturais das novas misturas betuminosas. É necessário um equilíbrio entre a rigidez e a elasticidade, de modo a conferir ao betume uma certa flexibilidade a baixas temperaturas, impedindo assim o fendilhamento térmico. Ao mesmo tempo uma rigidez suficiente para que no patamar das temperaturas elevadas do pavimento se evite a ocorrência de deformações permanentes (Mahrez e Karim, 2003).

### 2.2.3. Processo de oxidação de betumes

A oxidação é um processo que envolve a incorporação de oxigénio atmosférico nas moléculas e a passagem a estádios mais oxidados (Guimarães, 2012), que são consideradas as principais transformações químicas que ocorrem no processo de envelhecimento dos betumes. Devido a estas razões, torna-se importante o estudo do envelhecimento para melhor tratar a regeneração dos betumes.

Do ponto de vista químico, esta avaliação poderá ser feita em termos de frações genéricas de compostos diferenciados pela polaridade, e ainda, em termos de índices espectroscópicos associados a grupos funcionais com oxigénio (Costa e Diogo, 2013).

Uma forma de determinar estes índices passa pelo recurso a uma técnica de análise, a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), em que se mede a absorção da radiação eletromagnética na região do infravermelho. Essa absorção deve-se á excitação de modos vibracionais moleculares, cujas frequências próprias dependem dos arranjos e dos átomos na estrutura molecular. Assim, a análise do envelhecimento do betume pode ser verificada pelo incremento de grupos funcionais contendo oxigénio nas estruturas moleculares, pela formação de carbonilos (C=O) e de sulfóxidos (S=O). Esta análise permite também avaliar os estádios de oxidação que os betumes apresentam, após um processo de regeneração (Guimarães, 2012).

Os estádios de oxidação podem ser traduzidos por índices espectroscópicos de carbonilo ( $I_{C=O}$ ) e de sulfóxidos ( $I_{S=O}$ ) obtidos a partir da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Os índices utilizados resultam da razão entre as áreas das bandas detetadas pelo espectro de infravermelho, centradas, respetivamente, em torno de  $1700\text{ cm}^{-1}$  e  $1030\text{ cm}^{-1}$  relativamente ao somatório das áreas correspondentes a uma parte representativa da estrutura de hidrocarbonetos das moléculas (Costa e Diogo, 2013).

De facto, durante o envelhecimento oxidativo desenvolvem-se absorções significativas na região que corresponde ao comprimento de onda  $1700\text{ cm}^{-1}$  (Petersen, 1986). A Figura 2.13 demonstra a evolução das ligações C=O em função do tempo, através de betumes recuperados de trechos experimentais com diferentes tempos de serviço. Deste modo, verifica-se um aumento do índice de carbonilo com o aumento do envelhecimento do betume.

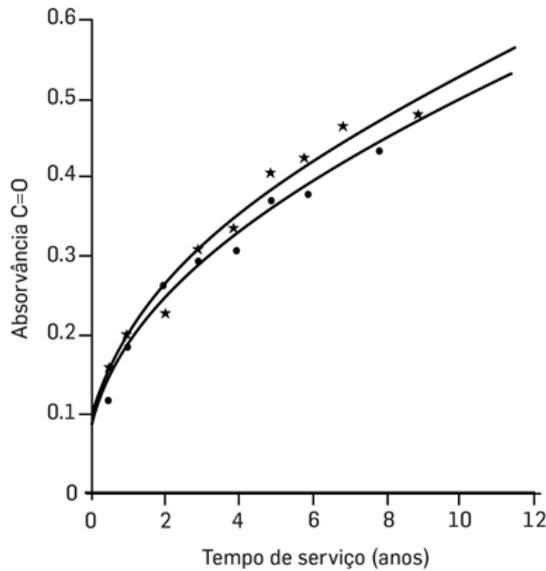


Figura 2.13 – Absorvância relativa às ligações C=O (Petersen, 1986)

Por sua vez, as quantidades de sulfóxidos que se formam a partir da oxidação estarão relacionadas com os teores de enxofre no betume (Mckay e Wolf, 1992). No entanto, ao considerar esses teores como medida da oxidação do betume, não se têm em conta as várias oxidabilidades dos compostos (Herrington e Ball, 1995).

A formação de sulfóxidos e de grupos com a ligação S=O durante o envelhecimento oxidativo seguem as suas próprias cinéticas, como demonstra a Figura 2.14, onde se regista comportamentos distintos das ligações com carbonilo C=O e que estão dependentes, entre outros aspetos, das condições de exposição (Petersen, 1998).

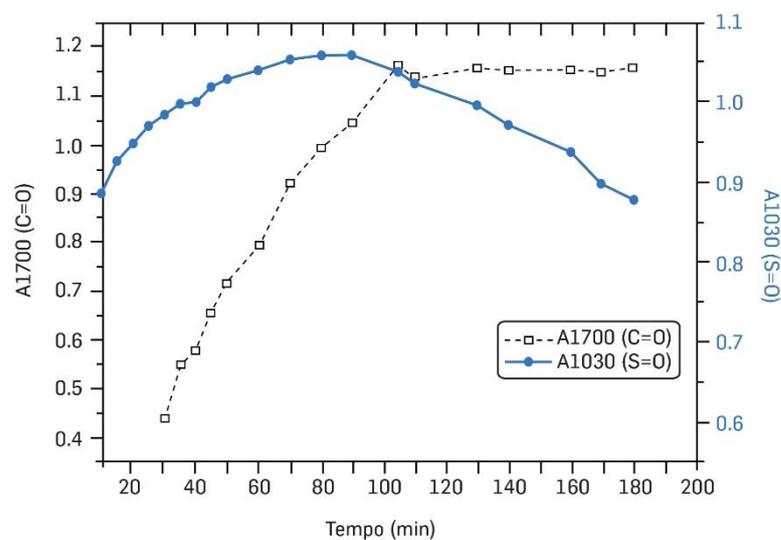


Figura 2.14 – Evolução dos índices  $I_{S=O}$  e  $I_{C=O}$  durante o envelhecimento do betume (Petersen, 1998)

Pode-se ainda referir um estudo de Zhang *et al.* (2011) que permitiu monitorizar o envelhecimento do ligante através das alterações nos espectros obtidos, e em particular os que afetam duas bandas características, as ligações duplas de carbonilo (C=O) e sulfóxido (S=O). Para isso, foram produzidos ligantes modificados com SBS num misturador de alto corte, em que a primeira ligação (C=O) permitiu monitorizar a oxidação de todo o ligante e a segunda ligação (S=O) esperava-se que pudesse fornecer alguma indicação acerca da alteração na estrutura do copolímero SBS vulcanizado, mas sem grande sucesso neste segundo objetivo.

#### **2.2.4. Soluções aos desafios colocados à reciclagem**

Como já ficou demonstrado, a incorporação de elevadas taxas de material fresado coloca importantes desafios à reciclagem, pelo que, a seguir são apresentados estudos e as soluções encontradas de forma a contornar este problema.

Segundo Abreu *et al.* (2013a) a utilização de aditivos comerciais, conhecidos como agentes rejuvenescedores, permitem restabelecer as propriedades do betume através da reconstituição química perdida durante as distintas fases de envelhecimento do betume (Guimarães, 2012). Os rejuvenescedores são produtos com a capacidade de restaurar a parte dos maltenos que desaparecem do betume devido à oxidação (Brownridge, 2010).

Um exemplo da utilização de rejuvenescedores é o estudo de Shen *et al.* (2007) que recorreu à formulação *Superpave* para produzir uma mistura de referência sem material fresado, uma mistura com material fresado onde utilizou um betume novo muito mole e ainda uma mistura com material fresado e betume mole com o rejuvenescedor. Com base neste estudo foi possível retirar as seguintes conclusões:

- As misturas que continham material fresado e aditivo rejuvenescedor obtiveram um comportamento à deformação permanente igual ou até superior às misturas recicladas produzidas com um betume muito mole;
- Verificou-se que a utilização do betume muito mole apenas permite incorporar no máximo 38% de material fresado, enquanto nas misturas recicladas com rejuvenescedores foi possível incorporar um máximo de 48% de MF;
- Todas as misturas contendo material fresado apresentaram características semelhantes à mistura de referência. Por sua vez, as propriedades físicas e os resultados do ensaio de tração indireta (ITS) foram satisfatórios;

- As misturas recicladas apresentam um bom desempenho à deformação permanente.

Um outro estudo realizado por Silva *et al.* (2012) demonstra que, com base em estudos laboratoriais, misturas produzidas com 100% de material reciclado poderão vir a ser aplicadas em pavimentação. Ainda prevê a utilização de óleo de motor usado como agente rejuvenescedor. As principais conclusões desse estudo são:

- A utilização do óleo de motor usado apresenta-se como uma boa alternativa econômica e ambiental relativamente a um aditivo rejuvenescedor comercial. Este permite reduzir a temperatura de produção, com menor consumo de energia, sem comprometer a trabalhabilidade da mistura;
- Todas as características mecânicas avaliadas neste trabalho apresentam melhores resultados quando comparadas com uma mistura convencional. Este resultado poderá dever-se ao elevado teor de finos e à maior estabilidade do ligante;
- Esta tecnologia de reciclagem com utilização de 100% de material fresado pode ser usada para produzir misturas betuminosas, desde que se procure fazer um tratamento adequado do material durante todo o processo.

Palha *et al.* (2014) estudou a utilização de três aditivos rejuvenescedores diferentes em misturas com elevadas taxas de material fresado, tendo obtido as seguintes conclusões:

- As misturas com os três rejuvenescedores apresentam um comportamento muito semelhante;
- No geral pode admitir-se que as misturas com aditivos rejuvenescedores apresentam um desempenho melhor, quando comparadas com a mistura reciclada sem qualquer aditivo, pelo que se justifica o seu uso neste tipo de misturas.

Outra tecnologia que merece especial atenção no âmbito deste estudo foi denominada de *Fenixfalt*, sendo especialmente dirigida à regeneração do betume envelhecido para produção de misturas recicladas (López *et al.*, 2005). O principal interesse desta tecnologia é a capacidade de reciclar as misturas existentes com os mais altos níveis de eficiência, permitir reciclar 100% das misturas e transformar um dos problemas das misturas recicladas (fragilidade) numa vantagem, graças à elasticidade dos aditivos, produzindo misturas com módulo elevado e excelente resistência à fadiga.

Dentro gama de produtos da *Fenixfalt*, o *Regefalt* é aquele que permite a maior taxa de reciclagem a quente em centrais. O processo *Regefalt* regenera o betume envelhecido contido

no material fresado. Assim, os novos betumes resultantes da mistura do betume envelhecido, betume novo e *Regefalt* poderá apresentar um desempenho pelo menos igual ou ainda melhor do que os betumes convencionais. A regeneração e a modificação do betume são conseguidas através de copolímeros (estireno, isopreno e/ou butadieno). Existem dois tipos de ação neste tipo de tecnologia: o aditivo sólido contribui para a remoção da oxidação e para a criação de uma rede na matriz elastomérica do betume; por outro lado, a escolha do betume, que por meio da fluidificação irá facilitar a obtenção da penetração desejada para o ligante final da mistura reciclada. Este é um processo sustentável de regeneração de materiais, uma vez que podem ser reutilizados várias vezes após cada ciclo de utilização, abrindo assim um novo potencial técnico, porque para além das grandes poupanças a nível energético e económico, reduz a utilização de matérias-primas e permite a valorização das misturas (López *et al.*, 2005).

A evidência experimental das obras em andamento têm como objetivo validar o efeito da redução da oxidação e aumento das propriedades elásticas dos ligantes. Assim, apresentam-se as experiências que confirmam a validade do processo. O exemplo espanhol da CN 525 permite tirar as seguintes conclusões (CEDEX, 2001):

- Níveis de módulo elevado associados a altos valores de resistência à fadiga;
- O procedimento responde ao problema da reciclagem, sem limitar a quantidade de material fresado, podendo ser utilizado 100% desse material, o que dependerá da adaptabilidade da central e de todo o equipamento associado;
- Permitiu validar o princípio químico da regeneração e, em segundo lugar, a possibilidade de modificar quimicamente por reticulação as propriedades dos ligantes regenerados com características elásticas.

Todos os aspetos abordados servem de motivação na procura de novas soluções, de forma a resolver o problema do envelhecimento do betume e, conseqüentemente, aumentar flexibilidade das misturas recicladas. Assim, no âmbito deste estudo, pretende-se desenvolver misturas recicladas com uma melhor resistência à fadiga, promovida pela capacidade de recuperação elástica que os polímeros podem conferir às misturas e por uma eventual regeneração do betume envelhecido presente no material fresado. Nesse sentido, aborda-se em seguida a possibilidade de incorporar polímeros em misturas betuminosas recicladas.

## 2.3. Incorporação de polímeros nas misturas betuminosas

O volume de tráfego tem vindo a aumentar em todo o Mundo, em particular o volume de tráfego dos transportes de mercadorias, e neste momento prevê-se que a sua procura continue a aumentar. Além disso, o aumento do peso bruto e as alterações das configurações das cargas dos veículos pesados levam à aceleração dos danos causados nos pavimentos (Mantzos e Capros, 2006). Para minimizar esses danos, procedeu-se à incorporação de polímeros nos ligantes betuminosos como forma de melhorar as suas propriedades, o que tem vindo a ser objeto de um constante e crescente interesse (ProbiGalp, 2014). De facto, este é um método que permite melhorar significativamente a qualidade dos pavimentos (Becker *et al.*, 2001). De um modo geral, com adição de polímeros verifica-se a seguinte melhoria das propriedades de um betume convencional (ProbiGalp, 2014):

- Menor suscetibilidade térmica;
- Menor intervalo de plasticidade;
- Maior coesão;
- Melhor resposta elástica;
- Maior resistência à ação da água;
- Maior resistência ao envelhecimento.

No entanto, deve existir um conhecimento das propriedades dos diferentes materiais poliméricos, de forma a seleccionar os que efetivamente podem conferir melhores características às misturas betuminosas.

### 2.3.1. Polímeros

A palavra polímero vem do grego *poli* (muitas) mais *mero* (partes), e é exatamente isso, a repetição de muitas unidades (*poli*) de um tipo de composto químico (*mero*). A polimerização é o nome dado ao processo no qual os monómeros reagem para dar origem a uma molécula de polímero (Felipetto, 2003). Um exemplo disto verifica-se através da polimerização do monómero de etileno que resulta no polietileno.

Os polímeros podem ser enquadrados em quatro categorias: plásticos, elastómeros, fibras e aditivos. Estes podem dividir-se, pelas suas características de fusão, em termoplásticos e termoendurecíveis. Termoplásticos são os polímeros capazes de serem moldados várias vezes devido à sua capacidade de se tornarem fluidos, sob a ação da temperatura, e depois retornar às

características anteriores quando há um decréscimo de temperatura (Lucas *et al.*, 2001). Por outro lado, os polímeros termoendurecíveis, no seu estado final, são insolúveis e não fundem. Estes são frequentemente líquidos em algum estágio de sua transformação, até serem curados pelo calor, catálise ou outros meios químicos. Depois de estarem totalmente curados, não fundem. Alguns plásticos que são normalmente termoplásticos podem ser transformados em termoendurecíveis por meio de reticulação (Sidney, 1998).

Relativamente ao tipo de monómeros, os polímeros podem ser classificados em homopolímeros ou copolímeros. Se existe somente uma espécie de monómeros na estrutura do polímero, como no caso do polietileno, este designa-se por homopolímero. Mas se tiver dois ou mais tipos diferentes de monómeros, este é um copolímero. Um exemplo de um copolímero em bloco é o estireno-butadieno, ou SB, que consiste em blocos de estireno polimerizados (um monómero) e butadieno polimerizado (outro monómero) (FHWA, 2009).

Uma das principais características dos polímeros é o comportamento mecânico. Segundo este, podem dividir-se em elastómeros e plásticos. Os elastómeros podem dividir-se em borrachas naturais ou sintéticas, e são constituídas por macromoléculas que exibem elasticidade à temperatura ambiente. Devido à evolução dos copolímeros, os elastómeros sintéticos também podem ter características termoplásticas (elastómeros termoplásticos TPE), como é o caso do copolímero SBS. Os plásticos são materiais que contêm como componente principal, que é um polímero orgânico, e vários aditivos.

### **2.3.2. Técnicas de introdução dos polímeros nas misturas betuminosas**

Adição de polímeros às misturas betuminosas pode acontecer de três formas distintas: pela adição de polímeros em substituição de agregados, pelo revestimento dos agregados e ainda pela modificação do betume. A Figura 2.15 apresenta um esquema que demonstra de que forma se pode introduzir polímeros nas misturas betuminosas.

#### *i. Adição de polímeros como agregados (método a seco)*

Atualmente é reconhecido que a utilização de agregados reciclados na construção pode contribuir para a sustentabilidade no futuro. Contudo, para a utilização destes materiais é indispensável que tenham boa qualidade, bom desempenho técnico-económico, haja garantia no fornecimento de quantidades necessárias, e baixos custos de produção (Robinson, 2005).

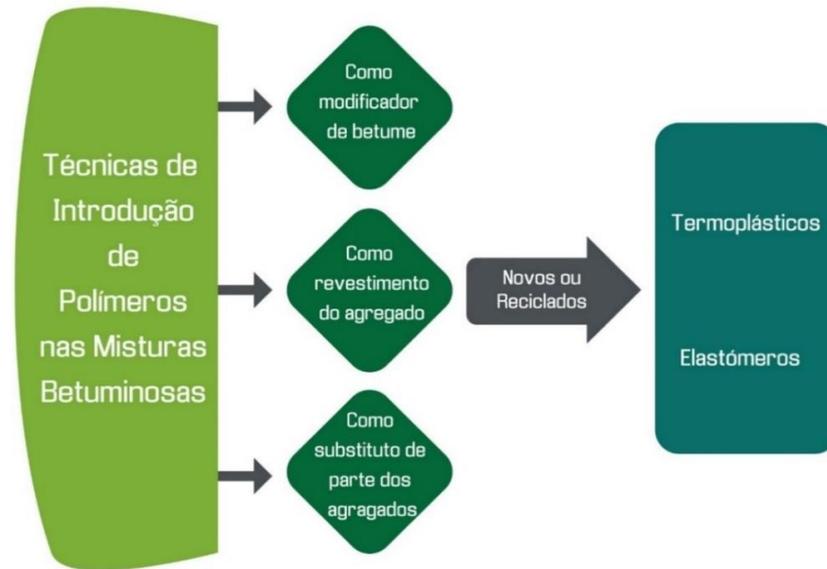


Figura 2.15 – Técnicas de introdução de polímeros nas misturas betuminosas  
(adaptado de Costa (2013))

Neste sentido, a melhor forma de demonstrar as vantagens da utilização dos polímeros como agregados é através dos trabalhos já feitos. WRAP (2004), Zoorob e Suparma (2000) realizaram estudos que demonstram os benefícios desta técnica, e as principais conclusões destes estudos sobre esta técnica foram:

- Diminuição da densidade da mistura betuminosa;
- Melhoria na resistência às deformações permanentes;
- Misturas menos sensíveis à água.

Todavia, estes estudos focaram-se essencialmente nos polímeros termoplásticos. Costa (2010) apresenta um estudo onde procurou usar os polímeros termoendurecíveis, em particular o PEX reticulado moído (Figura 2.16), e que permitiu obter as seguintes conclusões:

- Melhor desempenho à deformação permanente quando comparado com uma mistura convencional;
- Menores variações do valor do módulo com a evolução da temperatura;
- Melhor desempenho à fadiga e sensibilidade à água, relativamente a uma mistura convencional.

Porém, é importante ter em atenção os custos associados a este processo, que podem fazer com que o mesmo não seja tão apetecível. Assim, deve-se ter em consideração o custo do processamento do material para produção em tamanhos adequados, aumento do consumo de betume e energia despendida para o sobreaquecimento do agregado primário (WRAP, 2004).



Figura 2.16 – Adição de polímeros como agregados

*ii. Revestimento de agregados com polímeros*

Com o aumento da percentagem de resíduos plásticos introduzidos nas misturas betuminosas, o polímero foi apresentando problemas de separação da mistura. Assim, desenvolveu-se uma técnica na qual os agregados aquecidos a cerca 170 °C são revestidos com resíduos plásticos, nomeadamente polietileno, polipropileno e poliestireno, sendo depois utilizados como matéria-prima para pavimentos flexíveis. Este processo ajuda a ter uma melhor ligação do ligante com os agregados revestidos devido ao aumento da área de contacto entre o polímero e o betume. Esta técnica permite reduzir os vazios impedindo desta forma absorção de humidade e a oxidação do betume, o que resultou na redução de fendas e desagregação da mistura. Permite ainda uma redução em cerca de 10% da percentagem de betume necessária na mistura e evita o uso de agentes anti descolamento. O processo pode ser realizado *in situ* e não necessita de envolvimento industrial. Em termos ecológicos possibilita a diminuição de resíduos plásticos, valorizando assim esses resíduos (Vasudevan *et al.*, 2010).

*iii. Modificação dos betumes com polímeros (método húmido)*

A modificação dos betumes com polímeros confere às misturas betuminosas menor suscetibilidade térmica e uma maior flexibilidade, ou seja, permite responder mais eficazmente a maiores solicitações do pavimento, maior resistência ao envelhecimento durante a utilização, maior eficácia de comportamento das misturas concebidas para resolver alguns problemas funcionais como melhoria das características de drenagem superficial e menor impacto do ruído provocado pelo rolamento (Branco *et al.*, 2005).

Para se atingir o objetivo de melhorar as propriedades do betume, o polímero selecionado deve criar uma rede secundária ou um novo sistema de equilíbrio dentro do betume por interações moleculares ou por reação química com o betume. A formação de um sistema funcional de betume modificado baseia-se na dispersão fina de polímero no betume para a qual a composição química dos betumes é importante. O grau de modificação depende das propriedades do polímero, do teor em polímero e da natureza do betume (Isacson e Lu, 1998).

Na Figura 2.17 é demonstrado de que forma se obtém a modificação do betume. Neste processo o polímero é introduzido no betume quente e fluído, durante um período de tempo, de modo a garantir a interação entre o polímero e o betume.

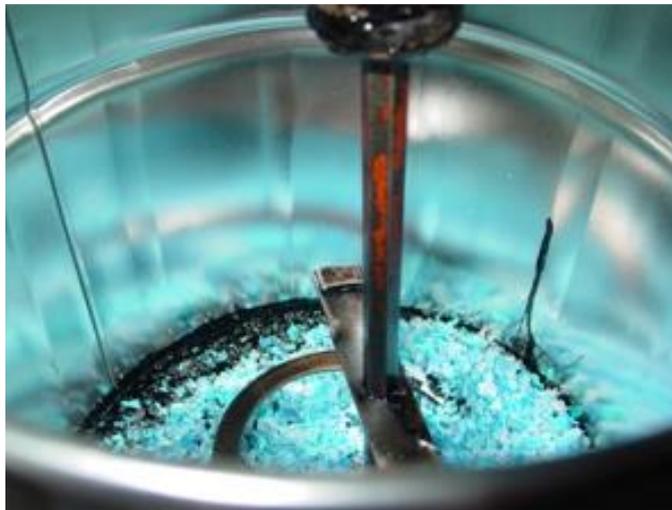


Figura 2.17 – Modificação do betume com polímero

## 2.4. Betumes modificados com polímeros

Neste subcapítulo pretende-se apresentar alguns aspetos relacionados com betumes modificados com polímeros. Neste sentido, pretende-se abordar a influência das condições de produção na modificação dos betumes. Também é importante perceber que tipo de polímeros são os mais utilizados na modificação do betume e quais as vantagens e desvantagens da sua utilização. No que respeita aos polímeros reciclados, importa referir que tipologias são mais adequadas para incorporar nas misturas, sem que o desempenho do ligante fique comprometido.

### 2.4.1. Influência das condições de produção

A modificação do betume com polímeros é considerado a melhor opção para melhorar as propriedades das misturas betuminosas (Becker *et al.*, 2003). O estudo de Costa *et al.* (2013) permitiu avaliar as vantagens que resultam da modificação de betumes com diferentes resíduos plásticos. Neste estudo, é também avaliada a influência das condições de produção nas propriedades dos ligantes, cujo desempenho foi comparado com um betume base convencional e um betume modificado comercial (Styrelf 13/60). De forma a comparar os vários polímeros, os betumes modificados foram todos preparados nas mesmas condições: 5,0% de polímero em relação ao peso do betume, um tempo de digestão de 60 minutos à temperatura de 180 °C, num misturador IKA RW20 a uma velocidade de agitação de 350 rpm. As principais conclusões do estudo foram as seguintes:

- Verificou-se que os ligantes com polímeros reciclados conseguem ter propriedades semelhantes, ou até melhores do que um betume modificado comercial;
- Dos polímeros avaliados, o EVA, SBS, PEAD e PEBD obtiveram uma má estabilidade ao armazenamento, enquanto o ABS e a borracha apresentaram uma baixa capacidade para modificar o betume.

Contudo, dado o mau resultado obtido pela estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados, deve ser adotada uma estratégia no sentido de solucionar esse problema. A modificação de betumes com misturadores ou dispersadores de alta velocidade, o ajuste da percentagem de polímero ou a utilização de aditivos podem ser formas para solucionar o problema da estabilidade. Nesse sentido, para evitar o custo associado à conversão dos polímeros em pó e na tentativa de produzir ligantes mais estáveis, Costa (2013) utiliza um dispersador de alto corte IKA (ULTRA TURRAX T65) e avalia a relação entre os resultados dos ligantes produzidos com diferentes dispersadores (de baixo e alto corte). Este estudo permitiu retirar as seguintes conclusões:

- A utilização do dispersador de alto corte é uma mais-valia para a produção de ligantes, como demonstram os resultados de microscopia (Figura 2.19);
- O ajuste do tempo de duração da mistura, bem como o teor de polímero, de acordo com o ligante base e o polímero utilizado, deverá ser cuidadosamente estudado de modo atingir-se uma produção mais eficaz e estável;
- A compatibilização química das duas fases também será algo que deve ser explorado, de modo a melhorar a estabilidade dos ligantes.

A Figura 2.18 é esclarecedora quanto às diferenças entre o agitador de baixo corte RW 20 e o dispersador de alto corte ULTRA TURRAX T65. Na Figura 2.19 são apresentadas as diferenças do resultado da microscopia de betumes produzidos nos diferentes equipamentos.

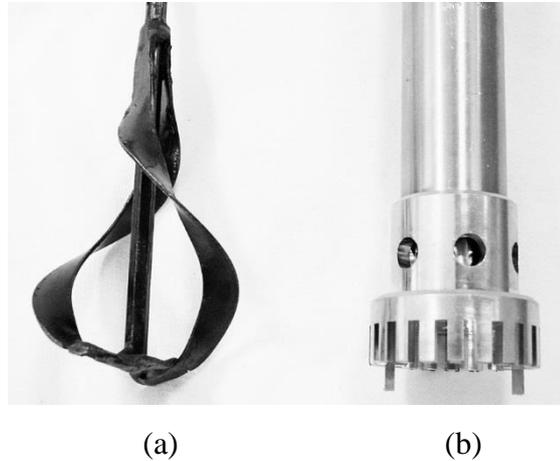


Figura 2.18 – Elementos dos misturadores usados para produção de betumes modificados  
(a) Agitador RW 20 e (b) Dispersador ULTRA TURRAX T65

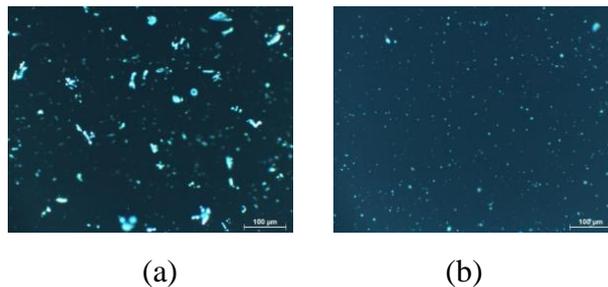


Figura 2.19 – Resultados microscopia de betumes produzidos com (a) agitador RW 20 e com  
(b) dispersador ULTRA TURRAX T65

#### 2.4.2. Características dos betumes modificados com polímeros

Relativamente ao conjunto de polímeros existentes no mercado, importa explicar algumas condições importantes que estes devem respeitar para que sejam considerados como modificadores do betume, uma vez que nem todos respeitam estas condições. Por isso, os polímeros devem:

- Ser compatíveis com o betume;
- Resistir à degradação das temperaturas de mistura;
- Melhorar a suscetibilidade à temperatura do betume;
- Ser processados por equipamentos convencionais de mistura e de aplicação;

- Atribuir viscosidade adequada às temperaturas normais de aplicação;
- Manter as suas propriedades durante o armazenamento;
- Ter custos aceitáveis.

Na modificação do betume, os plásticos, os elastómeros, a borracha recuperada e as fibras têm sido os mais utilizados (Isacsson e Lu, 1995). Na Tabela 2.2 é apresentado o conjunto de polímeros existentes em cada uma das tipologias mencionadas.

Tabela 2.2 – Polímeros adequados para modificação do betume (Isacsoon e Lu, 1998)

|                     |                        |   |
|---------------------|------------------------|---|
| Plásticos           | Termoplásticos         | Polietileno (PE)<br>Polipropileno (PP)<br>Policleto de vinilo (PVC)<br>Poliestireno (PS)<br>Etileno acetato de vinilo (EVA)         |
|                     | Termoendurecíveis      | Resinas epóxicas  |
| Elastómeros         | Borracha natural       | Copolímero estireno-butadieno (SBR)   |
|                     | Elastómeros sintéticos | Copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS)<br>Terpolímero etileno-propileno-dieno (EPDM)<br>Copolímero isobutileno-isopreno (IIR) |
| Borracha recuperada |                        |   |
| Fibras              | Termoplásticos         | Fibras de poliéster<br>Fibras de polipropileno  |

A modificação de betumes com polímeros permite conferir ao ligante determinados benefícios, e algumas limitações. Segundo Costa (2013), a modificação de betumes permite uma maior capacidade de recuperação elástica devido aos elastómeros, um aumento do ponto de amolecimento, uma diminuição da penetração e uma maior viscosidade. Além disso, a flexibilidade e a ductilidade a baixas temperaturas são mais favoráveis com o betume modificado, podendo preencher os requisitos de melhoria de desempenho dos betumes sob condições de clima frio e quente. No entanto, este processo apresenta limitações, tais como possíveis problemas de compatibilidade e estabilidade no betume, aumento do preço devido ao processo de modificação e ainda aumento do consumo de energia, tendo em conta a necessidade de maiores temperaturas para fabrico da mistura e compactação.

Apesar dos polímeros virgens melhorarem significativamente as propriedades das misturas betuminosas, a utilização de polímeros reciclados poderá apresentar um resultado equivalente nos pavimentos rodoviários (Fuentes-Audén *et al.*, 2008). Segundo García-Morales *et al.* (2004) os polímeros termoplásticos reciclados mais promissores são a borracha de pneus recuperada, o etileno-acetato de vinilo (EVA) e os polietilenos de alta e baixa densidade.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

Os materiais utilizados no presente estudo podem dividir-se em quatro tipos: o material resultante da fresagem de pavimentos, os agregados novos, os betumes e os polímeros. A seguir será apresentada uma breve descrição dos materiais e os motivos da sua seleção.

##### 3.1.1. Material fresado

O material fresado (MF) é o resultado da fresagem da camada superficial de um pavimento de uma autoestrada, que foi armazenado junto à central betuminosa de uma empresa de construção rodoviária. Ao ser unicamente fresada uma camada do pavimento é possível garantir maior homogeneidade (Fonseca *et al.*, 2013).

O material fresado é composto por dois tipos de materiais, nomeadamente os agregados, que mantêm as características originais, podendo variar apenas ligeiramente as suas dimensões, e o betume.

Este último material implica a realização de um estudo mais cuidado, devido aos anos de serviço em que esteve exposto aos agentes climáticos, podendo encontrar-se num estado avançado de envelhecimento (Abreu *et al.*, 2013b). Na Figura 3.1 é possível visualizar o MF que é utilizado neste estudo.



Figura 3.1 – Material fresado

### 3.1.2. Agregados novos

A escolha do tipo de agregados tem em conta a disponibilidade destes na região onde o estudo é realizado. Assim, os agregados são essencialmente de origem granítica, com exceção do filer que é de origem calcária.

Uma vez que se pretende utilizar uma elevada percentagem de MF, segundo Silva *et al.* (2012) deve-se ter em atenção que o MF poderá apresentar uma elevada percentagem de material fino, que poderá condicionar a formulação da mistura betuminosa.

Na Figura 3.2 são apresentados os agregados novos a utilizar na produção das misturas betuminosas recicladas.



Figura 3.2 – Agregados novos utilizados no estudo

### 3.1.3. Polímeros

Neste estudo procura-se utilizar os polímeros com maior potencial para a modificação de betumes, de forma a otimizar a sua aplicação.

Nem todos os polímeros são adequados para a modificação do betume, pois devem ser compatíveis com o betume. Segundo Becker *et al.* (2001) o polímero virgem mais utilizado atualmente para modificar o betume é o elastómero sintético estireno-butadieno-estireno, conhecido por SBS (Figura 3.3 (a)).

No que diz respeito aos polímeros reciclados, um estudo de García-Morales *et al.* (2004) demonstra que o uso do polímero EVA (Figura 3.3 (b)) pode ser considerado uma alternativa viável, tanto do ponto de vista ambiental como económico. As conclusões deste estudo demonstram que o polímero permitiu melhorar o desempenho da mistura à deformação permanente e, tendo em atenção a percentagem utilizada de polímero, a mistura apresenta menor suscetibilidade térmica nas temperaturas de serviço, enquanto nas temperaturas elevadas permite um manuseamento e aplicação mais fácil.

O betume é composto quimicamente por asfaltenos, resinas, saturados e aromáticos. Na modificação química o polímero reage efetivamente com os asfaltenos formando um composto inseparável (Becker *et al.*, 2003).

Uma das tecnologias aplicada na reciclagem é a *Fenixfalt*, que utiliza um copolímero reativo (Figura 3.3 (c)) de estireno, isopreno e/ou butadieno que desencadeia um processo de redução química nos componentes oxidados no betume e permite uma harmoniosa integração dos novos componentes (López *et al.*, 2005). Este produto é comercializado com o nome *Regefalt* e desperta especial interesse neste estudo tendo em conta o objetivo de regenerar o betume envelhecido.

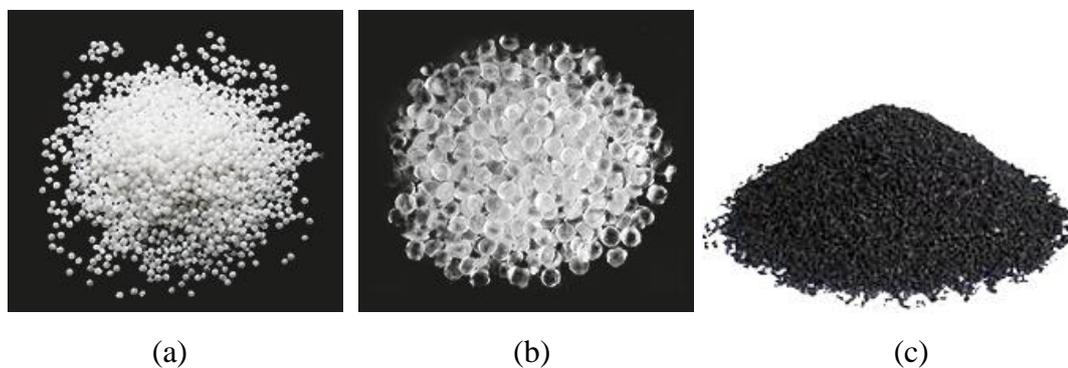


Figura 3.3 – Polímero (a) virgem SBS (b) reativo REG e (c) reciclado EVA

#### 3.1.4. Betumes

Dado que o ligante é o componente que mais influência tem no desempenho das misturas betuminosas (Branco *et al.*, 2005), deve-se ter especial atenção na seleção do mesmo. Para isso devem definir-se critérios de seleção.

Deste modo, a escolha dos betumes base a utilizar no estudo deve ter em consideração fatores como: o preço, a disponibilidade no mercado português, as características e a experiência de utilização destes ligantes em misturas betuminosas.

Da modificação dos betumes base com polímeros prevê-se maior rigidez e ductilidade do betume resultante, tendo em conta as características conhecidas dos polímeros (Becker *et al.*, 2001). Assim, o betume modificado terá uma função regeneradora do betume envelhecido. Este betume regenerador deve ainda interagir com o betume envelhecido, de forma a promover a flexibilidade do ligante e consequentemente da mistura betuminosa. De modo a não obter um ligante com uma rigidez excessiva (após modificação com polímeros e junção ao betume envelhecido existente no MF), deve-se selecionar um betume base com penetração elevada e ponto de amolecimento baixo, características essas necessárias para um bom desempenho posterior da mistura em serviço. Tendo em conta estes aspetos, e os produtos existentes no mercado português, selecionou-se o betume Cepsa 160/220.

O mercado dos betumes apresenta hoje soluções comerciais que podem, no âmbito deste estudo, ser utilizadas com o mesmo princípio, no que diz respeito à regeneração de betumes envelhecidos. A Cepsa apresenta no mercado a gama Styrelf de betumes modificados com polímeros. Segundo CEPESA (2014) os ligantes Styrelf são obtidos através de uma reação química entre o betume e os polímeros, que confere características diferenciadoras relativamente aos betumes convencionais.

Desta forma, dentro da gama Styrelf deve-se optar por um betume que cumpra os requisitos de penetração, anel e bola e recuperação elástica, e ainda se deve ter em conta a sua disponibilidade no mercado. Assim, o betume Styrelf 13/60 foi o que melhor se adequou a estes parâmetros de seleção.

## **3.2. Metodologia do estudo**

### **3.2.1. Caracterização do material fresado e formulação da mistura**

Uma completa caracterização do material fresado (MF) é importante na medida em que permite fazer uma correta formulação da mistura betuminosa. Com base em Fonseca *et al.* (2013), a seguir é demonstrado todo o processo de caracterização a que foi sujeito o MF.

*i. Separação do material fresado*

Apesar de existir um método de laboratório capaz de obter um maior controle no processo de separação (Abreu *et al.* (2013b)), neste trabalho a separação do material fresado foi baseada num procedimento mais realista de separação realizado em central para grandes quantidades de MF, com recurso a um classificador (Figura 3.4) com uma malha de abertura 10 mm (Fonseca *et al.*, 2013).



Figura 3.4 – Classificador utilizado para separação do MF em duas frações

A Figura 3.5 demonstra o aspeto visual do MF a incorporar nas misturas após o processo de separação. Do processo de separação resulta o fresado fino que entra no processo a frio, enquanto, o fresado grosso é sobreaquecido juntamente com os agregados.



Figura 3.5 – Aspecto visual da separação do fresado em (a) finos e (b) grossos

*ii. Percentagem de betume do material fresado*

Para proceder à determinação da percentagem de ligante presente no material fresado utilizou-se o método de ignição indicado na norma EN 12697-39, que tem por base a incineração do ligante (Figura 3.6). Este ensaio foi realizado em várias amostras, de modo a verificar a homogeneidade de todo o MF.



Figura 3.6 – Determinação da percentagem em betume do MF

De modo a perceber de que forma a separação condiciona a percentagem do betume presente em cada fração do MF, este parâmetro foi determinado para cada fração obtida com o método de separação estudado, o que permitiu confirmar que a maior percentagem de betume está presente no material fino.

*iii. Análise granulométrica dos agregados do material fresado*

A análise granulométrica do MF foi realizada de acordo com a norma EN 12697-2, permitindo avaliar a amostra com maior pormenor. Numa primeira fase foi efetuada na amostra total, sendo que posteriormente a análise granulométrica foi feita separadamente às frações fina e grossa. Após o processo de determinação da percentagem do ligante por ignição, foram efetuadas as granulometrias às amostras resultantes, sendo que esta separação diz respeito às reais dimensões dos agregados do MF, e das suas frações fina e grossa. Na Figura 3.7 é apresentado o processo mecânico de peneiração.

*iv. Formulação da mistura betuminosa*

No que diz respeito à formulação da mistura betuminosa reciclada, teve-se em consideração o trabalho desenvolvido por Palha *et al.* (2013), que usa o método de Marshall (EN 12697-34) por forma a determinar a percentagem ótima de betume (Figura 3.8). Após o processo de separação, 30% do MF fino é introduzido a frio na mistura e 20% do MF grosso é aquecido juntamente com os agregados novos, perfazendo 50% de MF no total da mistura betuminosa. Desta forma, procedeu-se ao estudo de formulação de forma a produzir misturas recicladas com 50% de MF.



Figura 3.7 – Peneiração mecânica do material fresado



Figura 3.8 – Fases do método Marshall de determinação da percentagem ótima em betume

### 3.2.2. Estudo e caracterização de betumes

O estudo dos ligantes vai permitir determinar as suas propriedades reológicas, sendo desta forma possível prever o comportamento dos ligantes às temperaturas em que ocorrem os fenómenos de deformação permanente e fendilhamento por fadiga. Ainda é possível definir a temperatura dos agregados, dos betumes regeneradores e as correspondentes temperaturas de produção e compactação da mistura betuminosa. Também se apresenta a metodologia para produção dos vários ligantes, uma vez que os betumes regeneradores seguem diferentes processos de produção, cada um com a sua especificidade.

#### *i. Recuperação do betume envelhecido existente no material fresado*

A perda de flexibilidade pode ser apontada como um dos maiores problemas que ocorrem no envelhecimento dos betumes. O betume envelhecido apresenta condicionalismos no que se

refere à incorporação em novas misturas, pois torna ainda mais difícil a previsão do comportamento da mistura betuminosa a longo prazo. Desta forma, e para o estudo que se pretende realizar, é essencial, para além de uma avaliação cuidadosa do betume presente no MF, um estudo que possibilite a avaliação do ligante obtido com a mistura do betume envelhecido e os betumes regeneradores. Estes estudos exigem elevadas quantidades de betume envelhecido, sendo difícil obter adequadas quantidades para o efeito.

Este problema leva muitos autores (Abreu *et al.*, 2013b, Guimarães, 2012) a optarem por recorrer a betumes envelhecidos em condições artificiais. Os motivos porque se recorre a estas técnicas são os seguintes: a grande quantidade necessária para os estudos é incompatível com as diminutas quantidades de betume que se extrai das misturas betuminosas e são necessárias elevadas quantidades de solventes.

Contudo, no estudo que se pretende desenvolver, o objetivo é recuperar as quantidades de betume envelhecido necessárias, uma vez que é reconhecida a importância de abordar a caracterização de betumes envelhecidos em ambiente natural e com a sua própria química e estrutura. A seguir descreve-se as principais fases do processo de recuperação do betume, como se pode observar através da Figura 3.9 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**



Figura 3.9 – Fases do processo de recuperação do betume

A primeira fase diz respeito à “lavagem” do material fresado, através do uso de tolueno. Para tal, cerca de 6,5 quilogramas de mistura são colocados numa centrífuga, onde é adicionado um litro de tolueno, deixando-se repousar durante meia hora, tendo o cuidado de verificar que todo o material fica submerso no solvente. Em seguida é feito um processo de seis ciclos, sendo que o tempo do ciclo é o necessário para extrair o tolueno do interior da centrífuga. Em

seguida, o tolueno (com alguns resíduos de betume) é colocado novamente dentro da centrifugadora e dá-se início a um novo ciclo. Após terminado este primeiro processo de lavagem é colocado meio litro de tolueno novo, e realiza-se o segundo processo, com igual número de ciclos. No final desta fase obtém-se uma mistura entre tolueno, ligante (betume) e finos.

A segunda fase tem por objetivo a separação entre a parte líquida (tolueno e betume) e a parte sólida (finos) resultante do processo anterior. Para isso, recorre-se a uma centrifugadora de precisão, onde a rotação atinge as 3000 rotações por minuto.

Ao ser colocada a mistura obtida anteriormente dentro da centrifugadora, existe a necessidade de garantir o equilíbrio. De modo a garantir isto, o peso do copo e da mistura deve ser igual para todos os copos. No final deste processo, o material fino fica no fundo dos copos onde foi colocada a mistura anterior e o tolueno e o betume são vazados para um recipiente.

A terceira fase compreende a separação entre o solvente e o betume, sendo para isso usado um processo de condensação. De referir que todo o processo foi realizado de acordo com a norma EN 12697-3 para recuperação do betume utilizando o evaporador rotativo.

Este processo permite obter uma quantidade de betume que ronda em média 250g. Este processo foi repetido até se obter aproximadamente 2000g de betume recuperado, que foi a quantidade de betume envelhecido necessária para realizar todo o estudo de betumes.

#### *ii. Produção dos betumes regeneradores com recurso ao método húmido*

A modificação de betumes com recurso ao método húmido é considerada a melhor opção para melhorar as propriedades da mistura segundo Becker *et al.* (2001). Também Costa (2013) utiliza este método, recorrendo a um dispersador de alto corte da IKA, o ULTRA TURRAX T65 (Figura 3.10). Os resultados da modificação com este equipamento indicam que é possível obter uma mistura mais homogênea de betume e polímero num menor intervalo de tempo, produzindo ligantes mais estáveis, mesmo com partículas iniciais de dimensões maiores.

De maneira a poder comparar de forma mais eficaz os dois tipos de polímeros em uso (SBS e EVA), devem ser preparados betumes nas mesmas condições: temperatura de produção de 180 °C e uma percentagem de 5,0% de polímero em relação ao peso total de ligante.



Figura 3.10 – Dispersador de alto corte IKA ULTRA TURRAX T65

Assim, a produção do betume regenerador prevê numa primeira fase o aquecimento do betume base Cepsa 160/220 à temperatura de 180 °C. De seguida é introduzido o polímero, e aguarda-se que a temperatura do betume com polímero atinja novamente os 180 °C. Depois mantem-se uma velocidade de rotação de 7000 rpm por um período de 20 minutos. Os dois betumes regeneradores produzidos em laboratório com os polímeros SBS e EVA reciclado seguem o mesmo processo.

*iii. Produção do ligante com recurso ao método seco*

A produção com recurso ao método seco é feita com o copolímero *Regefalt*, apresentando um processo de produção diferente segundo as especificações técnicas do produto, uma vez que deve ser adicionado ao MF diretamente na fase de mistura, antes de adicionar o novo betume.

Assim, para reproduzir este processo ao nível laboratorial (ainda na fase de estudo dos ligantes), optou-se por aquecer o betume envelhecido à temperatura de 180 °C, seguindo-se a adição do polímero no misturador de alto corte por um período não superior 2 minutos (tempo de produção de misturas de acordo com a norma EN 12697-35), mantendo uma velocidade de rotação na ordem dos 7000 rpm.

De seguida é adicionado o betume Cepsa 160/220, que é misturado um período de 5 minutos à temperatura de 180 °C e a uma velocidade de rotação de 250 rpm (misturador de baixo corte). Esta foi a melhor forma de representar o processo de mistura.

*iv. Produção do ligante de referência*

A validação deste tipo de misturas pressupõe a comparação com misturas em que seja utilizada uma tecnologia de produção semelhante. O trabalho desenvolvido por Shen *et al.* (2007) demonstra que a utilização de rejuvenescedores é essencial na obtenção de misturas recicladas com um melhor desempenho, sendo que este tipo de modificação segue o processo húmido já abordado anteriormente.

Por forma a determinar a percentagem ótima de rejuvenescedor, o estudo de Palha *et al.* (2014) demonstra que 3,0% é uma boa solução a utilizar na produção de misturas betuminosas recicladas rejuvenescidas. Dado que a utilização do rejuvenescedor implica um aumento significativo do valor de penetração, e tendo em conta o valor que se pretende obter no ligante final, o betume base utilizado nesta mistura foi da gama de penetração 70/100.

*v. Mistura dos betumes regeneradores com o betume envelhecido recuperado do MF*

Nesta fase, pretende-se misturar os betumes regeneradores com o betume envelhecido, verificando-se quais as principais alterações que ocorrem no betume envelhecido. Assim, o objetivo é simular o que poderá ocorrer aquando da fase de produção das misturas betuminosas recicladas (ao misturar os ligantes regeneradores com o MF).

De forma a garantir uma mistura homogénea entre o betume envelhecido e os betumes regeneradores, ambos são aquecidos à temperatura de 180°C e misturados durante 5 minutos num dispersador de baixo corte IKA RW 20, a uma velocidade de agitação de 250 rpm.

Neste processo estão incluídos os betumes regeneradores produzidos com recurso ao método húmido em laboratório e ainda o betume modificado comercial Styrelf 13/60 que também foi estudado como ligante regenerador.

*vi. Caracterização dos vários betumes*

No sentido de classificar todos os betumes usados neste estudo, a caracterização é feita de acordo com a norma EN 12591. A caracterização dos betumes será realizada com recurso aos ensaios que se identificam e se descrevem a seguir:

- Determinação do ponto de amolecimento dos betumes (também conhecido por temperatura anel e bola, ou A&B), de acordo com a norma EN 1427, indicando a

temperatura até à qual o betume mantém alguma estabilidade aquando da sua utilização em serviço (Figura 3.11 (a));

- O ensaio de penetração a 25 °C é uma medida indireta da viscosidade do betume à temperatura ambiente, sendo o processo de ensaio normalizado na norma EN 1426 (Figura 3.11 (b));
- O ensaio de resiliência (EN 13880-3) serve para avaliar a capacidade do betume recuperar elasticamente alguma da deformação sofrida, após aplicação de uma carga, o que acontece dado que são utilizados elastómeros no betume (Figura 3.11(c));

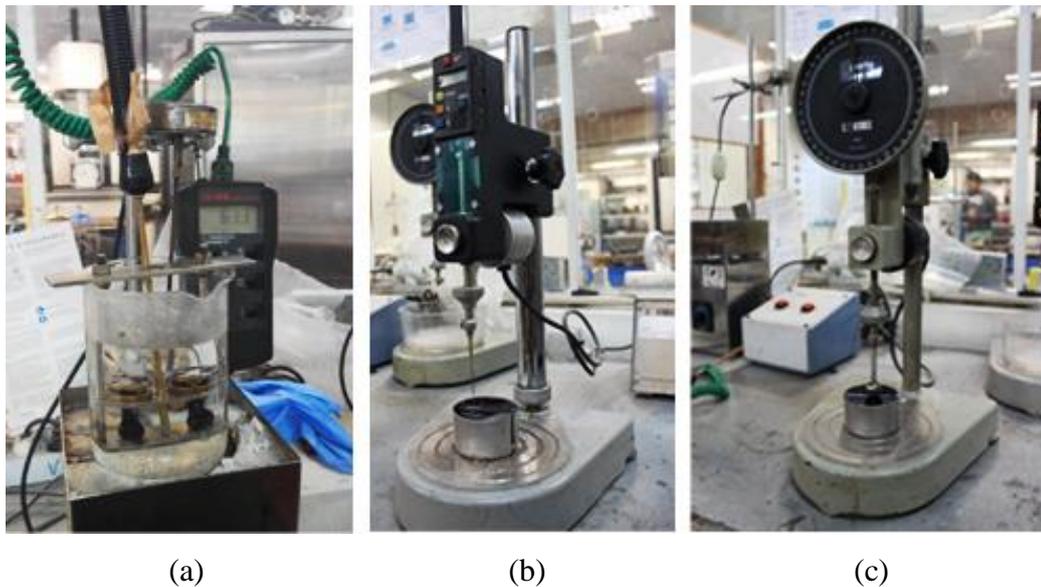


Figura 3.11 – Ensaio de (a) Anel e Bola (b) Penetração e (c) Resiliência

- A viscosidade foi determinada num viscosímetro rotacional *Brookfield*, que consiste em fazer rodar um *spindle* dentro de uma amostra de betume e medir progressivamente a força exercida entre a parede deste e o betume. Este procedimento foi adaptado por Silva *et al.* (2009) para avaliar a viscosidade numa gama de temperaturas compreendida entre os 100°C e 180°C (Figura 3.12 (a));
- Para determinar as propriedades reológicas dos betumes numa gama alargada de temperaturas (desde 19°C a 90°C) utilizou-se um reómetro dinâmico de corte (DSR ou *dynamic shear rheometer*) de acordo com a norma EN 14770. Este equipamento permite caracterizar o comportamento viscoelástico do betume e, deste modo, quantificar o módulo complexo, ângulo de fase e determinar a viscosidade dos ligantes a várias temperaturas (Figura 3.12 (b)).

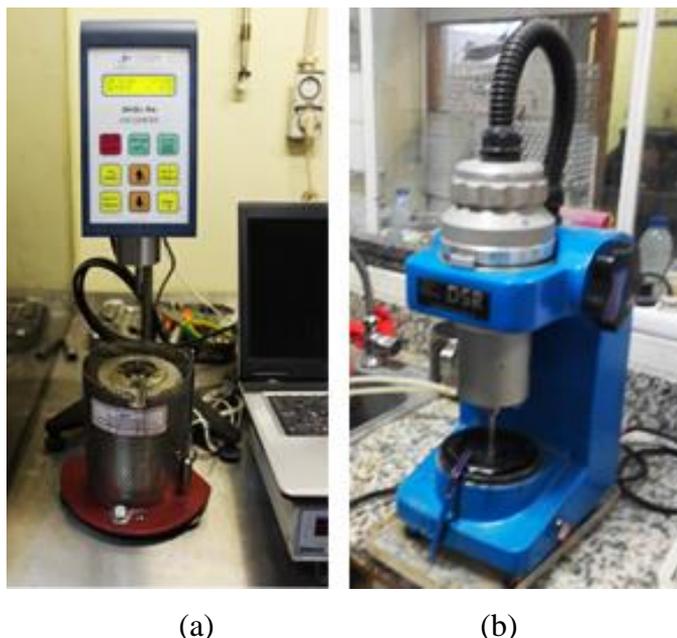


Figura 3.12 – Ensaio de (a) viscosidade rotacional e (b) reómetro DSR

### 3.2.3. Avaliação do desempenho das misturas

O estudo dos betumes permitiu avaliar características físicas e reológicas dos betumes, que puderam demonstrar qual o comportamento esperado das misturas betuminosas durante a produção, compactação e em serviço.

O estudo de betumes abrangeu a modificação de betumes com três polímeros diferentes e ainda um betume modificado comercial. Assim, era importante avaliar as quatro misturas betuminosas correspondentes, sendo necessário analisar todas as características mecânicas de validação dessas misturas. Porém, tendo em conta o prazo de execução deste estudo, só foi possível avaliar uma mistura que tem em conta a modificação do betume através do método húmido em laboratório. Assim, numa fase inicial limitou-se o estudo a três misturas betuminosas. O objetivo final desta parte do trabalho foi determinar qual o betume regenerador mais adequado para as misturas recicladas, sendo que para isso se procede aos seguintes ensaios para validação do desempenho das misturas betuminosas.

#### *i. Ensaio de Sensibilidade Água*

Para o ensaio de sensibilidade à água é necessário inicialmente preparar 6 provetes de dimensões idênticas aos utilizados no ensaio de Marshall. Em seguida é necessário agrupá-los em dois grupos distintos (3 provetes cada), com idêntica baridade aparente média e altura

média, sendo por isso necessário fazer esta análise prévia. Destes dois grupos formados, um deles é mantido a seco e à temperatura ambiente enquanto o outro grupo é condicionado, ou seja, é saturado em vácuo e depois é imerso em água a 40 °C durante pelo menos 68 horas, e no máximo 72 horas. Em seguida a temperatura da água é reduzida para 15 °C e os provetes ficam imersos mais 2 horas, enquanto os provetes secos são colocados a 15 °C ao ar, tal como especificado EN 12697-12. Após o tempo total de imersão, estes são ensaiados à tração indireta de acordo com a norma EN 12697-23 (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Equipamento utilizado no ensaio de sensibilidade à água

Após realizar o ensaio a todos os provetes, e dividindo os valores médios de resistência do provetes imersos pelos dos provetes secos, é possível calcular a resistência conservada em tração indireta (ITSR), que permite ter uma perceção do quanto a mistura em estudo é sensível à água.

#### *ii. Resistência à deformação permanente*

De modo a caracterizar a resistência à deformação permanente, existem diversas formas de ensaio, através de cargas estáticas ou cargas rolantes, podendo ser realizados à escala real ou em laboratório.

Para o presente estudo recorreu-se ao ensaio de pista (*Wheel Tracking Test* ou WTT), sendo este realizado em laboratório e consistindo essencialmente em fazer passar repetidamente uma roda sobre uma mistura betuminosa e fazer a medição da profundidade da rodeira, como ilustrado na Figura 3.14. Este simula a passagem dos rodados dos veículos de modo a ser possível prever o comportamento das misturas betuminosas a temperaturas elevadas.



Figura 3.14 – Equipamento utilizado no ensaio de pista

O ensaio de pista (WTT) foi realizado tendo como referência a norma EN 12697-22, tendo em consideração que a temperatura de ensaio foi de 50 °C, para uma força de 700 N, com uma frequência de 0,44 Hz e sendo aplicados 10 000 ciclos de carga.

Quanto aos resultados obtidos, os principais a ter em atenção são a taxa de deformação em ensaio de pista ( $WTS_{AIR}$ ), a profundidade média proporcional da rodeira ( $PRD_{AIR}$ ) e a profundidade do cavado da rodeira ( $RD_{AIR}$ ).

*iii. Ensaio de módulo de rigidez por flexão em quatro pontos*

O módulo de rigidez é uma das principais propriedades de uma mistura, sendo esta propriedade dependente da temperatura a que a mistura se encontra, da frequência de carregamento e das características dos materiais usados nas misturas.

De modo a conhecer o módulo de rigidez das misturas, as nove vigas preparadas anteriormente foram ensaiadas a 20 °C, segundo a norma EN 13108-20, que também é uma temperatura de projeto representativa de vários locais de Portugal. Além destes ensaios realizados a todas as vigas, duas vigas de cada mistura foram ensaiadas às temperaturas de 0, 10, 20 e 30 °C. Em cada ensaio é realizado um varrimento de frequências (0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8, 10, 0,1 Hz) de acordo com a norma EN 12697-26.

*iv. Ensaio de resistência à fadiga por flexão em quatro pontos*

A resistência à fadiga é uma propriedade fundamental das misturas betuminosas, para resistirem ao fendilhamento sob ação do tráfego, bem como sob ações de origem térmica.

Para o ensaio de resistência à fadiga (EN 12697-24), a temperatura de ensaio é de 20 °C e a frequência com que a carga é aplicada ao provete é de 10 Hz. Tal como referido anteriormente, todas as vigas foram inicialmente ensaiadas ao módulo de rigidez antes da realização do ensaio de resistência à fadiga, que é um ensaio destrutivo.

O ensaio de resistência à fadiga tem como intuito verificar ao fim de quantos ciclos a mistura atinge a ruína. Neste caso a ruína é definida pelo número de ciclos correspondente a uma redução do valor de módulo de rigidez da viga para metade do seu valor inicial, uma vez que o ensaio é realizado em extensão controlada. Com a realização do ensaio a vários provetes, para diferentes níveis de extensão, é possível determinar a lei de fadiga da mistura betuminosa em estudo. A Figura 3.15 demonstra o equipamento utilizado na determinação desta propriedade do material.



Figura 3.15 – Equipamento utilizado no ensaio de fadiga

### 3.2.4. Avaliação do envelhecimento

Um dos objetivos deste trabalho consiste na produção de ligantes capazes de resistir melhor ao envelhecimento provocado pelo fabrico da mistura betuminosa, em especial neste caso em que se está a produzir misturas betuminosas recicladas.

Apesar de existirem três principais fases de envelhecimento do betume, tal como foi apresentado anteriormente, importa realçar a fase construtiva. Esta fase do envelhecimento apresenta evoluções mais pronunciadas durante o fabrico da mistura betuminosa, superiores às

observadas durante o armazenamento, transporte e compactação. A fase de fabrico desencadeia um processo de oxidação do betume, intenso e rápido, porque o fornecimento energético é considerável, uma vez que ocorre um aquecimento a temperaturas elevadas e existe uma maior concentração do oxigénio (Whiteoak, 1991).

Uma possível forma de fazer esta avaliação é demonstrar as variações que ocorrem nas propriedades dos ligantes, nomeadamente ao nível do módulo complexo e ângulo de fase, durante o processo de fabrico (considerando para esta análise as temperaturas de referência a que se realizam os ensaios de fadiga e deformação permanente, respetivamente 20°C e 50°C). Assim, serão recuperados os ligantes das misturas produzidas para os ensaios de caracterização mecânica, que serão comparados com os mesmos ligantes, mas que não estiveram sujeitos ao envelhecimento que resulta da produção da mistura (mistura dos ligantes regeneradores com o betume recuperado do MF). A caracterização dos ligantes recuperados deve ser feita com recurso ao ensaio de penetração, ponto de amolecimento, resiliência e reologia.

### 3.2.5. Análise química dos ligantes

A análise química do envelhecimento pode ser realizada pela determinação de índices espectroscópicos, que serão tanto maiores quanto maior for o grau de envelhecimento do betume. Esta análise permite ainda verificar o efeito dos betumes regeneradores quando adicionados ao betume envelhecido, sendo possível avaliar se a sua introdução provoca uma redução ou aumento dos índices de envelhecimento. Desta forma é possível avaliar se os betumes regeneradores reduzem o envelhecimento do betume envelhecido, regenerando-o.

Assim, para os betumes procedeu-se a uma análise quantitativa dos principais grupos funcionais que contêm oxigénio. A avaliação quantitativa incidiu nos grupos funcionais com a ligação carbonilo (C=O) e sulfóxidos (S=O) detetados nos espectros dos betumes pelas bandas centradas, respetivamente, em torno de  $1700\text{ cm}^{-1}$  e  $1030\text{ cm}^{-1}$ . Esta avaliação é realizada considerando a área das bandas funcionais por meio do cálculo dos índices estruturais (Lamontagne *et al.*, 2001, Zhang *et al.*, 2011), de acordo com as Equações 1 e 2.

$$I_{C=O} = \frac{\text{Área da banda de carbonilo centrada nos } 1700\text{ cm}^{-1}}{\sum \text{Área da banda espectral entre } 2000\text{ cm}^{-1} \text{ e } 600\text{ cm}^{-1}} \quad (1)$$

$$I_{S=O} = \frac{\text{Área da banda de sulfóxido centrada nos } 1030\text{ cm}^{-1}}{\sum \text{Área da banda espectral entre } 2000\text{ cm}^{-1} \text{ e } 600\text{ cm}^{-1}} \quad (2)$$

Para o cálculo destes índices funcionais é necessária a determinação da altura ou da área das bandas seleccionadas e que estão assinaladas. Neste trabalho optou-se pela determinação das áreas, de modo a abranger o conjunto das vibrações do mesmo tipo. A área de cada banda corresponde à zona delimitada pela linha de base, definida para essa banda e pelos extremos de absorção da banda.

Na Figura 3.16 exemplifica-se o processo de determinação das áreas que permitem calcular os índices funcionais com a ligação carbonilo (C=O) e sulfóxidos (S=O).

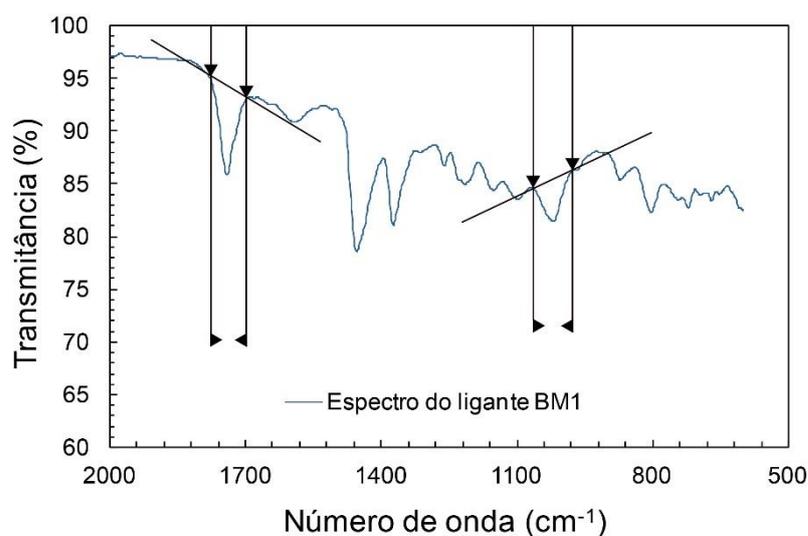


Figura 3.16 – Integração das bandas para determinação das áreas

Na Figura 3.17 (a) são apresentadas as áreas da banda espectral consideradas no cálculo dos índices de carbonilo ( $1700\text{ cm}^{-1}$ ) e sulfóxido ( $1030\text{ cm}^{-1}$ ). Na Figura 3.17 (b) apresenta a banda espectral da gama compreendida entre  $2000\text{ cm}^{-1}$  e  $600\text{ cm}^{-1}$ . As áreas foram calculadas com recurso a um software de tratamento gráfico.

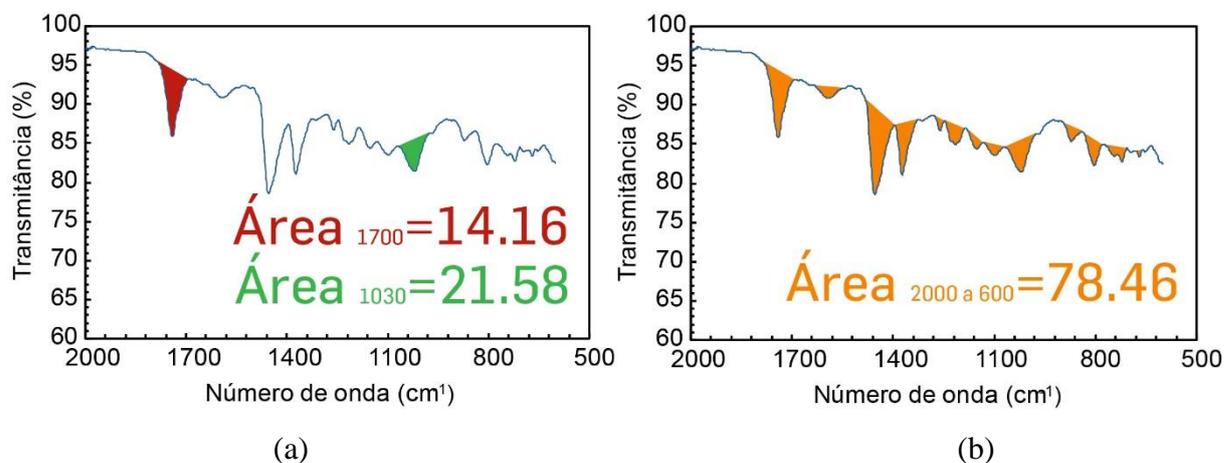


Figura 3.17 – Área das bandas (a) de carbonilo e sulfóxido (b) entre  $2000$  a  $600\text{ cm}^{-1}$ .

### 3.3. Métodos de produção

#### 3.3.1. Produção de betumes regeneradores e ligantes

O estudo de betumes pressupõe a mistura do betume envelhecido com diferentes betumes regeneradores, sendo que a seguir é demonstrado todo o processo que conduz à obtenção dos ligantes. Assim, por forma a facilitar a interpretação dos resultados, são atribuídas as seguintes nomenclaturas aos betumes:

- B0 - Betume envelhecido;
- B1 - Betume Styrelf 13/60;
- B2 - Betume Cepsa 160/220.

Os betumes regeneradores produzidos em laboratório resultam da mistura do betume base B2 com os polímeros EVA e SBS de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Constituição dos betumes regeneradores produzidos em laboratório

|                       |    | Betume Base |       | Polímeros |      |
|-----------------------|----|-------------|-------|-----------|------|
|                       |    | B0          | B2    | EVA       | SBS  |
| Betumes regeneradores | B3 | -           | 95,0% | 5,0%      | -    |
|                       | B4 | -           | 95,0% | -         | 5,0% |

O betume modificado comercial (B1) também é utilizado neste estudo como um possível regenerador. Já a aplicação do polímero *Regefalt* (REG) nas misturas, como foi demonstrado anteriormente, segue o processo de introdução a seco, pelo que o polímero REG deve ser introduzido diretamente no betume B0. Este processo dá origem ao betume B5, que possibilita estudar as alterações que este polímero introduz no betume envelhecido (B0).

Também foi produzido um outro betume que se considera importante para este estudo, denominado de betume B6, que resulta da mistura do betume B0 com apenas o betume B2. Isto permite avaliar as alterações no comportamento do conjunto destes betumes (B0+B2) que os polímeros introduzem.

Em seguida, a Tabela 3.2 apresenta a constituição dos ligantes finais das misturas recicladas, que resultam da mistura dos betumes regeneradores com o betume recuperado do MF (B0). Nesta fase, surge o termo *ligante*, uma vez que se trata de um material de maior complexidade, resultante da mistura do betume regenerador com o betume envelhecido.

Tabela 3.2 – Constituição dos ligantes finais em estudo

|         | Betume base |       | Betume regenerador |       |       | Polímero |
|---------|-------------|-------|--------------------|-------|-------|----------|
|         | B0          | B2    | B1                 | B3    | B4    | REG      |
| Ligante | BM1         | 50,0% | -                  | 50,0% | -     | -        |
|         | BM2         | 50,0% | -                  | -     | 50,0% | -        |
|         | BM3         | 50,0% | -                  | -     | -     | 50,0%    |
|         | BM4         | 50,0% | 46,0%              | -     | -     | -        |

Tal como explicado anteriormente, também foi produzido um ligante de referência (BR) que é constituído igualmente por 50% de betume recuperado do MF (B0), ao qual se adicionou um betume base da gama 70/100 (47%) e um rejuvenescedor comercial (B7), que de acordo com o estudo de Palha *et al.* (2014) deve representar 3,0% do peso total do ligante. Na Figura 3.18 são demonstradas as fases desenvolvidas ao nível do estudo de betumes.



Figura 3.18 – Esquema de produção dos betumes regeneradores e ligantes

### 3.3.2. Produção de misturas betuminosas

Após o processo de definição dos ligantes, procede-se a execução das misturas betuminosas em laboratório. Nesta fase atribui-se nomenclaturas para as misturas produzidas com os ligantes atrás indicados, fazendo-os corresponder da seguinte forma:

- Ligante BM1 – mistura M1 (betume modificado comercial);
- Ligante BM2 – mistura M2 (processo húmido com EVA);
- Ligante BM3 – mistura M3 (processo húmido com SBS);
- Ligante BM4 – mistura M4 (processo seco com *Regefalt*);
- Ligante BR – mistura MR (mistura de referência com rejuvenescedor).

Uma vez que a formulação em estudo prevê a introdução de 30% do MF fino a frio, isto obriga a um sobreaquecimento dos restantes materiais. Assim, o estudo de betumes tem um papel fundamental na definição das temperaturas dos diversos materiais, e em especial o estudo da viscosidade dos ligantes BM1, BM2, BM3 e BM4 na gama das temperaturas compreendidas entre 100°C e 180°C. A temperatura adequada para a mistura dos agregados com o betume modificado corresponde a uma viscosidade dinâmica de aproximadamente 3 Poise. Por outro lado, a compactação dum mistura betuminosa, após o seu espalhamento, deve apresentar viscosidades compreendidas entre 20 Poise e 200 Poise (Shell, 1991).

Assim, na Figura 3.19 apresenta-se a viscosidade e correspondente gama de temperaturas para as quais a mistura agregados-betume, feita com o ligante BM1, deve ser produzida e compactada. A mesma figura demonstra que a temperatura ideal para a mistura de agregados com o betume, no caso do ligante BM1, ronda os 177 °C, e a compactação deve ser realizada entre os 108 °C e os 138 °C.

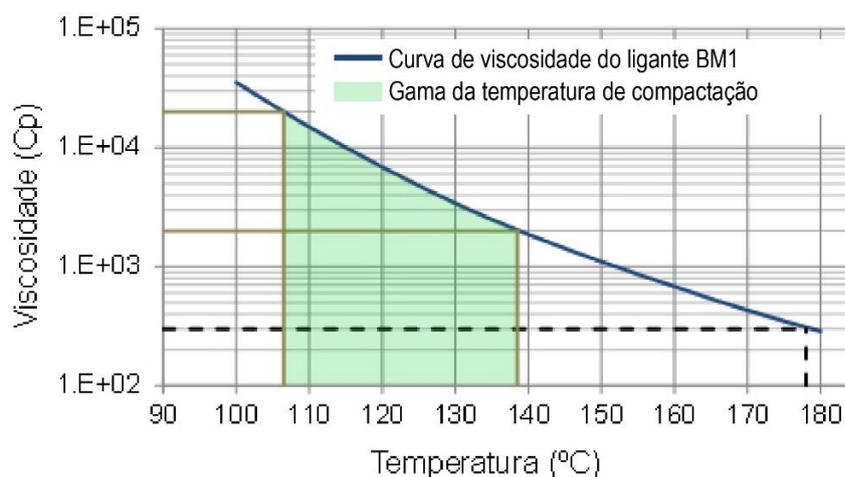


Figura 3.19 – Definição das temperaturas do ligante BM1

De seguida é necessário calcular a temperatura dos diferentes materiais, para que na fase de produção da mistura seja mantida a viscosidade adequada de forma a melhor envolver os agregados.

Na Tabela 3.3 é efetuada uma média ponderada da temperatura dos materiais (agregados e MF grosso) para produção das misturas. O material que condiciona a temperatura é o MF fino, uma vez que representa 30,0% do total da mistura e é introduzido à temperatura ambiente (que se considera 25°C). Assim, verifica-se que, os restantes materiais devem ser sobreaquecidos a temperaturas na ordem dos 240 °C para atingir uma temperatura de produção alvo de 176 °C.

Tabela 3.3 – Média ponderada das temperaturas dos materiais

| Agregado        | Percentagem (%) | Temperatura (°C) | Temperatura mistura (°C) |
|-----------------|-----------------|------------------|--------------------------|
| Brita 8/14      | 38,8            | 240              | 176                      |
| Brita 4/10      | 5,5             | 240              |                          |
| Pó 0/4          | 4,75            | 240              |                          |
| Filer comercial | 1,0             | 240              |                          |
| Fresado fino    | 30,0            | 25               |                          |
| Fresado Grosso  | 20,0            | 240              |                          |

Outro aspeto a ter em consideração nesta fase é a definição da temperatura a que se deve aquecer o betume regenerador. Assim, de acordo com a Figura 3.20, utilizou-se a curva da viscosidade do betume regenerador B1, e determinou-se a temperatura correspondente a uma viscosidade de 3 Poise. Verifica-se que este valor ronda os 177 °C (embora o aquecimento do betume regenerador tenha sido arredondado por excesso para 180 °C de modo a melhor garantir a produção das misturas com as características adequadas).

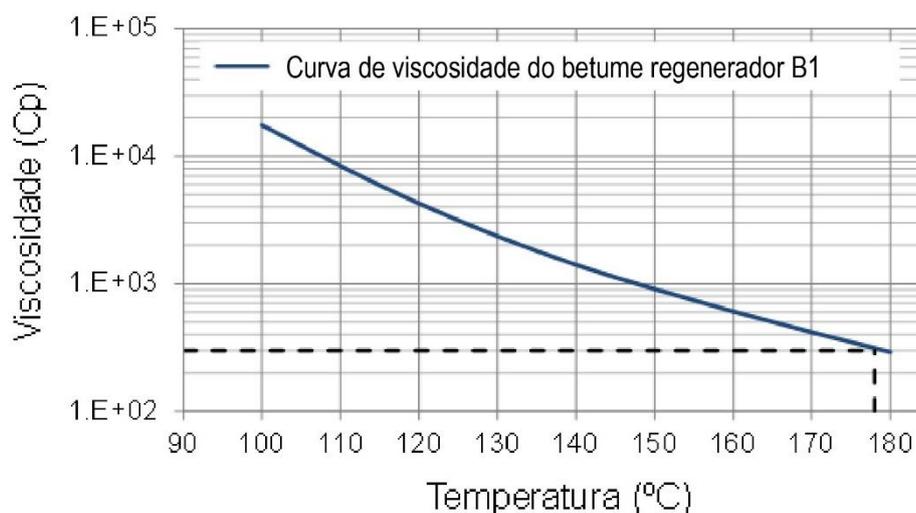


Figura 3.20 – Viscosidade do betume regenerador B1

Todos os betumes regeneradores em estudo seguem este processo de análise no que respeita às temperaturas de produção das misturas betuminosas.

O processo de produção das misturas betuminosas está representado no esquema da Figura 3.21. Inicialmente são introduzidos os agregados novos à temperatura de 240 °C (imagem A), e em seguida é introduzido o MF grosso à mesma temperatura como demonstra a imagem B do esquema. Os agregados novos e o MF grosso são misturados por um período de 1 minuto de

modo a garantir a homogeneidade da mistura, sendo que o resultado final pode ser verificado na imagem C. Após esta mistura, é introduzido o MF fino à temperatura ambiente (imagem D), que deve ser misturado por um período de 2 minutos de modo a homogeneizar toda a temperatura da mistura. Na imagem E pode-se verificar o resultado final da mistura entre o MF fino, MF grosso e os agregados novos e ainda introdução do betume regenerador. Na imagem F tem-se a finalização do processo e controlo da temperatura de produção da mistura (aproximadamente 180°C).

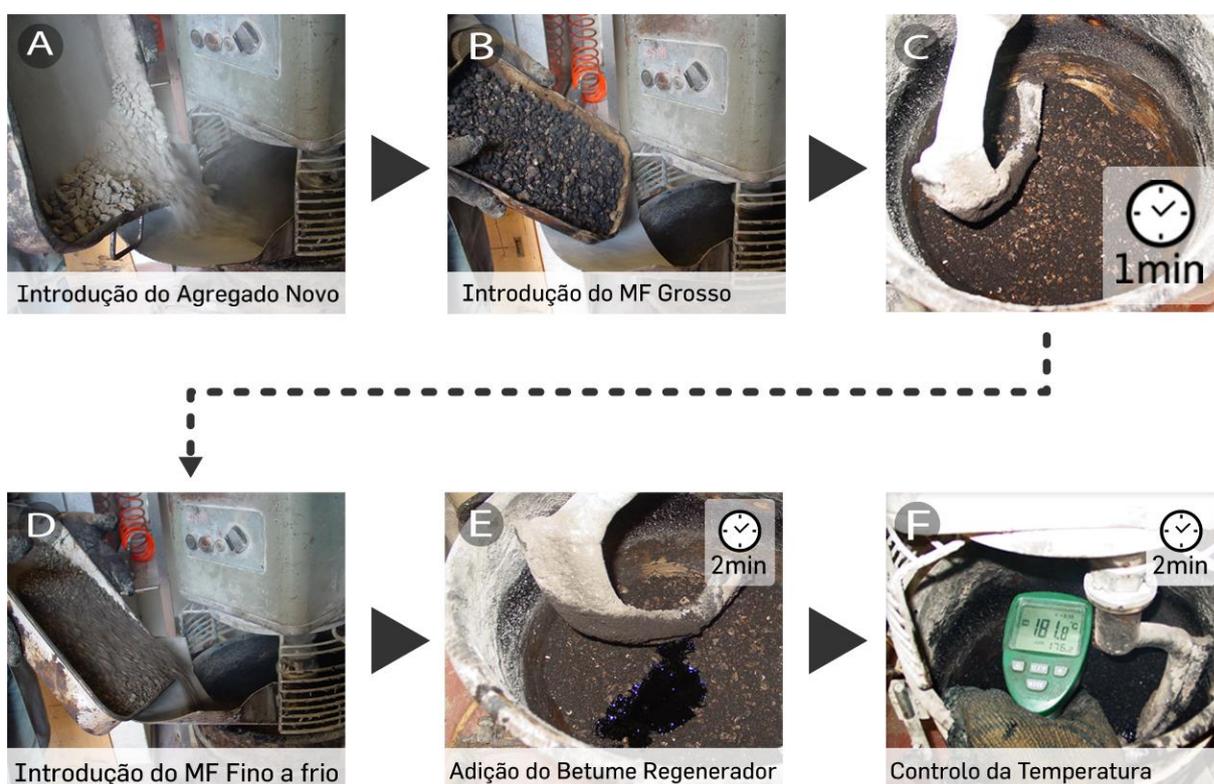


Figura 3.21 – Esquema de produção das misturas betuminosas

A seguir ao processo de produção, segue-se o espalhamento e compactação das misturas betuminosas, como demonstra a Figura 3.22. A imagem A demonstra o espalhamento da mistura no molde. Na imagem B, tendo em conta o intervalo definido pela curva de viscosidade para a compactação, confirma-se se essa gama de temperaturas foi atingida. Na imagem C procede-se à compactação da mistura betuminosa através de um cilindro, sendo que a baridade da mistura é controlada pela introdução duma massa definida de mistura betuminosa no volume do molde que tem dimensões conhecidas. Por fim, a imagem D demonstra as características superficiais após o arrefecimento da mistura.

Após os ensaios de caracterização mecânica das misturas, segue-se avaliação da resistência ao envelhecimento. Assim, é recuperado o ligante das misturas betuminosas, de forma a determinar as suas características. O processo de recuperação dos ligantes segue as mesmas fases anteriormente definidas. Aos ligantes recuperados das misturas betuminosas recicladas em estudo foi atribuída a seguinte nomenclatura:

- Ligante BM1 recuperado da mistura M1 – BM1R;
- Ligante BM3 recuperado da mistura M3 – BM3R;
- Ligante BM4 recuperado da mistura M4 – BM4R
- Ligante BR recuperado da mistura MR – BRR.



Figura 3.22 – Esquema dos processos de espalhamento e compactação

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Estudo de betumes

#### 4.1.1. Caracterização base dos betumes

Na Figura 4.1 apresentam-se os resultados da produção dos betumes regeneradores. Verifica-se que a adição de 5,0% de polímero EVA ao betume B2, com recurso ao dispersador de alto corte, permite baixar de forma considerável o valor de penetração. Já o valor da temperatura de amolecimento sofre um aumento. Esta modificação permite ainda que o betume regenerador B3 adquira uma nova propriedade, a resiliência. Em relação à modificação do betume B2 com 5,0% de SBS, este apresenta uma redução ainda maior da penetração e um aumento significativo da temperatura de amolecimento em relação ao betume base B2. No que se refere à comparação dos dois betumes regeneradores (B3 e B4), verifica-se que o polímero SBS tem melhores resultados, pois permite baixar mais a penetração, e aumentar mais a temperatura de amolecimento e a resiliência.

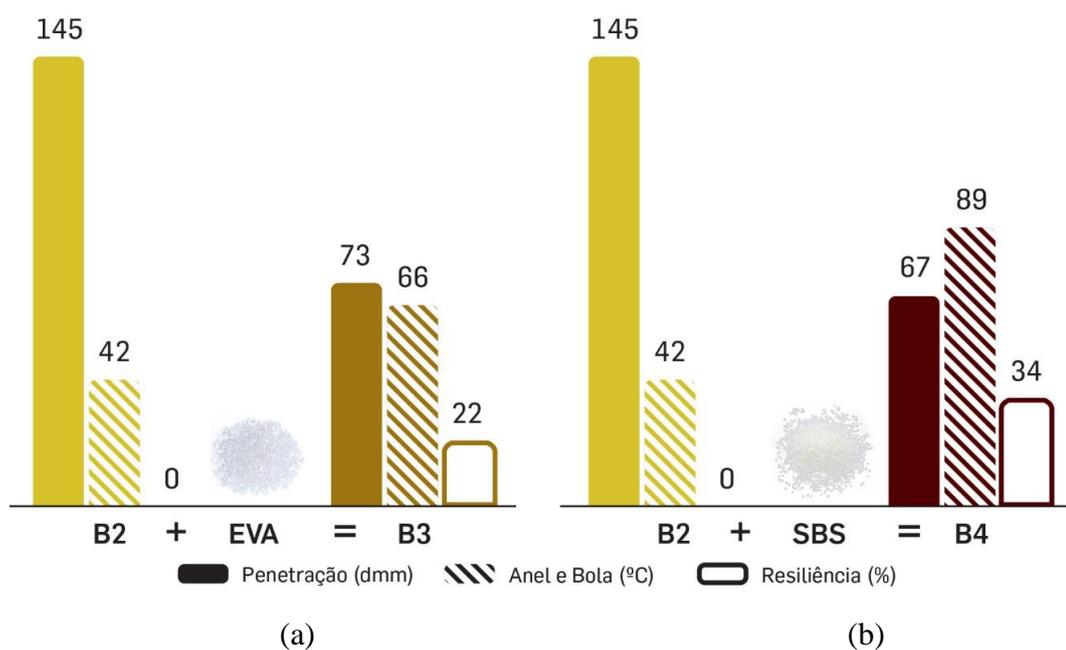


Figura 4.1 – Características dos betumes regeneradores (a) B3 e (b) B4

Na Figura 4.2 (a) e (b) apresentam-se as características do betume B0 e os resultados da mistura com os betumes regeneradores. Assim, os resultados demonstram que o betume B0 apresenta uma penetração muito baixa e uma temperatura de amolecimento elevada, o que indica que se trata de um betume com elevada rigidez e falta de flexibilidade devido ao seu estágio de oxidação. Como se esperava, este material não apresenta propriedades resilientes.

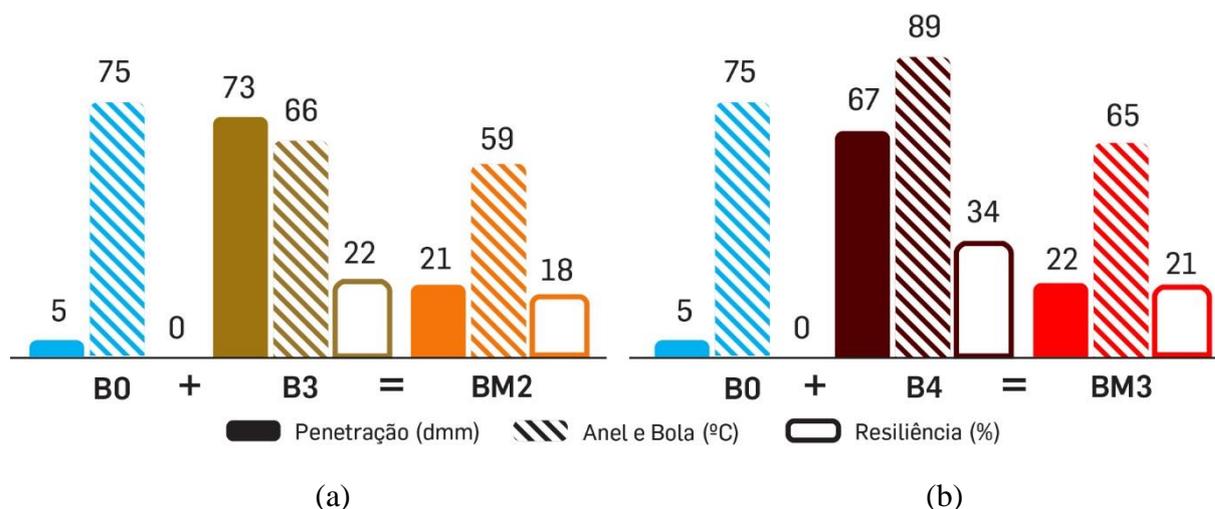


Figura 4.2 – Produção dos ligantes (a) BM2 e (b) BM3

A Figura 4.2 (a) mostra a produção do ligante BM2, que é a mistura do betume B0 com o betume regenerador B3. Ao nível da penetração, o valor do ligante BM2 apresenta valor intermédio dos dois betumes que lhe dão origem, apesar deste se aproximar da penetração do betume B0. Quanto à temperatura de amolecimento, este valor é menor do que os dos betumes B0 e B3 e não um valor intermédio, como seria espectável. De modo a justificar tal facto, é importante perceber o que acontece às características do betume que resulta da mistura do betume B0 com o betume B2 (Figura 4.3). Espera-se que esta análise ajude a entender de que forma o polímero interage com os betumes B0 (envelhecido) e B2 (160/220).

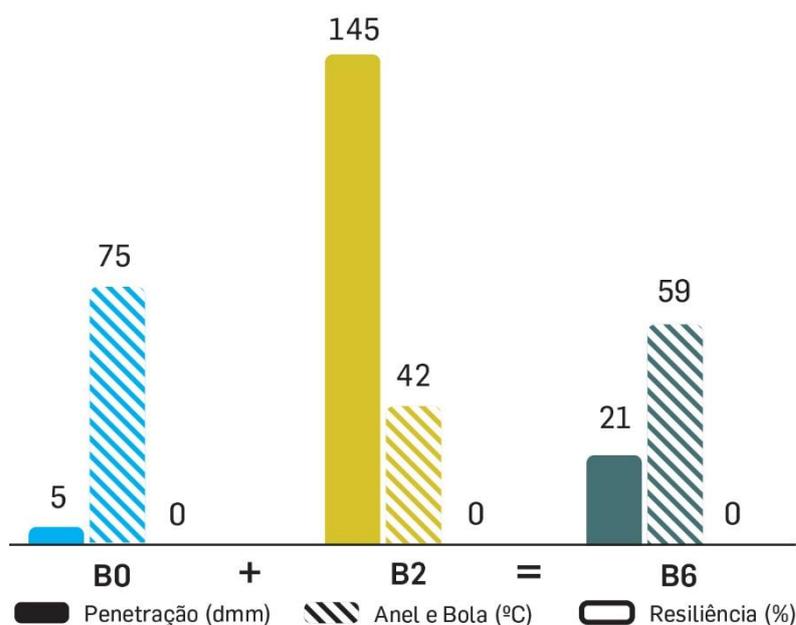


Figura 4.3 – Mistura do betume B0 com betume B2

Assim, através da Figura 4.3 verifica-se que temperatura de amolecimento é idêntica quando se compara o betume B6 e o ligante BM2, sendo que, ao analisar individualmente este parâmetro, pode indicar que a presença do polímero não se faz sentir no ligante BM2. Contudo, pode-se justificar este resultado pelo facto da mistura do betume B0 com o B3 resultar numa percentagem de polímero no ligante BM2 de apenas 2,5%. Desta forma, o betume B0 potencia a dispersão da rede polimérica do betume regenerador B3 (que tinha 5,0% de polímero). A resiliência do ligante BM2 sofre uma pequena redução quando comparada com o valor obtido no betume regenerador B3 devido à inexistência desta propriedade no betume B0.

Na Figura 4.2 (b) apresentam-se as características do ligante BM3, produzido em condições semelhantes ao ligante BM2, mas que resulta da junção do betume B0 com o B4. As propriedades avaliadas seguem a mesma evolução do ligante BM2. De referir, que o ligante BM3 apresenta maior capacidade resiliente e maior temperatura de amolecimento, sendo que a penetração é maior que no ligante BM2.

Na Figura 4.4 apresentam-se as características do ligante BM1, que resulta da mistura do betume regenerador B1 (comercial) com o betume B0. Em primeira análise verifica-se que o betume regenerador B1 apresenta características diferenciadoras dos betumes regeneradores B3 e B4, já que a temperatura de amolecimento do ligante BM1 resulta num valor intermédio, e permite aumentar a capacidade resiliente do ligante BM1 em relação ao betume B1 (nos ligantes BM2 e BM3 a adição do betume B0 fazia baixar esta propriedade). Já a penetração segue a mesma tendência e apresenta um valor intermédio entre os dois betumes utilizados na mistura, embora seja um valor mais próximo do betume B0.

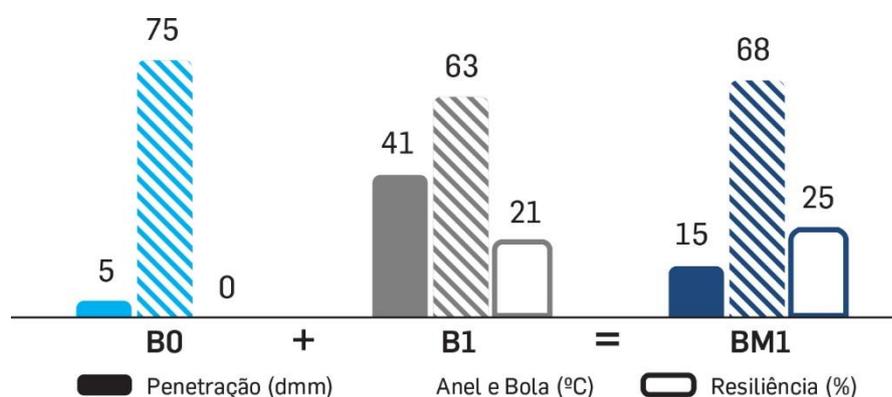


Figura 4.4 – Produção do ligante BM1

A Figura 4.5 representa um processo que pretende simular a adição de polímero pelo método seco, que serve de regenerador diretamente ao betume B0. As principais alterações são o

aumento da penetração e da temperatura de amolecimento e o grande aumento da capacidade resiliente do material, mesmo em comparação com a elevada rigidez do betume B0.

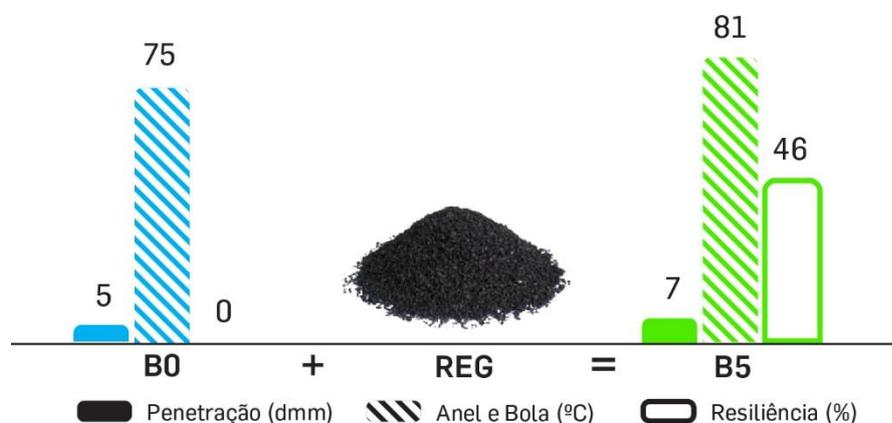


Figura 4.5 – Mistura do betume B0 com REG

Por fim, o ligante BM4 resulta da junção do betume B2 ao betume modificado pelo método seco B5. A Figura 4.6 demonstra que a adição do betume B2 permite aumentar a penetração, baixar a temperatura de amolecimento e reduzir a resiliência. Pode-se recorrer à Figura 4.3 para auxiliar na análise deste ligante quando comparado com o betume B6 (equivalente, mas sem polímero). Assim, as principais alterações introduzidas pelo polímero são a redução da penetração, e o aumento da temperatura de amolecimento e da resiliência.

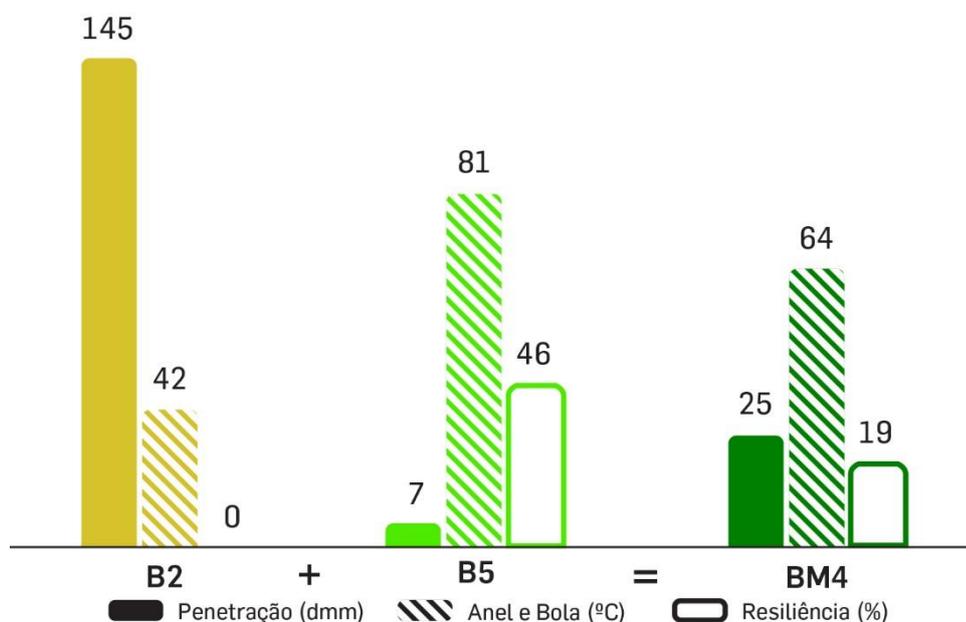


Figura 4.6 – Produção do ligante BM4

A Figura 4.7 permite comparar os vários ligantes em estudo com um ligante de referência BR (ligante com rejuvenescedor). Assim, verifica-se que todas as misturas têm uma temperatura de amolecimento maior que o betume BR, e a penetração dos ligantes apresentam valores próximos da mistura BR, com exceção do ligante BM1 que exibe um valor mais baixo. O betume de referência não apresenta qualquer capacidade resiliente (provida pelos polímeros).

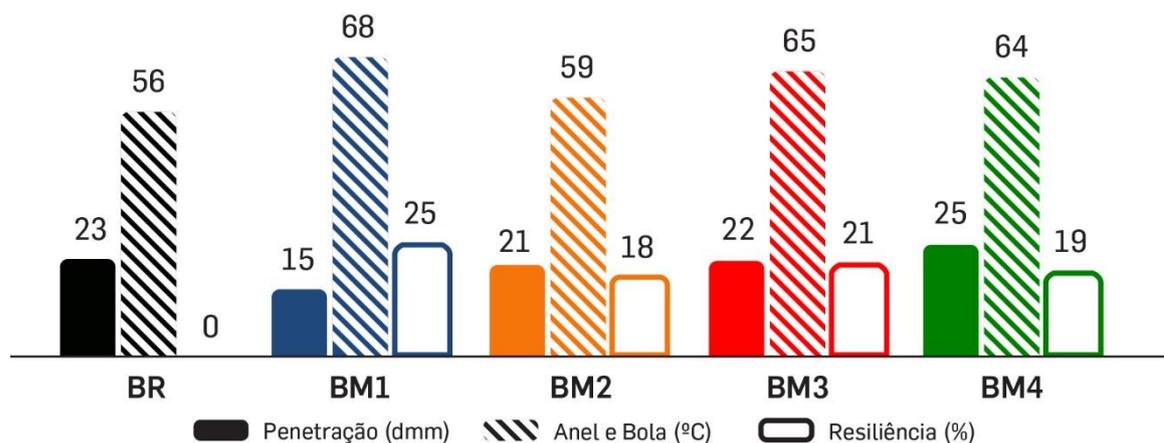


Figura 4.7 – Características base dos vários ligantes em estudo

#### 4.1.2. Caracterização reológica

A análise reológica procura avaliar para uma gama de temperaturas que ocorre entre os 19 °C e os 180 °C, propriedades como o módulo complexo ( $G^*$ ), o ângulo de fase ( $\delta$ ) e a viscosidade (CP). O DSR permite obter esses parâmetros para as temperaturas compreendidas entre os 19°C e os 90°C, e a partir dos 100°C apenas é medido o parâmetro da viscosidade, através do viscosímetro rotacional.

Como se sabe, o ligante é a componente que mais influência tem no desempenho da mistura betuminosa (Branco *et al.*, 2005). Desta forma, é importante definir critérios que permitam avaliar o desempenho dos diferentes ligantes produzidos. Assim, tendo em conta os principais fenómenos de degradação dos pavimentos rodoviários, poderá ser interessante procurar perceber de que forma se podem comportar as misturas. O fendilhamento por fadiga surge para temperaturas baixas em serviço, pelo que se adotou como referência os 20°C. Já o fenómeno de deformação permanente, normalmente ocorre para temperaturas elevadas, a partir de 50°C. Assim, deve-se ter em consideração estas temperaturas na análise reológica dos betumes e ligantes.

A viscosidade medida entre os 100°C e 180°C permite definir as temperaturas de mistura e compactação, tendo em consideração o tipo de ligante.

A Figura 4.8 mostra o resultado da mistura do betume regenerador, que conduz à produção do ligante BM1. Verifica-se em todos os betumes avaliados, uma diminuição do módulo complexo ( $G^*$ ) com o aumento da temperatura. A análise ao módulo complexo ( $G^*$ ) demonstra que o betume B0 apresenta maior rigidez ao longo de toda a gama das temperaturas estudadas, enquanto o betume B1 apresenta uma menor rigidez.

Como resultado da mistura dos dois betumes, verifica-se uma diminuição considerável da rigidez, na temperatura que ronda os 20°C, que poderá indicar maior capacidade das misturas com este ligante para resistir à fadiga. No que diz respeito às temperaturas a partir dos 50°C verifica-se que o módulo é menor que o betume B0, o que nas misturas betuminosas pode conduzir a um aumento da profundidade da rodeira por deformação permanente. Porém, estes valores tendem a aproximar-se para temperaturas a partir dos 70°C.

A Figura 4.8 (b) apresenta os valores do ângulo de fase do ligante BM1. Para a temperatura de referência de 20°C, o betume B0 apresenta o valor mais baixo, que demonstra que este betume apresenta a esta temperatura uma forte componente elástica, não sendo de todo benéfica para um bom desempenho das misturas à fadiga. Já o betume B1, a esta temperatura, apresenta o maior valor de ângulo de fase, que indica uma maior componente viscosa do betume e por isso muito mais capaz de resistir a este tipo de degradações. A junção dos betumes (BM1) permite aumentar o ângulo de fase para um valor intermédio entre o betume B0 e o betume regenerador B1, promovendo a flexibilidade da mistura. No campo de ação das elevadas temperaturas (a partir dos 50°C) os betumes B0 e B1 tendem a aproximar-se e invertem mesmo o comportamento para temperaturas acima dos 50°C. O ligante BM1 apresenta mesmo uma maior componente elástica relativamente ao betume B0 nas temperaturas elevadas.

Duma forma geral, o ligante BM1 apresenta um ângulo de fase médio entre os dois betumes. Numa primeira fase, de temperaturas baixas, o ligante BM1 exibe a mesma tendência do betume B1, registando um aumento progressivo do valor com o aumento da temperatura. Por isso, a mistura BM1 apresenta um comportamento mais elástico que o betume B1 e mais viscoso que o betume B0. Por outro lado, nas temperaturas elevadas exibe um comportamento mais viscoso que o betume B1, mas no entanto mais elástico que o betume B0.

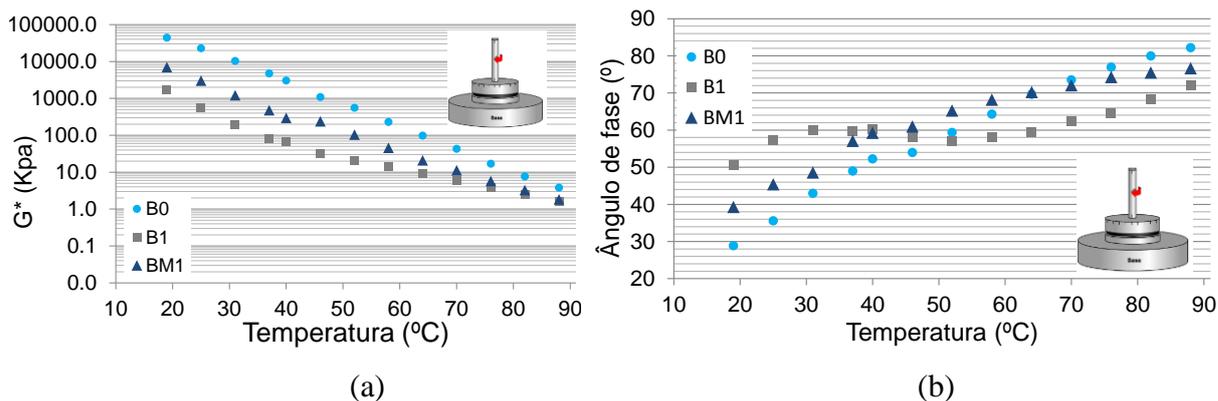


Figura 4.8 – Reologia do ligante BM1: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

A viscosidade determinada pelo DSR (Figura 4.9 (a)) apresenta um comportamento idêntico ao módulo complexo analisado anteriormente e permite fazer uma avaliação indireta da rigidez do betume na mesma gama de temperaturas.

A Figura 4.9 (b) apresenta a viscosidade do ligante BM1 determinada através do viscosímetro rotacional. Verifica-se que o betume B0 apresenta maiores valores de viscosidade com o aumento da temperatura, devendo-se ao elevado grau de envelhecimento. Já o betume regenerador B1 apresenta uma menor viscosidade como seria de esperar. A mistura dos betumes B0 e B1 permite baixar a viscosidade do ligante BM1, e mais uma vez exhibe um comportamento intermédio ao longo da gama de temperaturas de ensaio (100°C a 180°C).

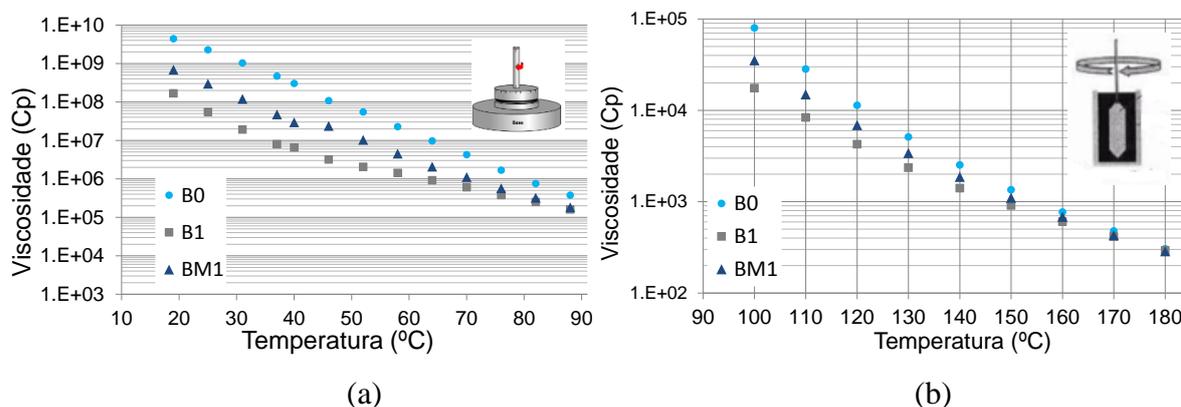


Figura 4.9 – Viscosidade do ligante BM1 no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

Na Figura 4.10 (a) está representado o módulo complexo da mistura de betumes que resulta no ligante BM2. Desta forma, verifica-se que a modificação do betume B2 com polímero EVA aumenta ligeiramente o valor do módulo complexo. Esta diferença acentua-se a partir dos 50°C, o que indica uma menor suscetibilidade térmica deste betume regenerador B3. A mistura do betume B0 com o betume B3 segue o mesmo comportamento definido na análise do ligante

BM1 para as temperaturas baixas e elevadas. Outras conclusões poderão ser retiradas, quando se comparar todos os ligantes.

Quanto ao ângulo de fase, na Figura 4.10 (b) verifica-se que à temperatura de 20°C o betume B0 é o que apresenta novamente menor valor. Curiosamente, apesar de ser do betume B2 ser muito mole, apresenta um ângulo de fase reduzido a esta temperatura. Já o betume B3 demonstra que a modificação fez elevar este valor para valores mais altos. Por sua vez, o ligante BM2 apresenta um comportamento mais viscoso que o betume B0 mas mais elástico que o betume B3. Nas elevadas temperaturas verifica-se, como de resto seria de esperar, um ângulo de fase mais baixo para o betume B0. O betume B2, devido à sua baixa rigidez, e na gama das temperaturas elevadas, atinge valores altos de ângulo de fase, que demonstram a sua elevada componente viscosa. Este comportamento indicia graves problemas de deformação permanente que são compensados com a modificação do polímero no betume B3. Já o ligante BM2 oferece uma resposta equilibrada entre as componentes viscosas e elástica, e previsivelmente este pode obter um bom comportamento à deformação permanente.

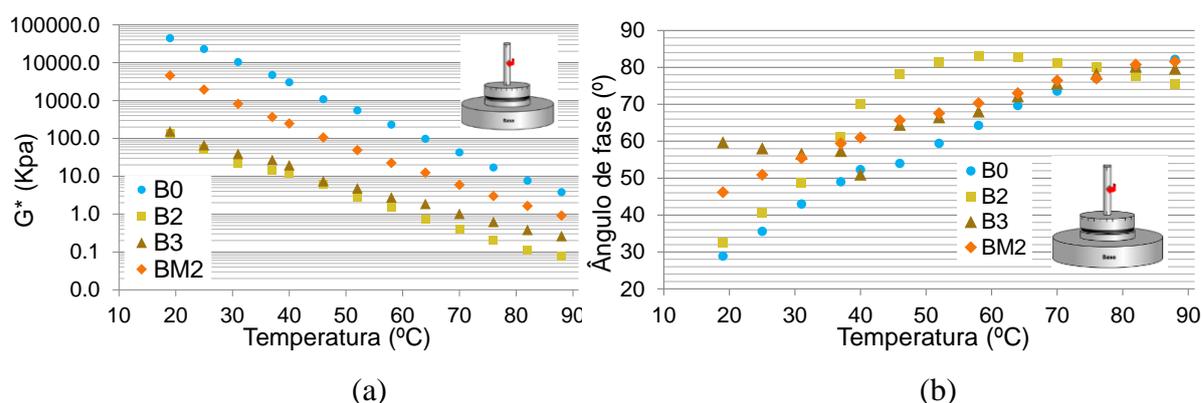


Figura 4.10 – Reologia do ligante BM2: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

Nas Figura 4.11 (a) e Figura 4.11 (b) verifica-se o comportamento já avaliado anteriormente no que diz respeito ao à viscosidade.

No que diz respeito ao ligante BM3, o módulo complexo dos betumes constituintes é apresentado na Figura 4.12 (a), e verifica-se o mesmo comportamento descrito anteriormente. No entanto, deve-se referir que o polímero utilizado na modificação do betume B2 permite aumentar ainda mais o módulo complexo do betume regenerador B4. A Figura 4.12 (b) apresenta o ângulo de fase desta mistura de betumes do ligante BM3. Curiosamente verifica-se que para temperaturas a partir dos 50°C o betume B4 tende a baixar o valor de ângulo de fase, demonstrando um comportamento mais elástico deste betume.

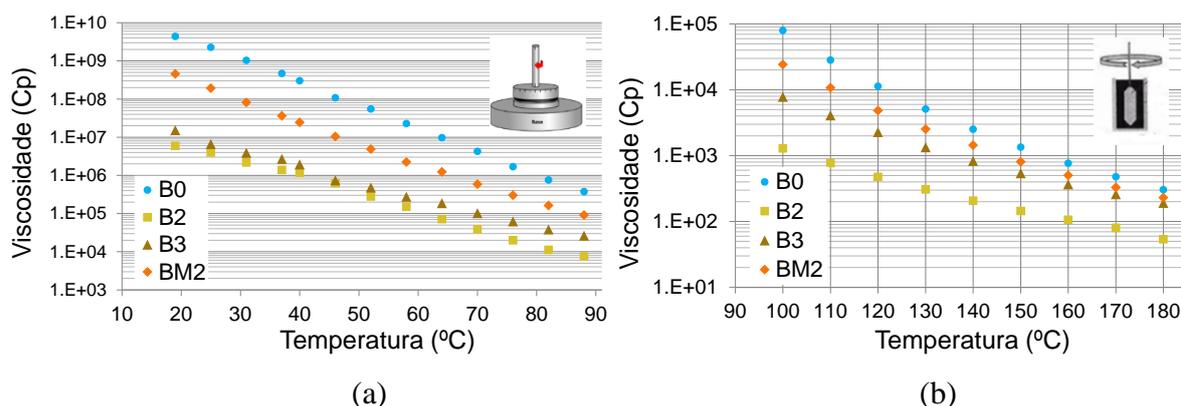


Figura 4.11 – Viscosidade do ligante BM2 no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

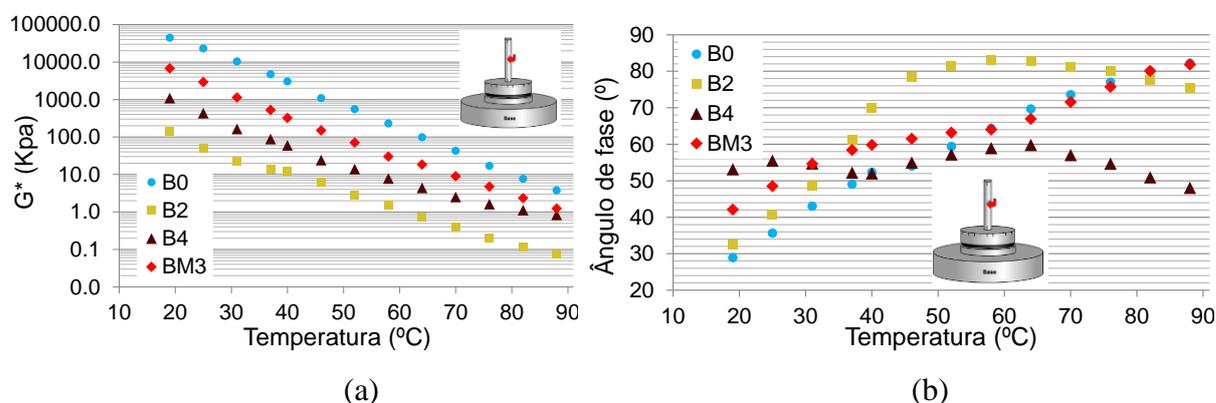


Figura 4.12 – Reologia do ligante BM3: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

Análise da viscosidade apresentada na Figura 4.13 (a) mostra um comportamento da viscosidade idêntico ao módulo complexo, dado que o seu desempenho é proporcional a este.

Contudo, a Figura 4.13 (b) demonstra que para uma temperatura de 100°C o valor da viscosidade do betume B4 é maior que no ligante BM2. Isto pode dever-se ao facto de a 100 °C a rede polimérica apresentar menor influência e estar mais dispersa no ligante BM2 do que no betume B4. Verifica-se que com o aumento da temperatura a viscosidade do betume B4 tende a baixar ligeiramente, mas a partir dos 160°C é idêntica aos betumes BM2 e B0.

Os processos anteriores de produção dos ligantes BM2 e BM3, com exceção do ligante BM1 (betume comercial), seguem o processo húmido de modificação. De seguida é apresentada a reologia do ligante BM4, que recorreu ao processo seco de modificação.

Portanto, na Figura 4.14 verifica-se que a adição do polímero ao betume B0, de onde resulta o betume B5, diminui ligeiramente o módulo complexo às temperaturas baixas (20°C) e aumenta este valor para as temperaturas elevadas (90°C). Já adição do betume B2 permite baixar o módulo complexo em toda a gama de temperaturas.

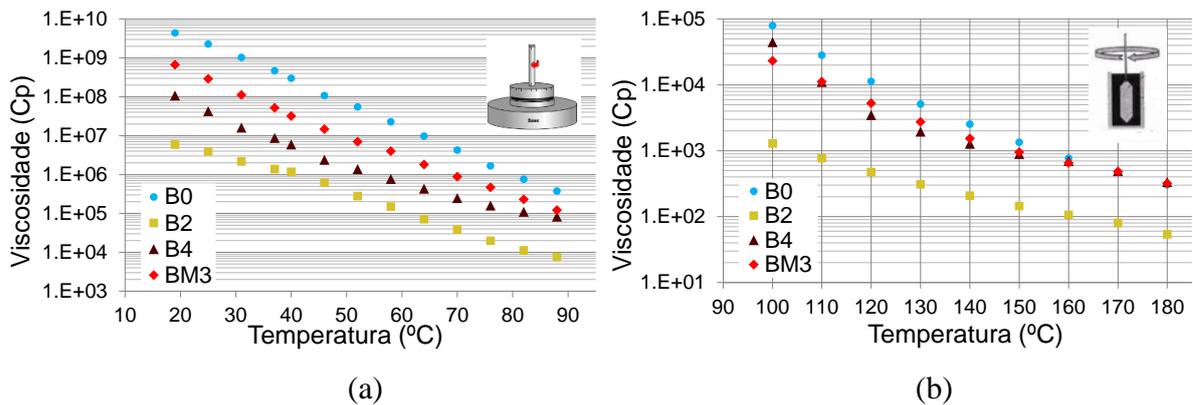


Figura 4.13 – Viscosidade do ligante BM3 no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

Na Figura 4.14 (b) o ângulo de fase permite perceber que nas baixas temperaturas a adição do polímero não tem influência no comportamento do betume B0, pelo que só a partir das temperaturas elevadas (50°C) é que o valor do ângulo de fase é mais baixo (indicando que o betume B5 apresenta um melhor resultado às deformações permanentes). Por sua vez, a adição do betume B2 permite aumentar o valor do ângulo de fase, garantindo ao ligante BM4 um comportamento mais viscoso, logo mais sensível à ocorrência de deformações permanentes e mais capaz de resistir ao fendilhamento por fadiga.

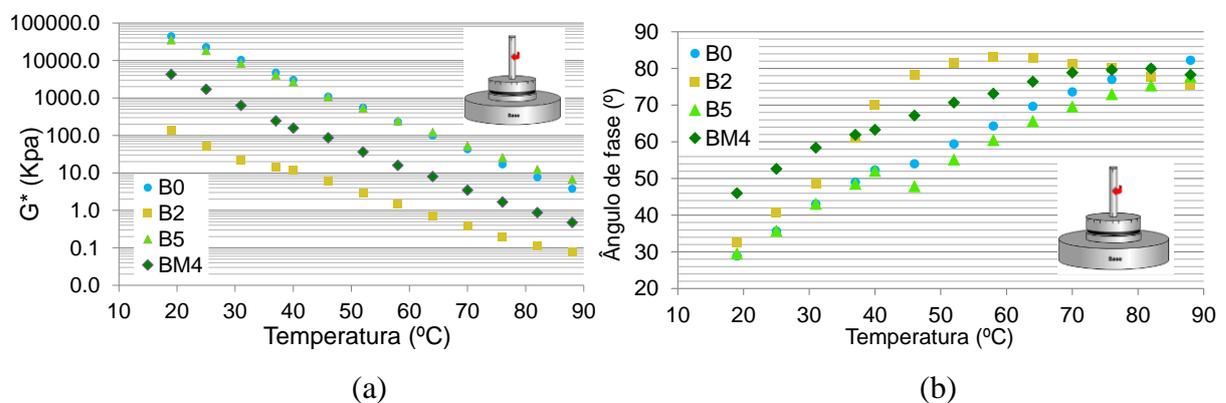


Figura 4.14 – Reologia do ligante BM4: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

As Figura 4.15 (a) e Figura 4.15 (b) demonstram o comportamento que se seria expectável com a mistura do polímero regenerador ao betume B0, e posterior adição do ligante B2. Verifica-se que para uma gama alargada de temperaturas o polímero aumenta a viscosidade do betume B0, que se reduz bastante pela junção ao betume B2.

Realizou-se uma análise a todos os processos que levou à obtenção dos ligantes. No entanto, seria interessante comparar os parâmetros dos vários betumes regeneradores, de modo a perceber qual a influência dos diferentes polímeros na rigidez, ângulo de fase e viscosidade.

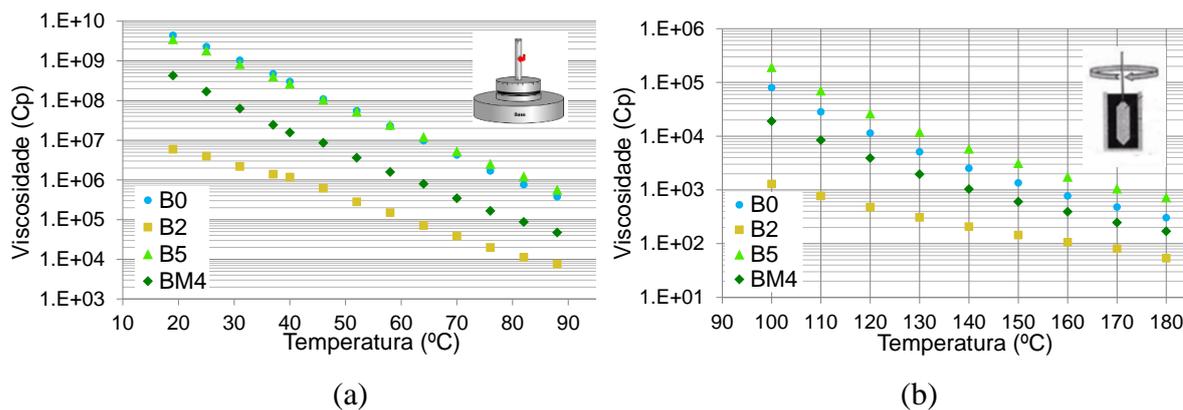


Figura 4.15 – Viscosidade do ligante BM4 no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

Assim, segundo a Figura 4.16 (a) e Figura 4.16 (b) verifica-se que o betume regenerador B3 apresenta à temperatura de 20°C o menor módulo complexo e maior ângulo de fase, o que pode indicar que de todos betumes regeneradores, é aquele que poderá apresentar menor rigidez e maior componente viscosa (parâmetros essenciais para um bom desempenho à fadiga). Para temperaturas elevadas (a partir dos 50°C) verifica-se que o betume regenerador B4 é o que demonstra ter maior capacidade de resistência às deformações permanentes, dado que apresenta o maior módulo e também o menor ângulo de fase.

Quanto à viscosidade, nas Figura 4.17 (a) e Figura 4.17 (b) fica demonstrado que o betume B3 é o que apresenta menor viscosidade na gama de temperaturas entre os 19°C e os 180°C. Já o betume B1 e B4 apresentam uma viscosidade maior e equivalente até aos 50°C. A partir desta temperatura o betume B1 tende a aumentar a sua viscosidade em relação ao betume B4. Para a viscosidade medida no viscosímetro rotacional demonstra-se que os betumes B1 e B4 tendem a aproximar os valores de viscosidade para temperaturas acima dos 150°C.

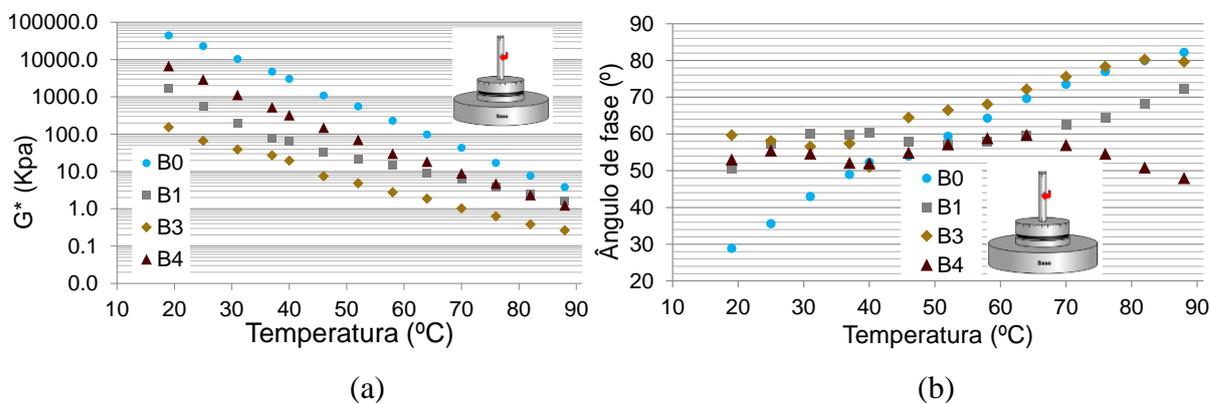


Figura 4.16 – Reologia dos ligantes regeneradores: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

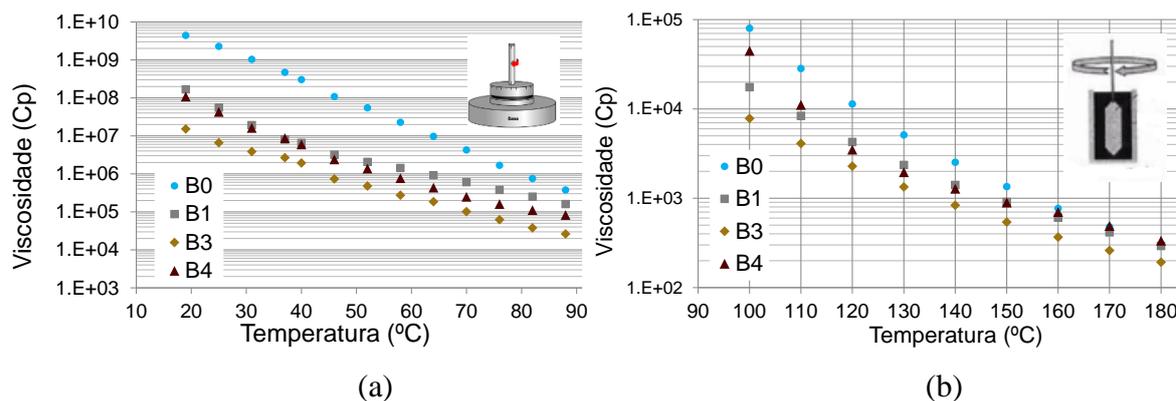


Figura 4.17 – Viscosidade dos ligantes regeneradores no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

Em última análise, deve-se comparar o desempenho dos ligantes relativamente ao ligante de referência BR, já depois de misturados ao betume recuperado do MF.

Desta forma, nas Figura 4.18 (a) e Figura 4.18 (b) é exibido o comportamento dos diferentes ligantes. Para a temperatura de 20°C pode-se observar que o módulo de todos os ligantes apresenta um valor próximo. No que diz respeito ao ângulo de fase verifica que o ligante BM1 apresenta o valor mais baixo, seguido do ligante BM3, e os ligantes BM2 e BM4 apresentam um resultado mais elevado e idêntico. Por sua vez, o ligante BR apresenta o maior valor de ângulo de fase. No entanto, verifica-se os ligantes se encontram num intervalo compreendido entre o 40° e 56°, valores que conferem uma componente viscosa significativa quando comparada com o betume envelhecido B0 que apresenta uma maior componente elástica, com valor de ângulo de fase abaixo de 30°.

Nas temperaturas elevadas destaca-se ligante BM1 que demonstra um aumento significativo da rigidez a partir dos 50°C, ao mesmo tempo que apresenta o valor de ângulo de fase mais baixo (resultados essenciais para um bom desempenho da mistura à deformação permanente).

Por sua vez, o ligante BR apresenta os valores mais baixos do módulo complexo ao longo de toda a gama de temperaturas e o valor mais alto do ângulo de fase, tendo já sido descritos os problemas que poderão decorrer dessa situação.

A viscosidade é exibida na Figura 4.19 (a) e Figura 4.19 (b), onde se verifica um comportamento idêntico ao módulo complexo para temperaturas entre os 19°C e os 90°C. Para as temperaturas acima dos 100°C, e por comparação com o ligante BR, efetivamente percebe-se que os polímeros conferem maior viscosidade ao ligante.

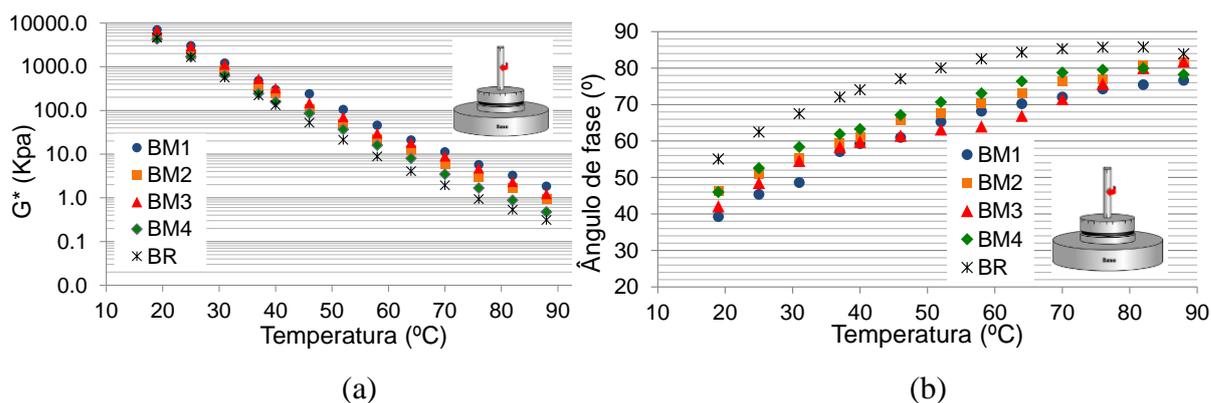


Figura 4.18 – Reologia dos vários ligantes: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

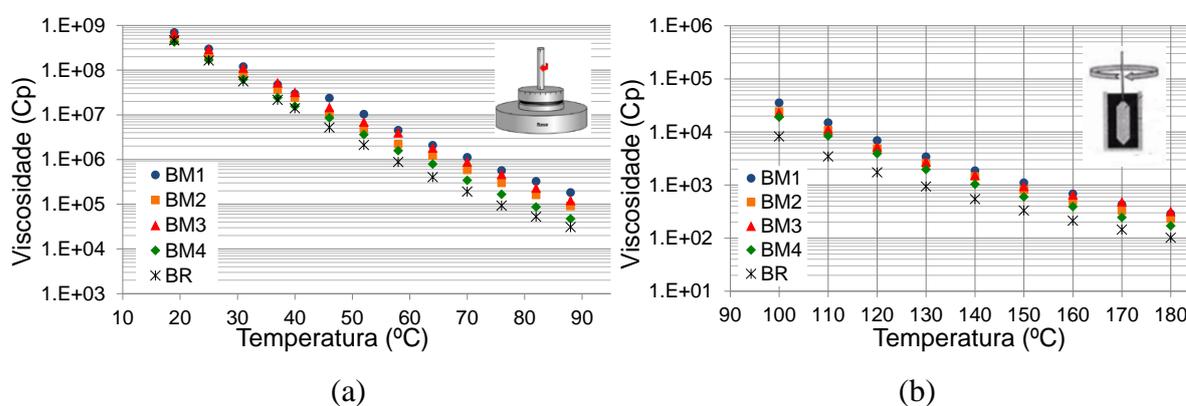


Figura 4.19 – Viscosidades dos vários ligantes no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

### 4.1.3. Análise ao estudo dos betumes

Além de compreender o comportamento que resulta da modificação dos betumes base com polímeros, e dos ligantes obtidos com a junção dos betumes regeneradores com o betume B0, esta análise tem ainda por objetivo escolher apenas um dos betumes que seguem a modificação pelo método húmido em laboratório. Isto porque a investigação que se pretende seguir exige uma grande quantidade de materiais e trabalho, que se torna incompatível com o prazo de execução do estudo para todos os ligantes.

Deste modo, devido aos resultados obtidos essencialmente na análise reológica de previsão do comportamento à fadiga e deformação permanente, os betumes regeneradores B3 e B4 poderão, em diferentes situações, ser ótimas soluções. Segundo à análise reológica o betume B3 poderá apresentar um melhor comportamento à fadiga e o betume B4 pode obter um melhor resultado à deformação permanente, pelo que esse estudo se torna inconclusivo. Desta forma, decidiu-se avançar com um ensaio complementar de sensibilidade à água ainda com todos os ligantes. Este

ensaio tem a vantagem de necessitar de pouca mistura betuminosa na execução dos provetes quando comparado com a produção de lajes para fadiga ou deformação permanente, para além de permitir validar o desempenho das misturas com estes ligantes.

## 4.2. Caracterização Mecânica das Misturas Betuminosas

### 4.2.1. Sensibilidade à água

No que respeita à avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas, e de acordo com o procedimento mencionado anteriormente, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados nas Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura M1

| Ensaio           | Força máxima (kN) | ITS (kPa) | Deformação (mm) | Volume vazios (%) | ITSR (%) |
|------------------|-------------------|-----------|-----------------|-------------------|----------|
| IST <sub>d</sub> | 28,5              | 2804      | 2,2             | 3,2               | 91       |
| IST <sub>w</sub> | 26,0              | 2556      | 2,3             |                   |          |

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura M2

| Ensaio           | Força máxima (kN) | ITS (kPa) | Deformação (mm) | Volume vazios (%) | ITSR (%) |
|------------------|-------------------|-----------|-----------------|-------------------|----------|
| IST <sub>d</sub> | 24                | 2364      | 2,0             | 4,0               | 83       |
| IST <sub>w</sub> | 20                | 1966      | 2,3             |                   |          |

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura M3

| Ensaio           | Força máxima (kN) | ITS (kPa) | Deformação (mm) | Volume vazios (%) | ITSR (%) |
|------------------|-------------------|-----------|-----------------|-------------------|----------|
| IST <sub>d</sub> | 22,4              | 2203      | 2,3             | 4,1               | 93       |
| IST <sub>w</sub> | 20,6              | 2046      | 2,1             |                   |          |

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura M4

| Ensaio           | Força máxima (kN) | ITS (kPa) | Deformação (mm) | Volume vazios (%) | ITSR (%) |
|------------------|-------------------|-----------|-----------------|-------------------|----------|
| IST <sub>d</sub> | 24,4              | 2409      | 2,1             | 3,2               | 86       |
| IST <sub>w</sub> | 21,0              | 2409      | 2,1             |                   |          |

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água da mistura MR

| Ensaio           | Força máxima (kN) | ITS (kPa) | Deformação (mm) | Volume vazios (%) | ITSR (%) |
|------------------|-------------------|-----------|-----------------|-------------------|----------|
| IST <sub>d</sub> | 24,4              | 2401      | 2,1             | 5,0               | 90       |
| IST <sub>w</sub> | 22,9              | 2158      | 2,1             |                   |          |

Os dados das tabelas mencionadas anteriormente permite construir gráficos que possibilitam uma melhor compreensão do comportamento das diferentes misturas estudadas.

O gráfico da Figura 4.20 relaciona o valor da resistência à tração indireta (ITS) com a deformação de cada mistura. Duma forma geral verifica-se que todos os valores de ITS são elevados, e a deformação reduzida (devido ao efeito do material fresado). Quando comparadas com a mistura MR, verifica-se que a mistura M2 e M4 apresentam um valor de IST e deformação semelhante. Por sua vez a mistura M1 exibe o maior valor de ITS e deformação ligeiramente superior. Já a mistura M3 é a que apresenta o valor mais baixo de IST, e a maior deformação neste ensaio, quando comparada com todas as outras misturas. Este facto confirma em parte os resultados anteriores, pois é previsível a obtenção dum menor módulo para a mistura M3, e duma maior resistência à fadiga.

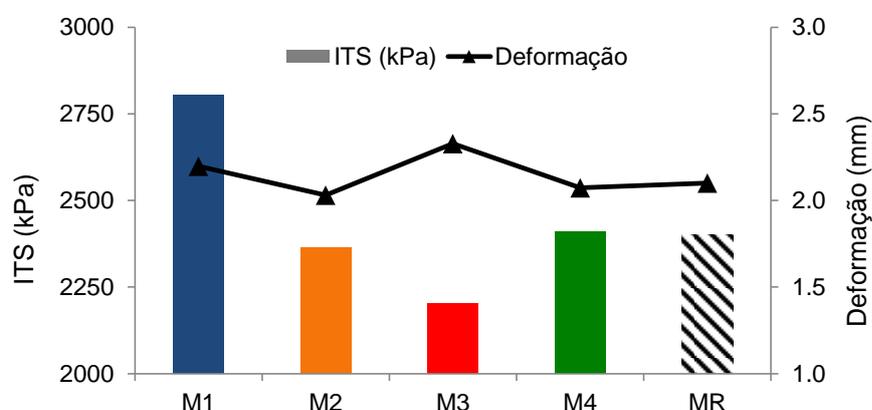


Figura 4.20 – Valores de ITS e deformação dos provetes secos das misturas

Já o gráfico da Figura 4.21 permite relacionar o ITSR (rácio da resistência à tração indireta dos provetes condicionados e não condicionados) com o volume de vazios. Habitualmente quanto maior o volume de vazios, mais sensível é a mistura à ação da água, dado que maiores volumes de vazios facilitam a penetração de água no interior da mistura.

A primeira conclusão retirada é que todas as misturas apresentam baixa sensibilidade à água, com valores de ITSR acima de 70%. No entanto, a mistura M4 e M2 revelam ter pior

desempenho que a mistura MR, sendo que as misturas M1 e M3 destacam-se por terem uma menor sensibilidade à ação água.

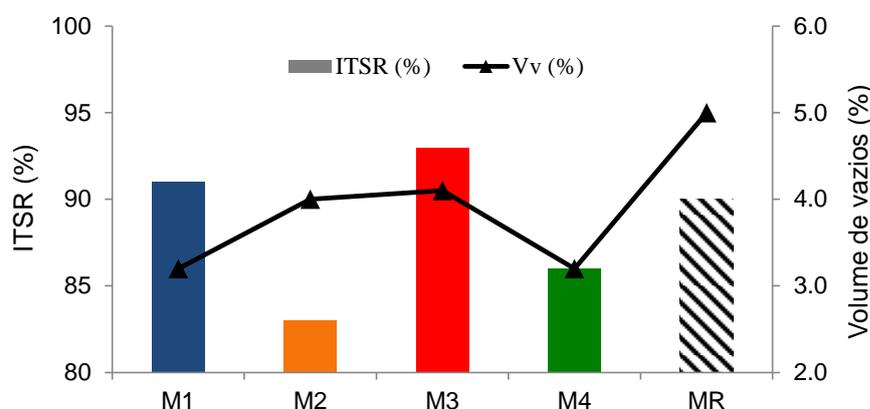


Figura 4.21 – Valores de ITSR e volume de vazios das misturas

A mistura M3 apresenta o melhor desempenho, embora tenha um dos maiores volumes de vazios. Este facto pode dever-se a um melhor revestimento dos agregados, tendo em conta a modificação do betume que permite diminuir a perda de resistência provocada pela água na ligação betume-agregado.

A mistura M1 apresenta o maior valor do ITS quando comparado com qualquer mistura em estudo. Tendo em conta a Figura 4.21 verifica-se que o valor do ITSR é semelhante ao da mistura de referência (MR), sendo que o volume de vazios é menor.

Já a mistura M2 demonstra ser a mistura mais sensível à ação da água, mesmo apresentando um volume de vazios mais baixo que a mistura MR. O tipo de polímero utilizado nesta mistura pode condicionar o valor deste parâmetro.

Por sua vez a mistura M4, quando comparada com a mistura MR, também apresenta menor sensibilidade à água, mesmo com um menor volume de vazios. Este facto pode ser explicado tendo em atenção o tipo de modificação do betume, dado que este segue o método a seco. No entanto, torna-se interessante perceber de que forma este polímero pode ou não condicionar o desempenho da mistura noutros ensaios.

Na Figura 4.22 apresentam-se os provetes após os ensaios de sensibilidade à água. Assim, verifica-se que a elevada resistência das misturas conduz a uma rotura generalizada pelos agregados, sendo que nos provetes expostos à ação da água (com a letra W) a perda de adesividade entre o agregado e o ligante é mais evidente.

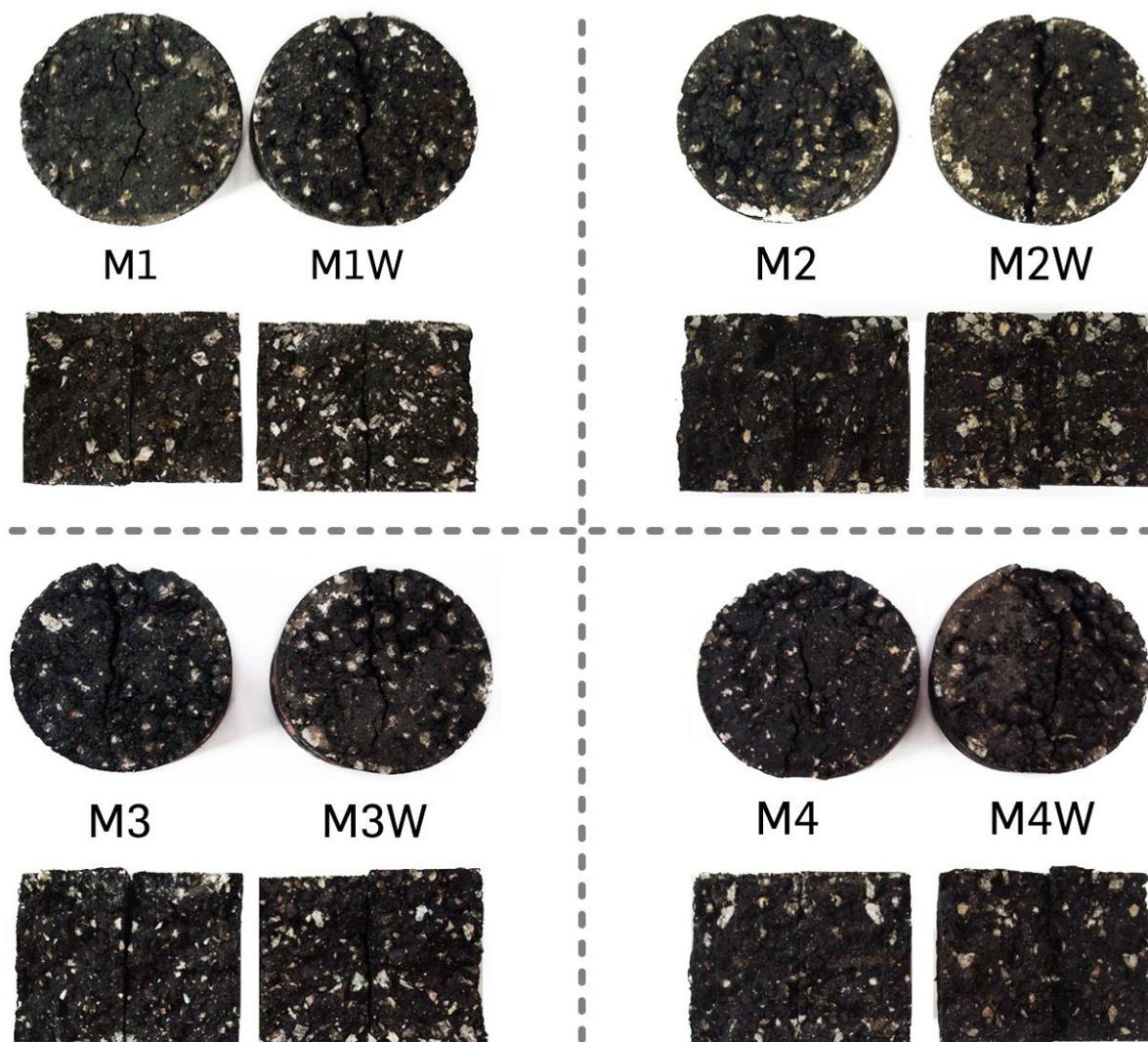


Figura 4.22 – Rotura dos provetes de sensibilidade à água

Para além da indicação sobre o quanto uma mistura é sensível à água, este é um estudo complementar que serve para selecionar uma das misturas que seguem a modificação em laboratório pelo método húmido para posterior caracterização.

A mistura M3 demonstra ir melhor ao encontro das perspetivas do estudo, dado que obteve o maior valor de ITSR. Apesar de ter menor resistência à tração indireta (ITS) e maior deformação quando comparada com a mistura M2, o que em princípio origina um menor módulo de rigidez da mistura, isso também pode implicar uma maior resistência à fadiga. O excelente resultado ao nível de ITSR torna-se assim determinante na escolha da mistura M3 (com SBS). No entanto, percebe-se que a mistura M2 (com EVA) demonstra sinais que o seu estudo adicional também poderá revelar-se interessante. No entanto, irá propor-se esse desenvolvimento adicional como um trabalho a realizar no futuro.

## 4.2.2. Trabalhabilidade das misturas

A trabalhabilidade deste tipo de misturas betuminosas podem efetivamente apresentar um problema, na medida em que utiliza uma elevada percentagem de betume envelhecido, que terá influência não só no desempenho da mistura betuminosa em serviço, mas também na fase de produção e compactação. Porém, o primeiro resultado que é possível assinalar, demonstra uma maior capacidade de manuseamento da mistura betuminosa com os ligantes BM1, BM3 e BM4 quando comparada com a mistura produzida com o ligante BR. Este facto mostra que apesar de aumento da rigidez provocada pela utilização dos polímeros, os ligantes podem melhorar a trabalhabilidade das misturas betuminosas com elevadas taxas de MF, garantindo melhor controlo da qualidade da mistura.

Na Figura 4.23 (a) é possível visualizar em pormenor o aspeto da mistura MR. Numa primeira avaliação nota-se a ausência de finos na mistura, isto porque se encontram à volta dos agregados de maiores dimensões. Isto demonstra que este tipo de mistura reciclada com rejuvenescedores poderá provocar maiores dificuldades aquando do manuseamento e compactação. Por sua vez, na Figura 4.23 (b) é possível visualizar que a mistura produzida com o ligante BM1 não apresenta nos agregados de maiores dimensões a mesma quantidade de finos, e o mesmo aconteceu nas misturas com os ligantes BM3 e BM4, tal como demonstra a Figura 4.24 (a) e (b).

Esta conclusão aferida através da Tabela 4.6 onde são apresentadas as características da compactação dos provetes do ensaio de sensibilidade à água. Assim, verifica-se que com a utilização da mesma energia e com uma temperatura aproximada de compactação (em relação à mistura MR), a utilização de betumes regeneradores com polímeros conduz a um menor volume de vazios, o que demonstra um melhor adensamento e uma melhor trabalhabilidade.



Figura 4.23 – Aspeto visual da (a) mistura MR e (b) mistura M1



Figura 4.24 – Aspeto visual da (a) mistura M3 e (b) mistura M4

Tabela 4.6 – Características da compactação dos provetes Marshall

| Mistura | Pancadas (nº) | Temperatura (°C) | Vv (%) |
|---------|---------------|------------------|--------|
| M1      | 150           | 134              | 3,2    |
| M2      | 150           | 133              | 4,0    |
| M3      | 150           | 134              | 4,1    |
| M4      | 150           | 135              | 3,2    |
| MR      | 150           | 135              | 5,0    |

### 4.2.3. Deformação permanente

A avaliação da deformação permanente através do ensaio de pista é outros dos ensaios que permite avaliar o desempenho de uma mistura betuminosa. Este ensaio tem particular importância nos países com climas quentes, uma vez que na presença de temperaturas mais elevadas os betumes tendem a reduzir significativamente a sua viscosidade, e sob a ação das cargas do tráfego deformam-se permanentemente.

A deformação resultante da contínua passagem de um rodado sobre a mistura aumenta com o aumento do número de ciclos. O rápido aumento que ocorre no início de aplicação da carga deve-se ao adensamento da mistura (pós-compactação), isto é, a um reajuste dos agregados. Já o comportamento intrínseco do material deve ser avaliado através da variação da deformação permanente entre os 5000 e os 10000 ciclos de carga. Na Figura 4.25, verifica-se a evolução da deformação das várias misturas ao longo dos diversos ciclos de carga. Relembra-se que nesta fase já não se prosseguiu com o estudo da mistura M2.

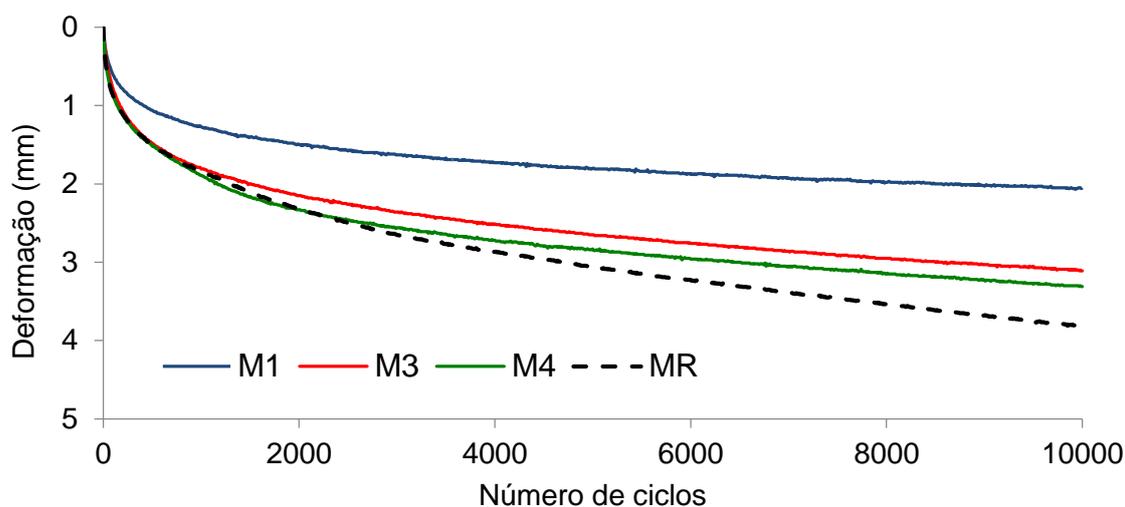


Figura 4.25 – Evolução da deformação das misturas em estudo

Na análise deste ensaio, além da evolução da deformação, deve-se ter em consideração outros parâmetros, como a taxa de deformação em ensaio de pista ( $WTS_{AIR}$ ), a percentagem da profundidade de rodeira máxima ( $PRD_{AIR}$ ) e a profundidade máxima da rodeira ( $PR_{AIR}$ ), valores que são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parâmetros do ensaio de pista

| Mistura | $WTS_{AIR}$<br>(mm/10 <sup>3</sup> ciclos) | $PRD_{AIR}$<br>(%) | $RD_{AIR}$<br>(mm) |
|---------|--|--------------------|--------------------|
| MR      | 0,15                                       | 9,34               | 3,82               |
| M1      | 0,05                                       | 4,89               | 2,05               |
| M3      | 0,09                                       | 7,55               | 3,10               |
| M4      | 0,09                                       | 7,90               | 3,30               |

Os resultados demonstram que todas as misturas desenvolvidas neste trabalho apresentam um melhor desempenho à deformação permanente do que a mistura de referência (MR).

Verifica-se que a taxa de deformação é menor para a mistura M1, seguindo-se a mistura M3 e M4 e por último a mistura de referência (MR). Por sua vez, a mistura MR apresenta a maior profundidade de rodeira, seguindo-se a mistura M3 e M4 (Figuras 4.26 e 4.27), sendo que a mistura M1 (Figura 4.28) apresenta o menor valor neste parâmetro. Neste ensaio, a mistura M1 destaca-se ainda através de uma análise visual, sendo possível verificar que a deformação final é bastante menor do que a observada em cada uma das restantes misturas estudadas. De acordo com a Tabela 4.7 todos os parâmetros avaliados revelam-se melhores na mistura M1.

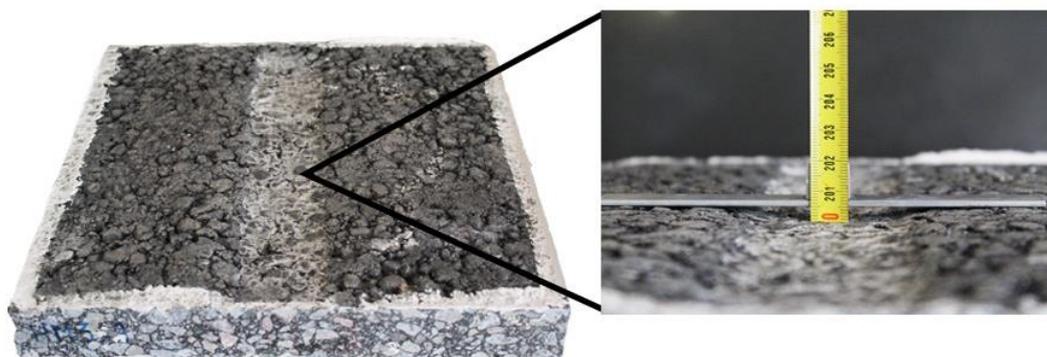


Figura 4.26 – Rodeira da mistura M3

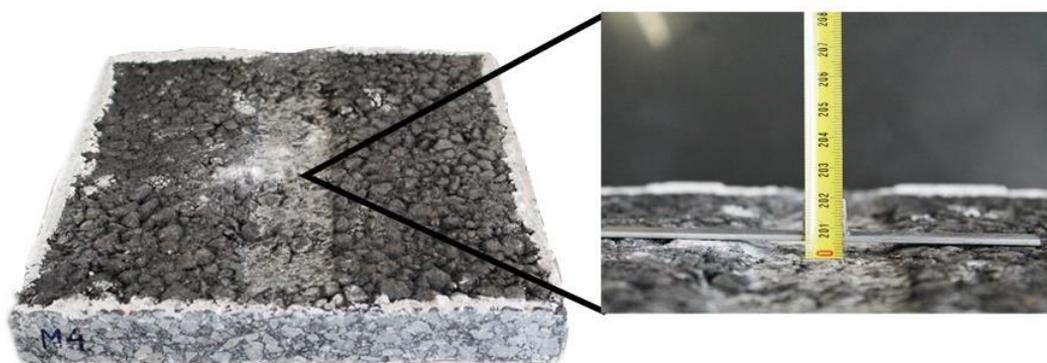


Figura 4.27 – Rodeira da mistura M4

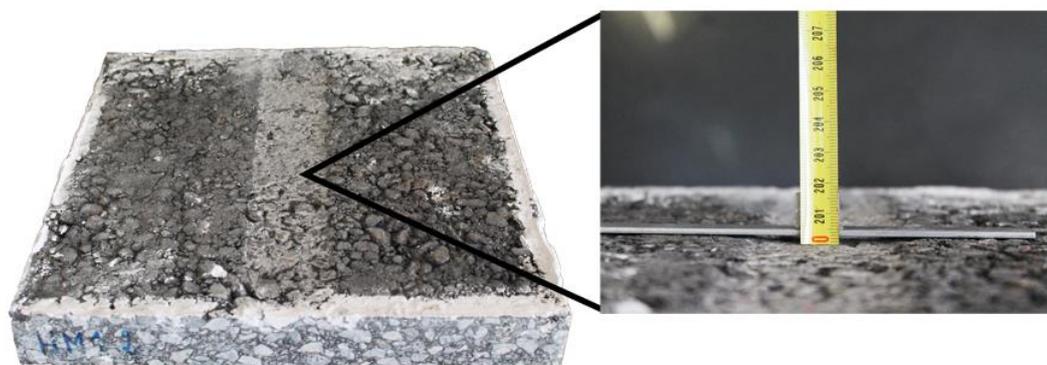


Figura 4.28 – Rodeira da mistura M1

#### 4.2.4. Módulo de rigidez

No que diz respeito ao módulo de rigidez, e de modo a perceber de que forma a temperatura influencia essa propriedade, foram feitos ensaios a várias temperaturas para ser possível traçar curvas mestras (para uma temperatura de referência de 20 °C) que permitem comparar as misturas numa gama de frequências equivalentes mais alargada.

No que respeita ao módulo complexo, as curvas mestras das diferentes misturas betuminosas, incluindo uma mistura de referência, estão representadas na Figura 4.29.

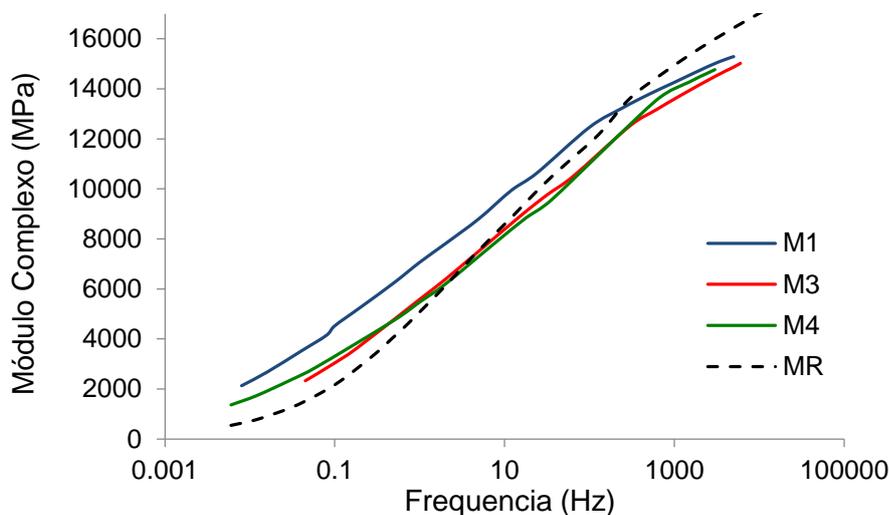
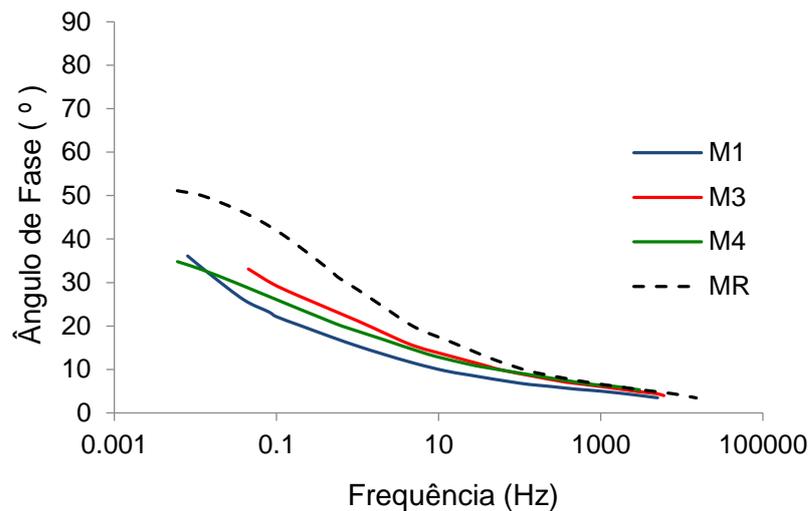
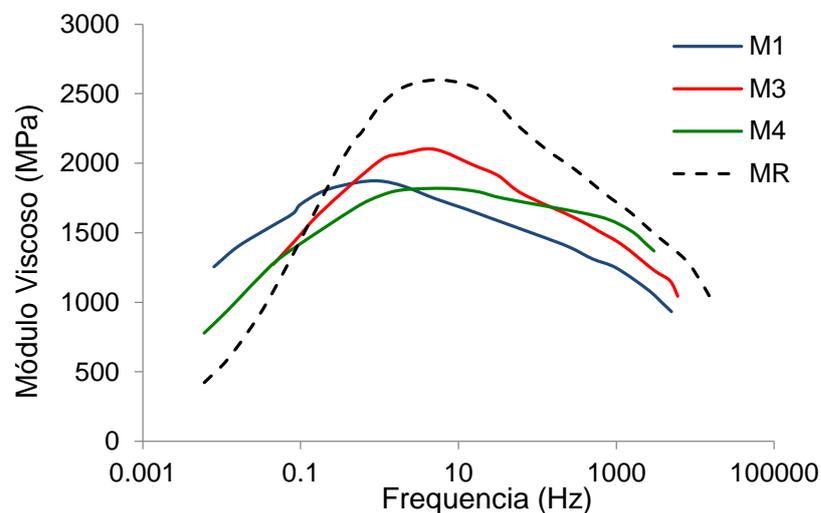


Figura 4.29 – Curvas mestras do módulo complexo ( $T_{REF} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

De acordo com os resultados obtidos é possível concluir, relativamente ao módulo complexo, que as misturas M1, M3 e M4 apresentam um valor mais baixo do que a mistura de referência (MR), pelo menos para frequências elevadas. Por outro lado, na gama de frequências mais baixas as misturas M1, M3 e M4 exibem um valor maior de rigidez. A gama de frequências mais baixa representa velocidades de tráfego mais baixas e temperaturas mais altas, e a gama de frequência mais elevada representa velocidades mais altas e temperaturas mais baixas. Como tal, o comportamento das misturas M1, M3 e M4 demonstra ser menos sensível à variação da velocidade de tráfego (e por consequência à variação de temperaturas), razão pela qual essas misturas podem apresentar uma maior resistência às deformações permanentes, e ao mesmo tempo uma maior resistência à fadiga.

A mistura M1 tem maior módulo complexo em quase toda a gama de frequências analisada. Apenas nas frequências mais elevadas é que apresenta valores mais baixos que a mistura MR. Quanto às misturas M3 e M4, estas apresentam valores semelhantes, mas mais baixos do que os valores da mistura M1 em toda a gama de frequências avaliada.

De facto, verifica-se que as misturas M4, M3 e M1 apresentam consecutivamente valores de ângulo de fase (Figura 4.30) mais reduzidos do que a mistura MR, resultando daí um comportamento menos viscoso que deu origem a um menor valor de pico para o módulo viscoso (Figura 4.31) destes materiais.

Figura 4.30 – Curvas mestras do ângulo de fase ( $T_{REF} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )Figura 4.31 – Curvas mestras do módulo viscoso ( $T_{REF} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Ainda se confirma que a mistura M1 exibe um comportamento diferente das restantes misturas, dado que para além do valor mais baixo do ângulo de fase, o valor do pico do módulo viscoso ocorre numa gama de frequências mais baixa. Isto permite concluir que a utilização de 50% de material fresado juntamente com o ligante comercial modificado (mistura M1) reduz de forma significativa a deformabilidade da mistura em relação às restantes misturas em estudo.

De modo a comprovar as conclusões obtidas através da análise das figuras anteriores, a Figura 4.32 confirma que o comportamento módulo elástico das diferentes misturas em análise é semelhante ao observado no módulo complexo.

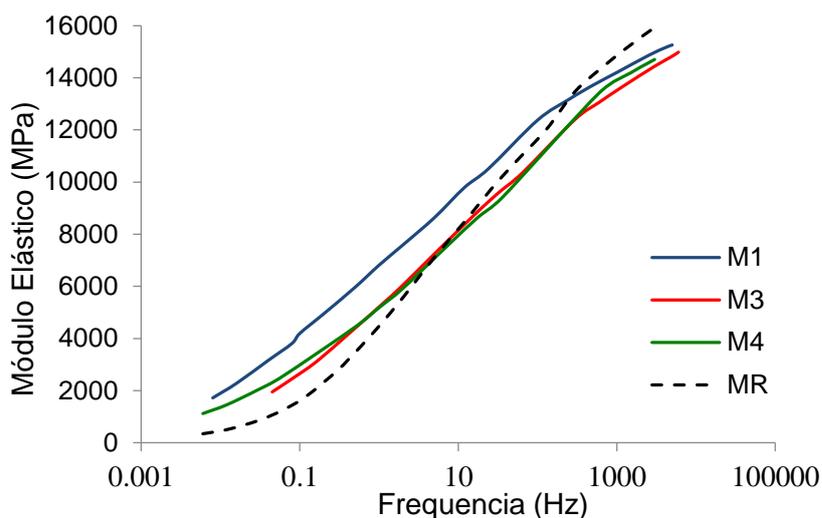


Figura 4.32 – Curvas mestras do módulo elástico ( $T_{REF} = 20\text{ °C}$ )

#### 4.2.5. Fendilhamento por fadiga

A resistência à fadiga é um dos critérios a ter em conta quando se pretende realizar o dimensionamento de pavimentos, pois o fendilhamento é uma das principais causas de ruína do pavimento. Como tal, é necessário assegurar que até atingir um determinado número de ciclos de carga, correspondentes à vida útil prevista para o pavimento, as misturas em estudo não sofrem excesso de fendilhamento que possa comprometer o seu desempenho. A lei de fadiga da mistura betuminosa, desenvolvida por Monismith (1981) relaciona o número de ciclos de carga até atingir a rotura por fadiga, com a extensão de tração aplicada ( $\epsilon_0$ ).

As leis de fadiga de cada uma das misturas em estudo, bem como a lei de fadiga duma mistura de referência, estão representadas na Figura 4.33, tendo em atenção que para definir a lei de fadiga foi considerada meia extensão (de acordo com a norma de ensaio).

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que as misturas M1, M3 e M4 apresentam uma resistência à fadiga muito maior do que a mistura de referência (MR). Pode desde logo apontar-se como uma das principais razões para este resultado a maior flexibilidade promovida pela adição de polímeros às misturas através da modificação do ligante. A elevada rigidez devido à incorporação do material fresado não é um problema, como de resto seria de esperar, já que juntamente com os polímeros é possível observar um efeito benéfico no desempenho das misturas ao fendilhamento por fadiga.

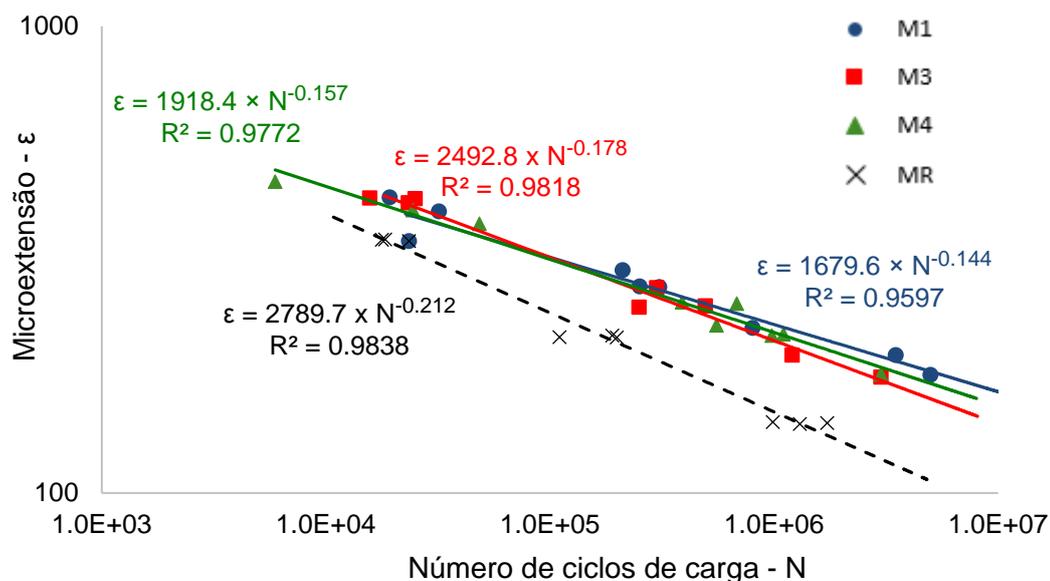


Figura 4.33 – Leis de fadiga das misturas

Comparando as misturas M1, M3 e M4, estas exibem um comportamento semelhante. No entanto, a utilização do ligante BM1 pode efetivamente potenciar uma maior resistência ao fendilhamento por fadiga quando se trata da aplicação de extensões mais baixas. No entanto, todos os ligantes utilizados demonstram obter um resultado que se perspetiva uma excelente solução no que se refere à avaliação desta propriedade.

Para além da análise à lei de fadiga, também é possível determinar a extensão de tração que provoca uma resistência ao fendilhamento por fadiga de  $1 \times 10^6$  ciclos ( $\epsilon_6$ ) e o número de ciclos que a mistura consegue suportar para uma extensão de tração de  $100 \times 10^{-6}$  ( $N_{100}$ ). Na Tabela 4.8 apresentam-se esses parâmetros obtidos a partir da lei de fadiga de cada mistura.

Tabela 4.8 – Parâmetros das leis de fadiga das misturas

| Mistura | Parâmetros obtidos da lei de fadiga |        |        | $\epsilon_6$ | $N_{100}$         |
|---------|-------------------------------------|--------|--------|--------------|-------------------|
|         | a                                   | b      | $R^2$  |              |                   |
| M1      | 1679,6                              | -0,144 | 0,9597 | 229          | $3,2 \times 10^8$ |
| M3      | 2492,8                              | -0,178 | 0,9818 | 213          | $7,0 \times 10^7$ |
| M4      | 1918,4                              | -0,157 | 0,9772 | 219          | $1,5 \times 10^8$ |
| MR      | 2789,7                              | -0,212 | 0,9838 | 149          | $6,5 \times 10^6$ |

A análise a estes parâmetros demonstra que para uma extensão de tração de  $100 \times 10^{-6}$  ( $N_{100}$ ) a mistura M1 consegue suportar  $3,2 \times 10^8$  ciclos, um valor que representa um aumento em cerca

de 50 vezes da vida à fadiga quando comparada com a mistura de referência (MR). Por sua vez a extensão de tração a que corresponde  $1 \times 10^6$  ciclos ( $\epsilon_6$ ) é de  $229 \times 10^{-6}$ , ou seja, para provocar o mesmo dano é possível aplicar uma carga que provoque uma extensão 53% superior à extensão suportada pela mistura MR.

Por comparação com a mistura MR, a mistura M3 apresenta um aumento de aproximadamente 11 vezes de vida à fadiga, e a extensão necessária para provocar o mesmo dano aumenta em cerca de 43%. Por fim, a mistura M4 tem um aumento de 23 vezes de vida à fadiga e o aumento da extensão representa 47% quando se compara com a mistura MR.



Figura 4.34 – Degradação por fadiga numa das vigas ensaiadas

### 4.3. Avaliação da resistência ao envelhecimento

#### 4.3.1. Caracterização base dos betumes

A Figura 4.35 permite perceber de que forma o processo de fabrico influencia as características do ligante BM1. Assim, verifica-se uma ligeira redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento. Isto poderá indiciar um aumento da rigidez do ligante após o processo de fabrico. Quanto à resiliência, demonstra-se um aumento desta propriedade após fabrico, o que indica a presença do polímero, que juntamente com o aumento da rigidez promove a capacidade resiliente do betume.

A Figura 4.36 demonstra que o ligante da mistura M3 após o processo de recuperação diminui a penetração e aumenta o ponto de amolecimento. Já a resiliência não sofre qualquer alteração, indicando a presença do polímero e, ao contrário do que aconteceu com o ligante BM1, prevê-se que não haja um aumento significativo da rigidez dado que a resiliência também não aumenta.

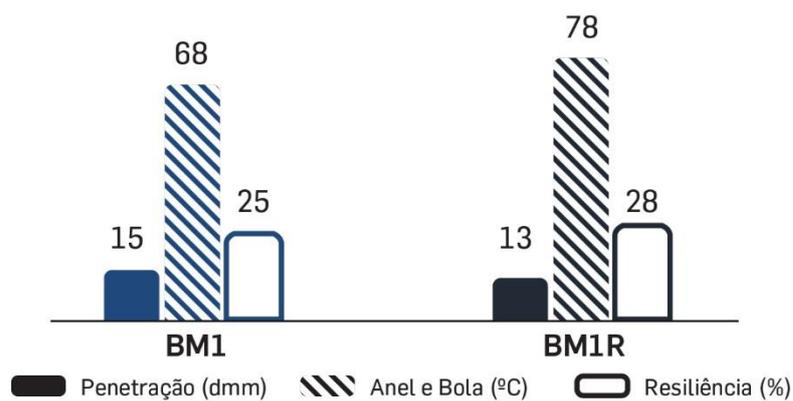


Figura 4.35 – Características do ligante BM1 antes e após o processo de fabrico

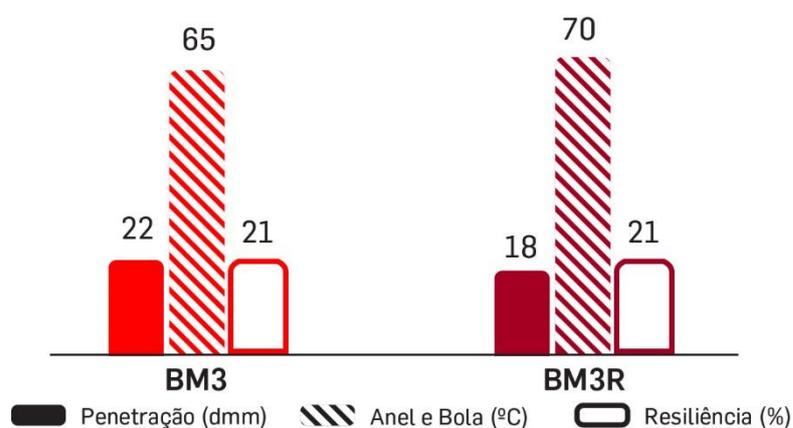


Figura 4.36 – Características do ligante BM3 antes e após o processo de fabrico

Segundo a Figura 4.37 verifica-se que o ligante da mistura M4, demonstra a maior redução do valor da penetração e igualmente o maior aumento do ponto de amolecimento. Dessa forma, prevê-se o maior aumento ao nível da rigidez do betume durante o fabrico quando comparado com os restantes ligantes.

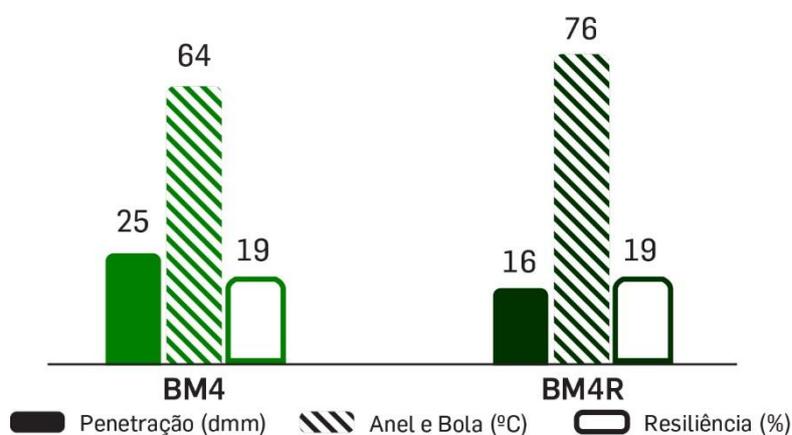


Figura 4.37 – Características do ligante BM4 antes e após o processo de fabrico

A resiliência do ligante BM4 não sofre qualquer alteração no seu valor, pelo que se constata a presença do polímero, embora o aumento da rigidez não se faça sentir com o aumento da resiliência dado se trata de um processo de introdução a seco do polímero (que dessa forma não é tão eficaz na modificação, em comparação com o processo húmido).

A Figura 4.38 demonstra que o ligante de referência, após o processo de fabrico, diminui a penetração e aumenta o ponto de amolecimento. Já a resiliência não sofre qualquer alteração, dado que o ligante não tem componentes elastoméricas, e por isso não apresenta resiliência.

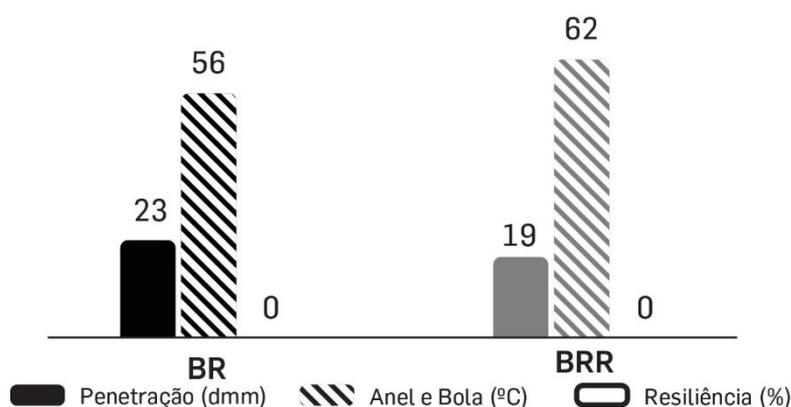


Figura 4.38 – Características do ligante BR antes e após o processo de fabrico

De forma a comparar a variação dos parâmetros analisados anteriormente, na Tabela 4.9 estão representados as propriedades dos ligantes antes e após o processo de fabrico.

Tabela 4.9 – Variação das características dos ligantes após o processo de fabrico

| Ligante | Penetração (dmm) | $\Delta$ (%) | Anel e Bola (°C) | $\Delta$ (%) | Resiliência (%) | $\Delta$ (%) |
|---------|------------------|--------------|------------------|--------------|-----------------|--------------|
| BM1     | 15               | -13          | 68               | 15           | 25              | 12           |
| BM1R    | 13               |              | 78               |              | 28              |              |
| BM3     | 22               | -18          | 65               | 8            | 21              | 0            |
| BM3R    | 18               |              | 70               |              | 21              |              |
| BM4     | 25               | -36          | 64               | 19           | 19              | 0            |
| BM4R    | 16               |              | 76               |              | 19              |              |
| BR      | 23               | -22          | 56               | 11           | -               | -            |
| BRR     | 18               |              | 62               |              | -               |              |

Assim, ao nível da penetração verifica-se que o ligante BM1 é o que apresenta menor variação, muito possivelmente pela rede polimérica que se mantém presente. Já o ligante BM4 é o que apresenta a maior variação (provavelmente devido à menor interação entre o polímero e o

betume no método de modificação a seco), sendo mesmo maior que o ligante de referência BR. No que respeita ao ponto de amolecimento constata-se que o ligante BM3 é o que apresenta menor variação, muito provavelmente devido à capacidade que o polímero SBS demonstra de resistir às variações da temperatura. Quanto à resiliência, verifica-se que os ligantes BM3 e BM4 mantêm a resiliência, o que demonstra a presença do polímero no betume recuperado das misturas. Já o ligante BM1 apresenta um aumento desta característica, o que revela que o aumento da rigidez promove a capacidade resiliente do ligante modificado comercial. Duma forma geral o ligante com SBS, recuperado da mistura M3, aparentemente foi o menos influenciado pelo envelhecimento durante o fabrico, enquanto o ligante com *Regefalt*, obtido da mistura M4 produzida pelo método seco, aparenta ter sido o mais afetado.

### 4.3.2. Caraterização reológica

A Figura 4.39 (a) e (b) demonstra que o processo de fabrico conduziu a um aumento da rigidez do ligante BM1 e a uma redução do valor do ângulo de fase. No entanto, tendo em conta as temperaturas a que são avaliadas as características mecânicas das misturas, a 20°C praticamente não existe variação do módulo complexo e do ângulo de fase, o que indica que as misturas M1 após o processo de fabrico mantém globalmente o desempenho previsto quanto ao fendilhamento por fadiga. No que se refere às elevadas temperaturas verifica-se um aumento do módulo e diminuição do ângulo de fase, facto que promove o comportamento elástico da mistura e melhora o desempenho à deformação permanente. Como seria de esperar, a viscosidade também sofre um aumento, consequência da maior rigidez após processo de fabrico da mistura, como demonstra a Figura 4.40 (a) e Figura 4.40 (b).

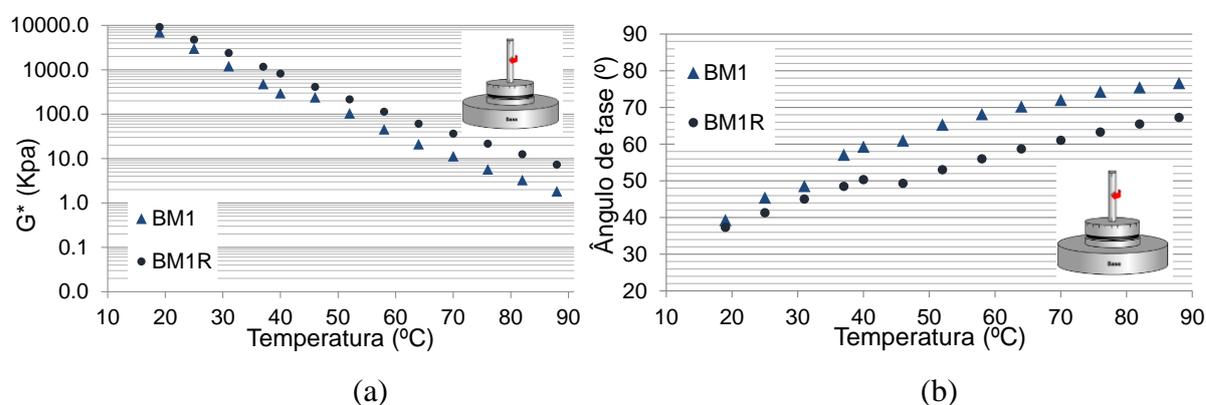


Figura 4.39 – Reologia dos ligantes BM1 e BM1R: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

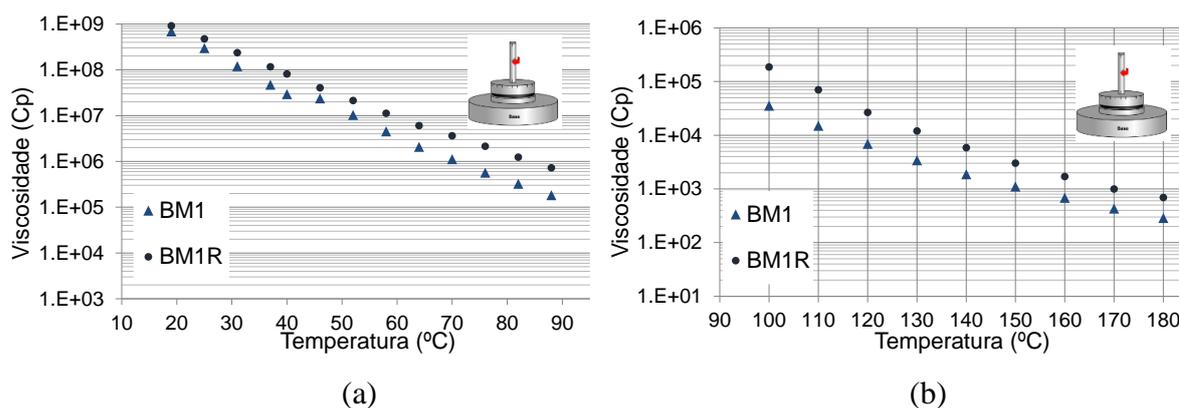


Figura 4.40 – Viscosidade dos ligantes BM1 e BM1R no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

Relativamente à mistura M3 e no que diz respeito ao módulo complexo e ângulo de fase dos ligantes avaliados, através da Figura 4.41 (a) e Figura 4.41 (b) os resultados demonstram que existe um ligeiro aumento do módulo complexo e uma pequena redução do ângulo de fase. Estas diferenças demonstram que seja previsível que não haja grandes alterações no comportamento das misturas a baixas e elevadas temperaturas. Assim, este ligante com SBS não parece ter sido muito afetado pelo envelhecimento a curto prazo durante a fase de produção da mistura, o que confirma os resultados anteriores.

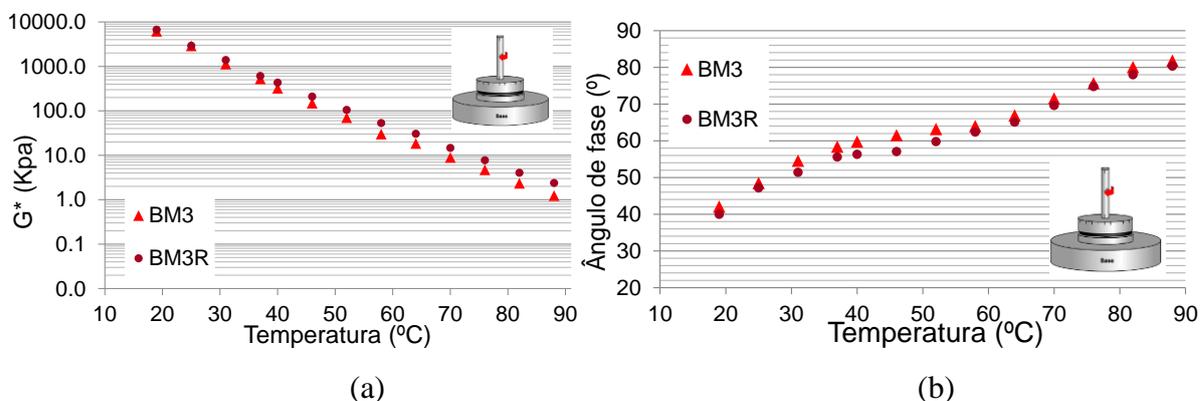


Figura 4.41 – Reologia dos ligantes BM3 e BM3R: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

Na Figura 4.42 (a) e (b) também não se verifica alterações significativas na viscosidade que sejam passíveis de indicarem uma maior rigidez do ligante BM3R relativamente ao BM3. Verifica-se que o processo de fabrico não provoca alterações significativas no comportamento do ligante da mistura M3, em especial se considerarmos que o processo de recuperação pode ainda provocar um ligeiro envelhecimento do ligante, dado que este está exposto a vácuo e elevadas temperaturas.

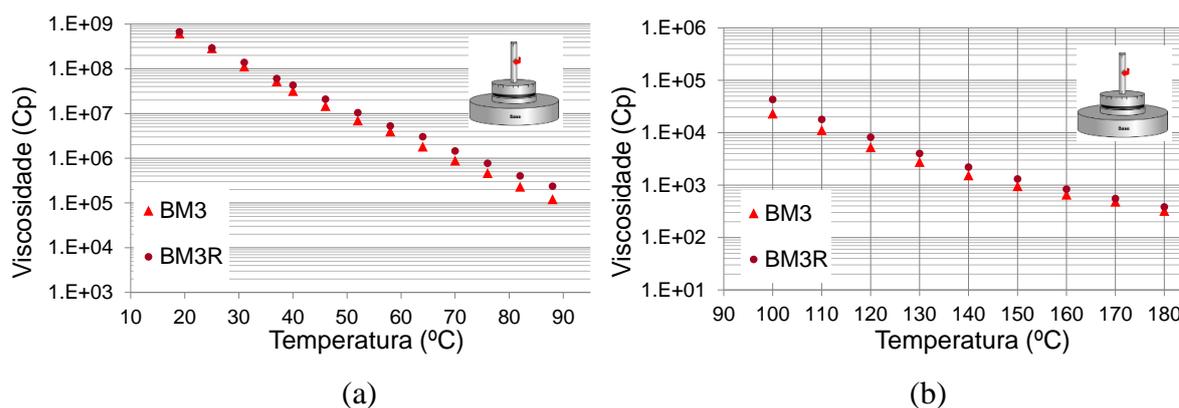


Figura 4.42 – Viscosidade dos ligantes BM3 e BM3R no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

De acordo com a Figura 4.43 (a) e a Figura 4.43 (b) verifica-se que o ligante BM4, após o processo de fabrico (BM4R), demonstra um módulo complexo equivalente às baixas temperaturas de serviço, mas no entanto verifica-se uma redução do ângulo de fase, o que torna previsível uma diminuição da resistência à fadiga. Já nas elevadas temperaturas de serviço existe um aumento significativo do módulo e uma redução do ângulo de fase que pode melhorar a capacidade da mistura M4 resistir à deformação permanente. Ainda de referir que se verifica o maior aumento de rigidez e a maior redução do ângulo de fase para este ligante, o que pode indicar que se trata da mistura mais afetada pelo envelhecimento provocado pelo processo de fabrico (eventualmente devido à utilização do método seco de modificação do ligante nesta mistura, tal como observado anteriormente).

Quanto à viscosidade, como de resto seria de esperar, o ligante recuperado da mistura M4 confirma que de todos os ligantes avaliados é aquele que apresenta uma maior variação de viscosidade, tal como demonstram as Figura 4.44 (a) Figura 4.44 (b).

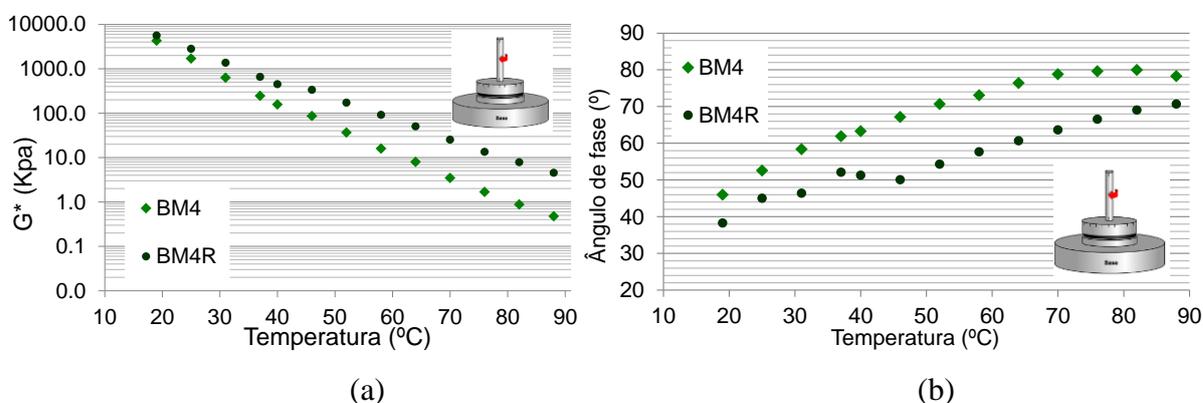


Figura 4.43 – Reologia dos ligantes BM4 e BM4R: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

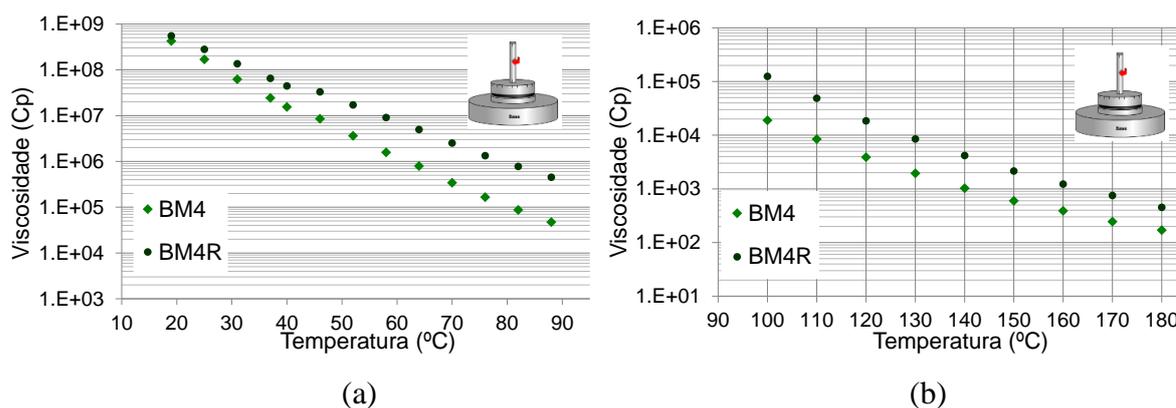


Figura 4.44 – Viscosidade dos ligantes BM4 e BM4R no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

No que respeita à evolução da rigidez e do ângulo de fase do ligante de referência, de acordo com a Figura 4.45 (a) e Figura 4.45 (b) verifica-se para à temperatura de 20°C não existe grande variação do módulo de rigidez. No entanto, no que se refere ao ângulo de fase após o processo de fabrico verifica-se uma redução da capacidade viscosa do ligante que revela uma menor capacidade em resistir à fadiga. Nas temperaturas de serviço elevadas (50°) a maior rigidez e o menor ângulo de fase promovem a capacidade elástica do material, aumentando assim a resistência à deformação permanente. Nas Figura 4.46 (a) Figura 4.46 (b) verifica-se um aumento da viscosidade do ligante BRR após o processo de fabrico.

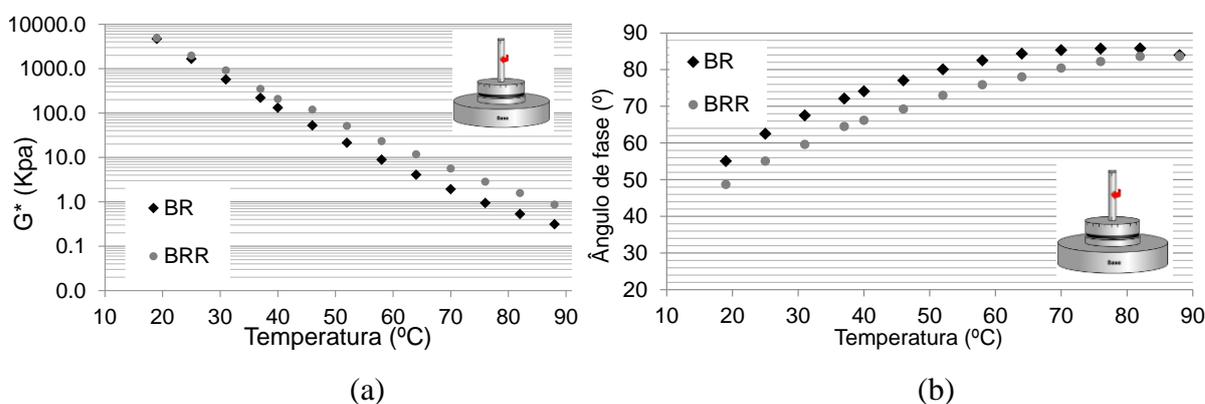


Figura 4.45 – Reologia dos ligantes BR e BRR: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

Duma forma geral, a análise gráfica demonstrou um aumento da rigidez, viscosidade e uma redução do ângulo de fase para os ligantes expostos ao processo de fabrico. Deste modo, era importante perceber de que modo o processo de fabrico afeta o comportamento do ligante nas temperaturas a que ocorrem os fenómenos de fadiga e deformação permanente, respetivamente para temperaturas de referência de 20°C e 50°C.

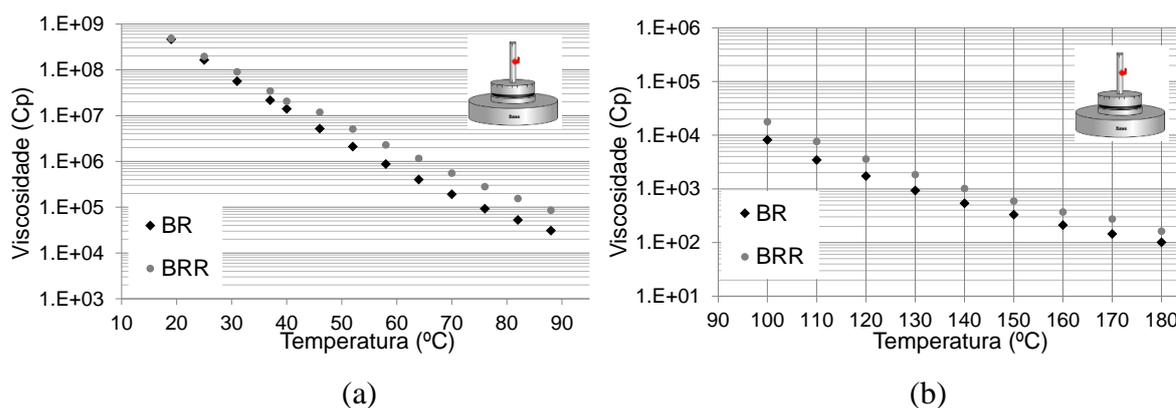


Figura 4.46 – Viscosidade dos ligantes BR e BRR no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

Assim, na Tabela 4.10 é apresentado a variação do módulo e ângulo de fase para os ligantes e a respetiva variação para uma temperatura média de serviço de 20 °C. No que diz respeito ao módulo complexo não se verificam grandes variações nas misturas estudadas, sendo que o maior aumento verifica-se na mistura BM1, embora esse mesmo ligante demonstre ter a menor variação do ângulo de fase (combinação esta que permite ao este ligante oferecer uma maior capacidade no que respeita à fadiga). Por sua vez o ligante BM3 é o que apresenta menor variação da rigidez e do ângulo de fase, demonstrando manter as suas capacidades após o processo de fabrico e revelando uma elevada capacidade em resistir ao envelhecimento. Por sua vez o ligante BM4 demonstra um maior aumento da rigidez e uma elevada variação do ângulo de fase que promove a componente elástica do ligante, característica que a esta temperatura reduz a resistência à fadiga.

Tabela 4.10 – Variação do módulo e ângulo de fase após o processo de fabrico ( $T=20^{\circ}\text{C}$ )

| Ligante | Módulo complexo ( $G^*$ ) | $\Delta$ (%) | Ângulo de fase ( $^{\circ}$ ) | $\Delta$ (%) |
|---------|---------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
| BM1     | 6989                      | 32           | 39                            | -5           |
| BM1R    | 9220                      |              | 37                            |              |
| BM3     | 6385                      | 3            | 42                            | -5           |
| BM3R    | 6576                      |              | 40                            |              |
| BM4     | 4300                      | 30           | 46                            | -17          |
| BM4R    | 5605                      |              | 38                            |              |
| BR      | 4676                      | 5            | 55                            | -12          |
| BRR     | 4902                      |              | 49                            |              |

O ligante BM4 e o ligante BR são os que apresentam maior redução do ângulo de fase promovendo uma maior componente elástica do comportamento material, o que demonstra que

os ligantes não apresentam grande capacidade de resistir ao envelhecimento. De facto, o fabrico destas misturas M4 e MR promove uma maior componente elástica do material, que desta forma se torna menos favorável no que respeita ao fendilhamento por fadiga.

O ligante BM1 é o que apresenta maior valor de módulo, e esta característica por si só poderia indicar menor capacidade para resistir à fadiga. No entanto, a capacidade resiliente associada a elevados módulos demonstra ser uma mais-valia no que respeita à fadiga.

Na Tabela 4.11 estão representados os módulos complexos e ângulo de fase dos ligantes para as temperaturas de serviço elevadas (50 °C). Nesta fase o aumento do módulo complexo e respetiva redução do ângulo de fase pode ser benéfico, no sentido em que o material demonstra maior rigidez e maior capacidade elástica, o que resulta numa maior resistência do ligante à deformação permanente. Nesta temperatura o ligante BM3 é o que apresenta menor variação do módulo, e o mesmo se pode referir ao ângulo de fase, comportamento que revela a maior capacidade que este betume têm em resistir ao envelhecimento.

O ligante BM1 é o que apresenta maior valor de módulo a esta temperatura, e deste comportamento pode-se concluir que apresenta a maior capacidade de resistir à deformação permanente. Mais uma vez o ligante BM4 é o que apresenta a maior variação dos parâmetros em análise, que pode dever-se à menor capacidade deste ligante em resistir ao envelhecimento. O ligante de referência é o que demonstra menor valor do módulo após fabrico (BRR), condicionando a capacidade desta mistura resistir à deformação permanente.

Tabela 4.11 – Variação do módulo e ângulo de fase após o processo de fabrico (T=50°C)

| Ligante | Módulo complexo (G*) | $\Delta$ (%) | Ângulo de fase (°) | $\Delta$ (%) |
|---------|----------------------|--------------|--------------------|--------------|
| BM1     | 105                  | 106          | 65                 | -19          |
| BM1R    | 215                  |              | 53                 |              |
| BM3     | 71                   | 49           | 63                 | -5           |
| BM3R    | 105                  |              | 60                 |              |
| BM4     | 37                   | 373          | 71                 | -23          |
| BM4R    | 173                  |              | 54                 |              |
| BR      | 21                   | 140          | 80                 | -14          |
| BRR     | 51                   |              | 69                 |              |

Efetivamente o ligante BM3 é o que apresenta a menor variação do módulo complexo e ângulo de fase nas gamas de temperaturas consideradas, pelo que demonstra ser o ligante com maior capacidade de resistir ao envelhecimento provocado pelo processo de fabrico.

#### 4.4. Caracterização química através da espectroscopia de FTIR

Na análise por espectroscopia de FTIR dos betumes e ligantes analisados é possível, através dos índices de carbonilo e sulfóxido calculados, ter uma noção mais detalhada do processo evolutivo que levou à produção dos ligantes. Na Figura 4.47 (a) é apresentado o espectro FTIR que conduz ao ligante BM1, onde é apresentado o espectro do betume envelhecido B0 e o espectro do betume regenerador B1. O ligante BM1 apresenta na sua composição os grupos com a ligação de carbonilo e sulfóxido intermédios comparativamente ao betume B0 e betume B1 que estiveram na sua origem. Já na Figura 4.47 (b) pode-se observar o pormenor da banda espectral analisada. A seguir, nas Figuras 4.48 a 4.54, são apresentados todos os espectros obtidos nos diferentes betumes e ligantes estudados.

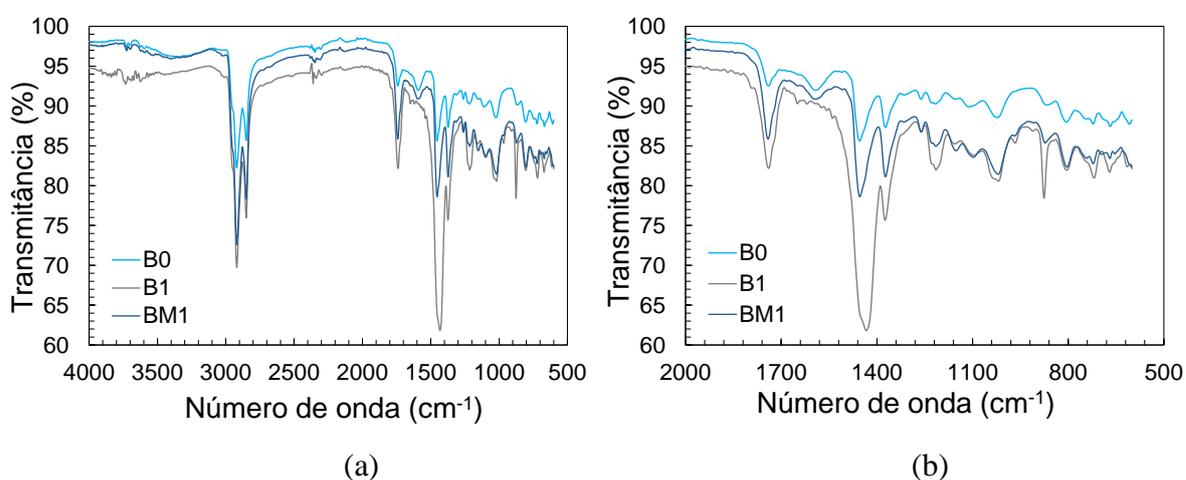


Figura 4.47 – Espectro de FTIR (a) da constituição do ligante BM1 e (b) banda espectral analisada

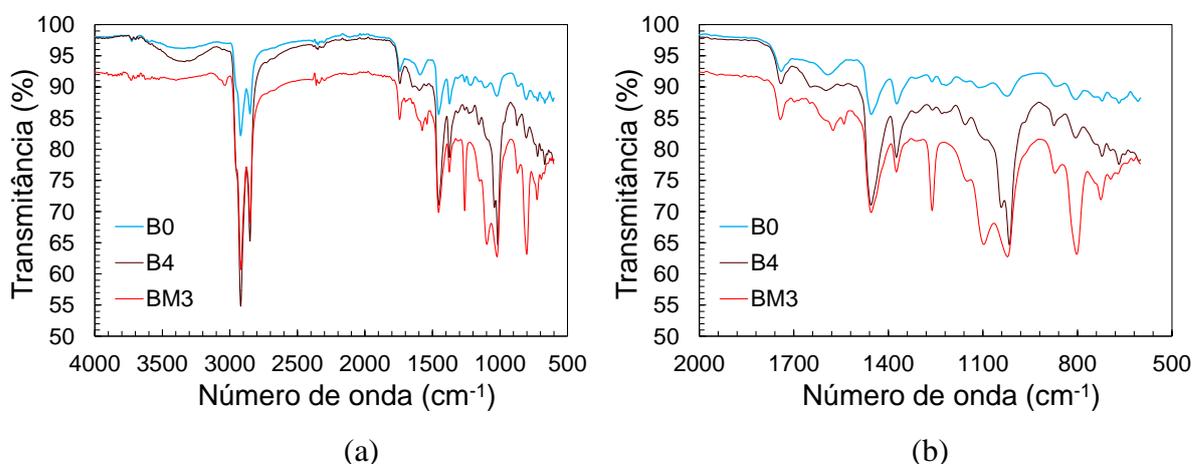


Figura 4.48 – Espectro de FTIR (a) da constituição do ligante BM3 e (b) banda espectral analisada

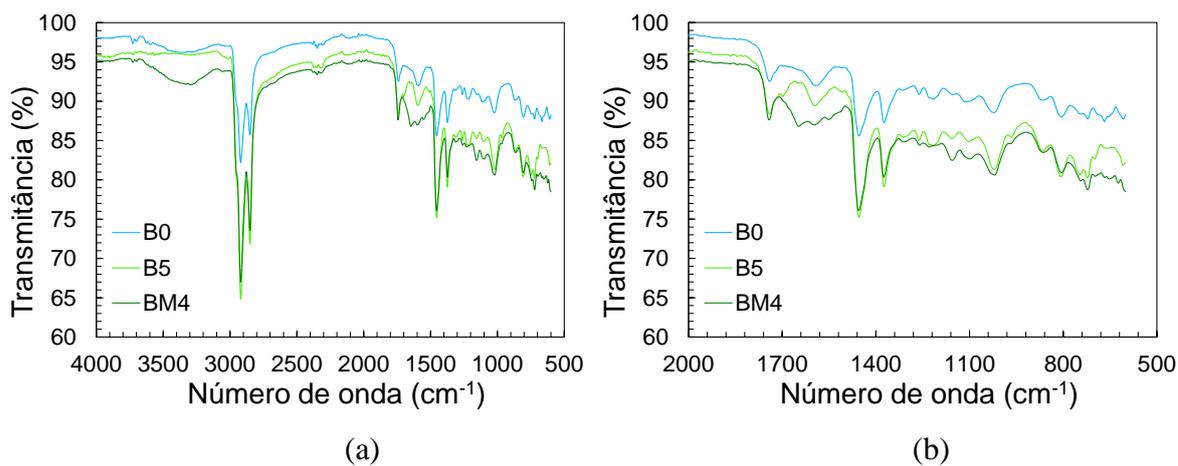


Figura 4.49 – Espectro de FTIR (a) da constituição do ligante BM4 e (b) banda espectral analisada

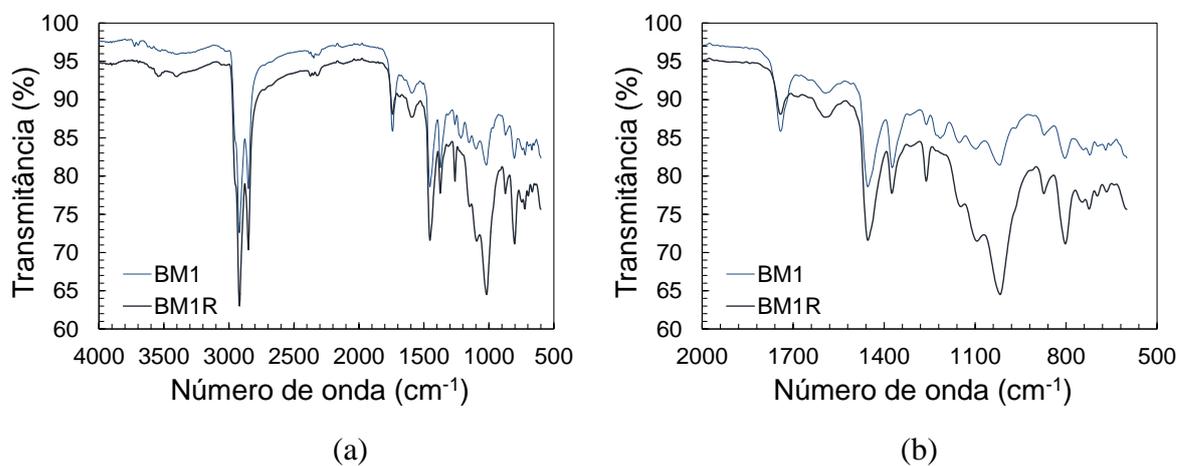


Figura 4.50 – Espectro de FTIR (a) do ligante BM1 e BM1R e (b) banda espectral analisada

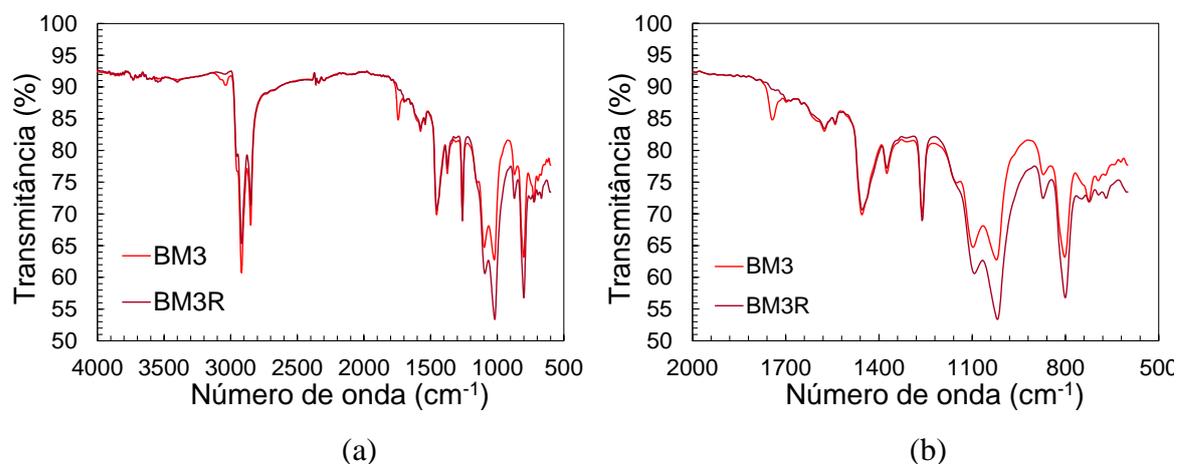


Figura 4.51 – Espectro de FTIR (a) do ligante BM3 e BM3R (b) banda espectral analisada

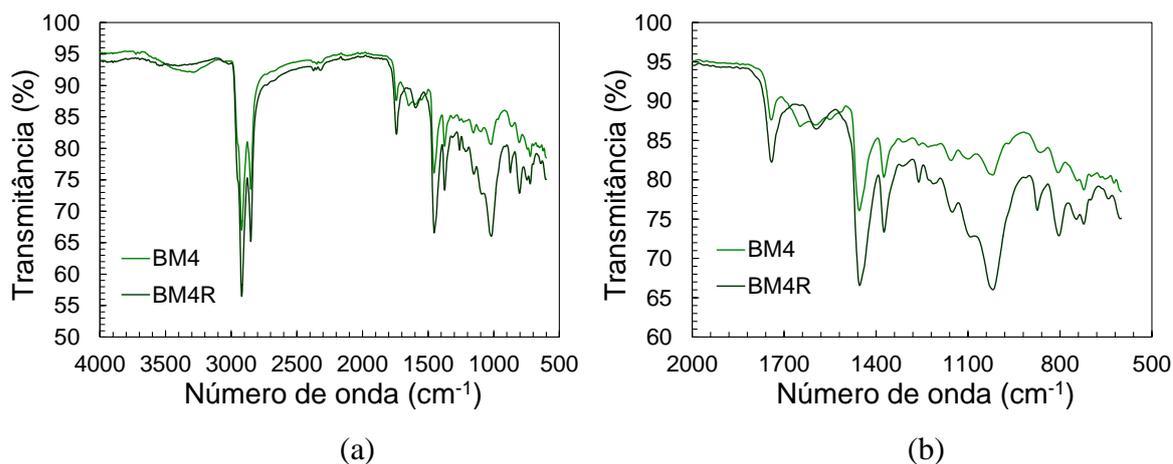


Figura 4.52 – Espectro de FTIR (a) do ligante BM4 e BM4R e (b) banda espectral analisada

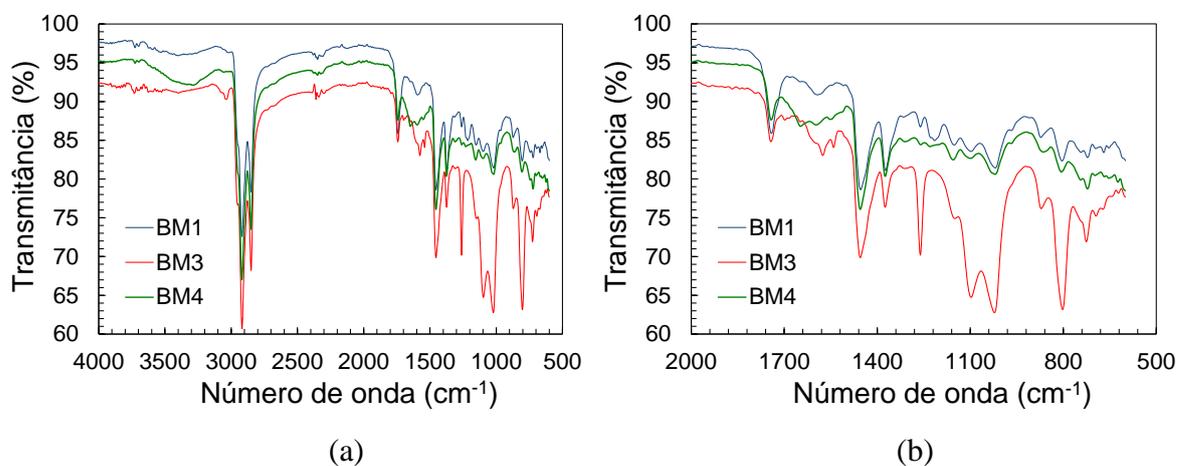


Figura 4.53 – Espectro de FTIR (a) dos ligantes e (b) banda espectral analisada

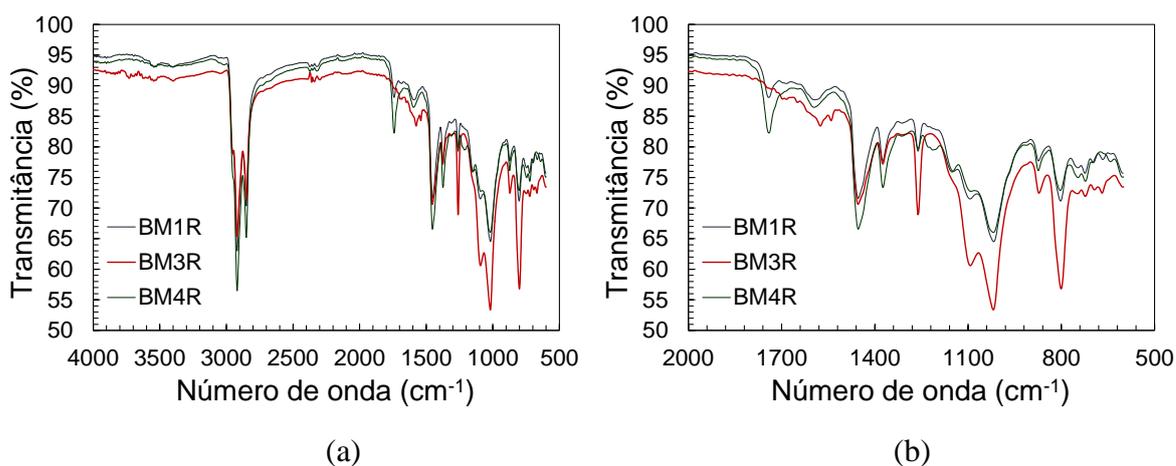


Figura 4.54 – Espectro de FTIR (a) dos ligantes recuperados e (b) banda espectral analisada

Contudo, somente através do cálculo dos índices funcionais (Tabela 4.12) se pode perceber a extensão das alterações ocorridas durante o envelhecimento dos vários ligantes.

Tabela 4.12 – Índices espectroscópicos dos ligantes estudados

| Ligante | Índices          |                  |
|---------|------------------|------------------|
|         | I <sub>C=O</sub> | I <sub>S=O</sub> |
| B0      | 0,101024         | 0,106485         |
| BR      | 0,256805         | 0,275045         |
| BM1     | 0,180474         | 0,081367         |
| BM3     | 0,027734         | 0,142786         |
| BM4     | 0,062304         | 0,245294         |
| BM1R    | 0,050275         | 0,219374         |
| BM3R    | 0,008055         | 0,396178         |
| BM4R    | 0,114782         | 0,073183         |

De acordo com a Figura 4.55 e com a Tabela 4.12 é possível observar a evolução dos índices de carbonilo das misturas do betume envelhecido B0 com os diferentes betumes regeneradores. Dessa forma, verifica-se que o índice de carbonilo dos ligantes BM1 apresenta um valor mais elevado que o betume envelhecido B0. Por forma a explicar tal facto, é necessário recorrer ao cálculo do índice de carbonilo do betume B1, e verifica-se que efetivamente este apresenta um índice elevado que contribui de forma decisiva para o aumento deste valor no ligante BM1. Ainda de referir que o betume regenerador B1 é um betume modificado comercial do qual se desconhece a constituição, pelo que quimicamente é difícil avaliar o impacto da sua junção com um betume envelhecido.

Já o ligante BM4 e BM3 apresentam uma redução do índice de carbonilo relativamente ao betume B0, sendo que este último (BM3) apresenta a ainda uma maior redução.

Quando se realiza a análise sobre os ligantes recuperados verifica-se o seguinte. Ao contrário do que seria expectável, dado o envelhecimento provocado pelo fabrico das misturas, assiste-se a uma redução do índice de carbonilo, no que diz respeito ao ligante recuperado da mistura M1 (BM1R) relativamente ao betume envelhecido B0 e ao ligante BM1. Este resultado demonstra que durante o processo de fabrico pode resultar algum tipo de alteração que não é possível representar num estudo de betumes que efetivamente permita baixar o índice de carbonilo na mistura final. Este resultado pode efetivamente ser comprovado pela mesma redução no que diz respeito ao ligante recuperado BM3R.

No entanto, quando se observa o ligante recuperado da mistura M4 verifica-se um aumento deste índice, que pode ser justificado pela razão indicada pelo fornecedor do polímero, referindo

que o *Regefalt* apenas funciona de forma eficaz em larga escala, quando aplicado em central. A redução do valor do ligante BM4 comparativamente ao betume B0 deve-se à utilização de um betume muito mole, mas que no entanto é mais suscetível ao envelhecimento quando exposto ao processo de fabrico.

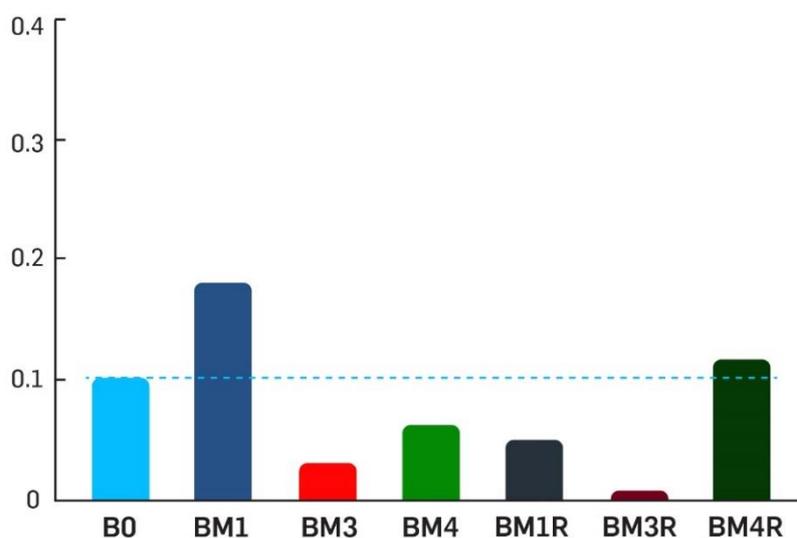


Figura 4.55 – Índices de carbonilo (C=O)

Quanto aos índices de sulfóxido representados na Figura 4.56 e na Tabela 4.12, verifica-se que apresentam comportamentos distintos dos resultados obtidos com índice de carbonilo, como já seria de esperar (Petersen, 1998). Este resultado pode dever-se a um teor variável em enxofre dos ligantes, às condições de exposição dos ligantes durante o aquecimento, fabrico, compactação e até mesmo ao próprio processo de recuperação a que estiveram sujeitos.

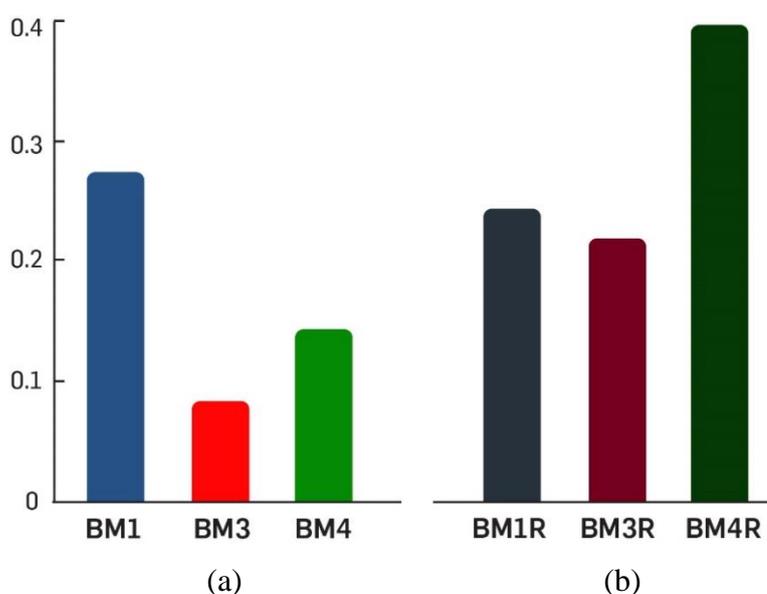


Figura 4.56 – Índices de sulfóxido dos ligantes (a) antes e (b) após o processo de fabrico

Esta análise pode ser feita considerando os ligantes antes do processo de processo de fabrico (Figura 4.56 (a)) e após este processo (Figura 4.56 (b)). Desta forma, verifica-se o que de resto já se conseguiu concluir na análise das ligações de carbonilo, a mistura BM3 é a que apresenta o valor mais baixo do índice de sulfóxido quando comparado com as misturas BM1 e BM4. Ao avaliar este índice após o processo de fabrico, verifica-se novamente um valor mais baixo do índice de sulfóxido da mistura BM3, promovido pela maior capacidade de regeneração do betume com SBS.

Em resumo, os vários métodos de avaliação do envelhecimento parecem convergir ao indicar que a mistura M3 (com SBS) tem a melhor resistência ao envelhecimento, e a mistura M4 (modificada pelo método seco) é a mais influenciada pelo envelhecimento durante o fabrico.

#### **4.5. Avaliação económica**

A avaliação económica é um instrumento importante no estudo de uma alternativa que de alguma forma apresente alguma melhoria em termos de desempenho comparativamente algum produto de uso convencional.

Quando se fala em incorporação de elevadas taxas de material reciclado, é fundamental perceber quais são as reais vantagens em termos de económicos com a produção das misturas e os ganhos ao nível ambiental. Desta forma é apresentada uma avaliação que pretende comparar os custos das misturas produzidas neste estudo com uma mistura de referência (que utiliza um rejuvenescedor comercial), e ainda relativamente a uma mistura convencional.

Inicialmente avaliaram-se os custos de tratamento do MF (Tabela 4.13). Estes custos englobam os trabalhos de fresagem, transporte para central e/ou colocação em depósito do material e ainda a separação do material fresado. Para o efeito, tomou-se como referência um custo médio 20€ por cada  $m^3$  (Baptista, 2006). Além disso, considerou-se que a mistura betuminosa apresenta em condições de compactação uma massa volúmica de  $2400 \text{ kg}/m^3$ , fazendo-se a conversão para a produção de uma tonelada de mistura.

Tabela 4.13 – Custos com o tratamento do MF

| Tipo de custo               | Unidades          | MC | MR   | M1   | M3   | M4   |
|-----------------------------|-------------------|----|------|------|------|------|
| Tratamento do MF            | €/ton             | 0  | 8,33 | 8,33 | 8,33 | 8,33 |
| MF na mistura               | Kg/m <sup>3</sup> | 0  | 2400 | 2400 | 2400 | 2400 |
| Quantidade de MF na mistura | Kg/ton mist       | 0  | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |
| Custo de tratamento (A)     | €/ton mist        | 0  | 4,17 | 4,17 | 4,17 | 4,17 |

De seguida analisaram-se os custos com a aditivação do betume para a percentagem final de ligante na mistura (5,1%). Todos os custos com o ligante, apresentados em seguida na Tabela 4.14, são valores que estão de acordo com a tabela de preços do fornecedor de betumes.

Na análise do custo do ligante é necessário definir o custo do betume utilizado na mistura M3. Este betume desencadeia um processo de modificação e apresenta custos associados com a energia de aquecimento do betume, custos com o polímero e custo da modificação no dispersador de alto corte. Desta forma, considerou-se que o preço deste betume nunca poderá ser superior ao preço do betume modificado comercial, tendo em conta as suas características. Assim, considerou-se o mesmo valor para o betume utilizado na mistura M1 e M3.

Tabela 4.14 – Custos com o ligante

| Tipo de custo                    | Unidades       | MC    | MR    | M1    | M3    | M4    |
|----------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ligante na mistura               | %              | 5,1   | 5,1   | 5,1   | 5,1   | 5,1   |
| Betume regenerador no ligante    | %              | 0     | 50    | 50    | 50    | 50    |
| Aditivo no ligante               | %/ligante      | 0     | 3     | 0     | 0     | 4     |
| Quantidade betume regenerador    | Kg/ton mist    | 0     | 25,5  | 25,5  | 25,5  | 25,5  |
| Quantidade de aditivo na mistura | (kg/ton mist)  | 0     | 0,77  | 0     | 0     | 1,02  |
| Custo betume                     | Kg/ton betume  | 724   | 735   | 775   | 775   | 729   |
| Custo aditivo                    | Kg/ton aditivo | 0     | 3500  | 0     | 0     | 3000  |
| Custo final do betume (B)        | Kg/ton mist    | 36,92 | 21,42 | 19,76 | 19,76 | 21,65 |

Relativamente aos agregados é considerado um custo uniforme para as 5 misturas, sendo que para a mistura convencional (MC) estes representam 100% da massa de agregados e nas restantes misturas os agregados novos são apenas 50% da massa da mistura. Logo, é

considerado apenas metade do valor para o custo dos agregados dado que a composição é análoga nestas misturas (Tabela 4.15).

Tabela 4.15 – Custo com os agregados

| Tipo de custo           | Unidades   | MC    | MR   | M1   | M3   | M4   |
|-------------------------|------------|-------|------|------|------|------|
| Custo com agregados (C) | €/ton mist | 10,50 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 |

No que diz respeito ao fabrico das misturas betuminosas consideram-se custos com a energia despendida no aquecimento dos agregados e ainda um custo restante para os valores correspondentes à amortização da central, montagem e desmontagem e que foi considerado fixo para as cinco misturas produzidas (Tabela 4.16).

O consumo de *fuel* considerado para o aquecimento dos materiais a 240 °C foi obtido por extrapolação, e tem em conta a medição em central realizada por (Ferreira (2009)). No referido estudo foi considerado um consumo de 6 kg de *fuel* por cada tonelada de mistura produzida a uma temperatura de 160 °C. De referir que os custos obtidos para as misturas recicladas se encontram ligeiramente inflacionados uma vez que não se considera que uma parte dos agregados (fração fina do material fresado) é colocada na mistura à temperatura ambiente.

Tabela 4.16 – Custo de fabrico

| Tipo de custo                    | Unidades    | MC   | MR   | M1   | M3   | M4   |
|----------------------------------|-------------|------|------|------|------|------|
| Custo do Fuel                    | €/ton       | 400  | 400  | 400  | 400  | 400  |
| Consumo de Fuel                  | Kg/ton mist | 6    | 10   | 10   | 10   | 10   |
| Custo de Fuel (1)                | Kg/ton mist | 2,4  | 4    | 4    | 4    | 4    |
| Restantes custos de produção (2) | €/ton mist  | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    |
| Custo Total de fabrico (D=1+2)   | €/ton mist  | 7,40 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 |

Por fim, na Tabela 4.17 procede-se ao cálculo do custo total das misturas betuminosas produzidas neste estudo, considerando também a mistura de referência. Este custo obtém-se da soma das parcelas relativas ao tratamento e materiais (A+B+C), juntamente com os custos de fabrico (D).

Tabela 4.17 – Custo total das misturas betuminosas

| Tipo de custo                       | Unidades   | MC    | MR    | M1    | M3    | M4    |
|-------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tratamento (A)                      |            | 0,00  | 4,17  | 4,17  | 4,17  | 4,17  |
| Ligante (B)                         |            | 36,92 | 21,42 | 19,76 | 19,76 | 21,65 |
| Agregados (C)                       | €/ton mist | 10,50 | 5,25  | 5,25  | 5,25  | 5,25  |
| Fabrico (D)                         |            | 7,4   | 9     | 9     | 9     | 9     |
| Custo Total da mistura<br>(A+B+C+D) |            | 54,82 | 39,84 | 38,18 | 38,18 | 40,07 |

Numa análise económica mais aprofundada poderia considerar-se os custos para os utentes devido às perturbações durante a execução e eventuais custos adicionais de conservação na rede rodoviária afetada durante a execução. Todavia, nas soluções de reabilitação (tradicional ou com reciclagem a quente), estes custos podem ser considerados idênticos.

Assim, na Figura 4.57, pode-se constatar que a mistura MR quando comparada com a mistura MC apresenta uma redução de custo na ordem de 27%, mesmo considerando o custo adicional dado pela utilização de aditivos no ligante, os custos com o tratamento do MF e o custo adicional de fabrico devido ao consumo extra de *fuel*. Estes aumentos são compensados com a redução dos custos dos agregados novos e betume. Por sua vez, verifica-se que as misturas M1, M3 e M4 têm um custo de produção semelhante à mistura MR.

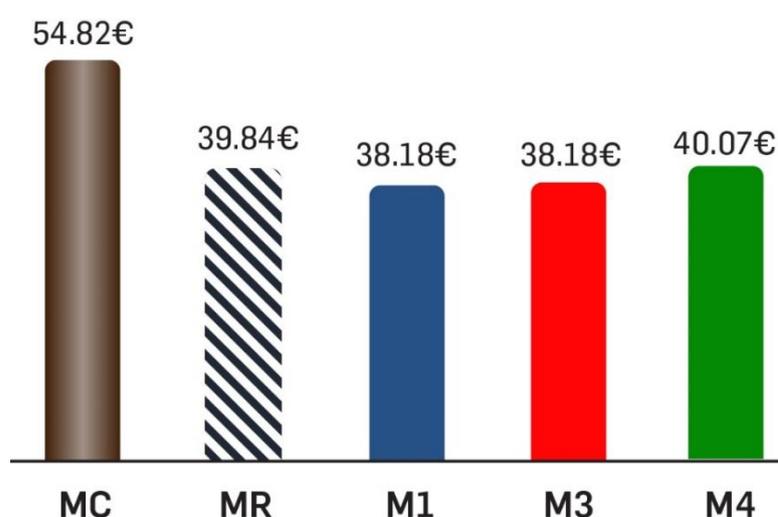


Figura 4.57 – Custos das misturas

Um aspeto a ter em consideração deve-se ao facto destas misturas terem utilizado aditivos que nem sempre é possível saber o seu valor real de mercado. Assim foi feita uma análise de sensibilidade, no sentido de perceber de que forma a variação do custo do aditivo poderia influenciar o custo final da mistura, e concluiu-se que o custo deste não teria uma influência muito significativa no custo final da mistura.

Este estudo permitiu averiguar a viabilidade das novas soluções estudadas a nível económico e, aparentemente, não existem razões a este nível que justifiquem o impedimento da utilização das soluções propostas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusões

Com base nos objetivos do presente trabalho, que incluíam a incorporação de uma percentagem significativa de materiais reutilizáveis, pode-se considerar que estes foram globalmente atingidos. Para além da incorporação de 50% de material fresado nas misturas, foram ainda introduzidos polímeros, que funcionam como modificadores do betume na produção de betumes regeneradores.

O estudo de betumes demonstrou que a utilização de polímeros pode ser efetivamente uma alternativa aos rejuvenescedores comerciais, no que se refere a misturas com elevadas taxas de reciclagem. A maior capacidade resiliente que os betumes regeneradores conferem ao ligante permite melhorar significativamente o comportamento deste nas temperaturas de serviço. Assim, um estudo de betumes demonstra ser uma ferramenta importante numa análise prévia à utilização de elevadas taxas de reciclagem em misturas betuminosas, pois permite prever o comportamento do ligante na produção, compactação e em serviço.

De um modo geral, no que se refere à produção das misturas betuminosas, verificou-se que os betumes regeneradores produzidos neste trabalho permitem melhorar a trabalhabilidade das misturas, garantindo melhor qualidade da mistura reciclada, no processo de compactação e consequentemente em serviço.

Relativamente ao fendilhamento por fadiga, a utilização dos betumes regeneradores permite aumentar significativamente esta propriedade em relação à mistura de referência. Por sua vez, ao comparar o desempenho das misturas M1, M3 e M4 (misturas produzidas com o betume modificado comercial, com o polímero SBS e com o polímero Regefalt, respetivamente), verifica-se que a vida à fadiga é idêntica para extensões elevadas. No entanto, à medida que estas vão diminuindo a mistura M1 revela maior capacidade de resistir à fadiga.

No que diz respeito ao módulo de rigidez, verifica-se que as misturas produzidas com os betumes regeneradores demonstram um comportamento menos sensível à variação da temperatura em serviço. Assim, para temperaturas elevadas e reduzida velocidade de passagem de veículos, as misturas apresentam maior módulo de rigidez relativamente à mistura de referência, o que explica a maior capacidade em resistir a fenómenos como a deformação permanente. Nas temperaturas baixas, e para uma frequência alta de passagem de veículos, as

misturas apresentam um módulo menor, o que pode melhorar a capacidade de resistir ao fendilhamento por fadiga das misturas com betumes regeneradores.

No que se refere ao ensaio de deformação permanente, as misturas M1, M3 e M4 apresentam melhor resultado do que a mistura de referência MR, como previsto pela avaliação do módulo de rigidez. A mistura M1 revela o melhor resultado em relação às misturas M3 e M4. Este resultado deve-se essencialmente às características diferenciadoras deste betume comercial em relação aos restantes betumes produzidos. Segundo o fabricante, a reação química na produção confere grande elasticidade, resistência ao envelhecimento, boa adesividade aos agregados e baixa suscetibilidade térmica.

Os ensaios de caracterização mecânica demonstram que, em geral, o desempenho das misturas que utilizam os betumes regeneradores apresentam melhores resultados em todos os parâmetros avaliados relativamente à mistura de referência com rejuvenescedor.

Na avaliação da resistência ao envelhecimento foi possível verificar a evolução das características dos ligantes após o fabrico das misturas. Desta forma foi possível concluir que o ligante BM3 é o que apresenta a menor variação no que se refere ao módulo complexo e ângulo de fase para as temperaturas de 20°C e 50°C o que demonstra não existir grandes alterações no que respeita ao comportamento deste ligante. O ligante BM4 é o que revela ter a menor capacidade para resistir ao envelhecimento provocado pelo fabrico, uma vez que demonstra o maior aumento das variações do módulo complexo e do ângulo de fase. Isto revela que o processo de modificação utilizado (a seco) demonstra não ser eficiente na alteração das características do ligante. Por sua vez o ligante de referência (BR), apesar de ter uma boa resistência ao envelhecimento, apresenta baixos valores dos módulos complexos (mesmo após o processo de fabrico), o que justifica a menor capacidade deste ligante em resistir à deformação permanente.

No que diz respeito à regeneração dos ligantes, através da avaliação dos índices de carbonilo e sulfóxido pelo espectro de FTIR, pode-se concluir que, o ligante BM3 (produzido com betume regenerador B4) é o que apresenta a maior redução do índice de carbonilo, resultado que é reforçado pela exposição ao processo de fabrico que resulta numa melhor interação do betume regenerador B4 (betume regenerador com SBS) com o betume B0 (betume envelhecido). Na avaliação dos índices de sulfóxido, verifica-se que o ligante BM3 também é o que apresenta menor valor quando comparado com os restantes ligantes, mesmo após o processo de fabrico.

Assim, tendo em consideração as características físicas, reológicas e químicas, o betume regenerador B4 (com SBS) é o que apresenta melhor capacidade para regenerar um betume envelhecido. Contudo, os restantes ligantes também permitem baixar os índices de carbonilo das misturas betuminosas, comparando este resultado com o betume envelhecido. Neste processo, também se pode concluir que o polímero reativo *Regefalt* não obteve os resultados que seriam espectáveis. Este facto pode ser explicado por ter sido utilizado um processo de introdução do polímero a seco na mistura do polímero, pelo que, de acordo com o fabricante, apenas é possível garantir o seu funcionamento em larga escala.

Do ponto de vista económico, o estudo permitiu concluir que não existem significativos obstáculos à utilização das soluções estudadas. A mistura reciclada com rejuvenescedores comerciais (MR) apresenta um custo inferior relativamente a uma mistura convencional. Desta maneira percebe-se claramente as vantagens económicas da utilização de elevadas percentagens de material fresado em relação às misturas convencionais. Ao comparar as misturas com os betumes regeneradores com polímeros (M1, M3 e M4) à mistura MR, verifica-se que todas elas apresentam um custo semelhante.

Considera-se que de uma forma geral os resultados obtidos neste trabalho trouxeram novas perspetivas no que respeita ao processo de regeneração dos betumes presentes no material fresado e na reciclagem de misturas betuminosas.

## 5.2. Trabalhos futuros

O trabalho que deu origem a esta dissertação de Mestrado permitiu desenvolver conhecimento novo num domínio que ainda não tinha sido muito explorado, o que claramente demonstra que há muito trabalho ainda a desenvolver para além do que aqui foi exposto. No entanto, apenas se vão apresentar os principais trabalhos a desenvolver a mais curto prazo.

No estudo de betumes desenvolvido neste trabalho, considerou-se uma percentagem 5,0% na produção de ligantes regeneradores, tendo em conta os trabalhos que vêm a ser desenvolvidos. No entanto, considera-se que nas misturas com elevadas percentagens de betume envelhecido pode ser estudada uma otimização da percentagem de polímero, de modo a potenciar o desempenho do ligante. Ainda no estudo, apenas foi utilizado o polímero virgem SBS, reciclado EVA e o reativo REG, pelo que se deve procurar usar outros tipos de resíduos plásticos que garantam o mesmo ou até melhor desempenho do que as misturas estudadas neste trabalho.

Deve-se ainda procurar produzir betumes regeneradores que promovam a utilização de sistemas mistos, de modo a tirar partido das vantagens que cada polímero pode oferecer.

O polímero EVA reciclado não foi alvo de avaliação das características mecânicas das misturas recicladas resultantes, uma vez que apenas se conseguia seguir o estudo de um dos polímeros utilizados no processo húmido. Os estudos preliminares indicam que este polímero apresenta potencial para ser alvo de estudos adicionais em misturas betuminosas com elevadas percentagens de material fresado.

Apesar de não terem sido conseguidos resultados que demonstrem o melhor funcionamento na regeneração de misturas recicladas, o copolímero *Regefalt* pode sempre ser utilizado através de outras técnicas de introdução, ou com outras percentagens diferentes das definidas pelo fabricante, por forma a explorar outras potencialidades deste polímero reativo.

A maior rigidez dos betumes regeneradores, na fase de produção das misturas betuminosas, implica um aumento da temperatura dos materiais. Assim, devem ser estudados meios por forma a reduzir as temperaturas de fabrico com a introdução de aditivos. O custo com o aditivo deve ser compensado por uma redução do custo energético relativo ao aquecimento dos materiais.

No âmbito da regeneração dos ligantes, apesar de se ter dado um importante passo na análise da regeneração através da avaliação dos índices espectroscópicos, é importante que se desenvolva mais trabalho no sentido de perceber a influência das condições de produção, fabrico e exposição dos ligantes na evolução dos índices, especialmente no índice de sulfóxido.

Deve ainda ser estudada a aplicabilidade desta tecnologia a outro tipo de misturas, onde sejam incorporadas diferentes taxas de material reciclado de modo a perceber a influência que a taxa de reciclagem tem no processo de regeneração e no desempenho das misturas com os betumes regeneradores estudados neste trabalho.

Por último, este trabalho só estará completo quando se garantir o sucesso desta nova tecnologia *in situ*, contribuindo para o empreendedorismo que é fundamental para o desenvolvimento de qualquer país.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, L., Oliveira, J., Palha, D., Fonseca, P. (2013a). *The Role of Rejuvenating Agents in the Recycling of Asphalt Mixtures*, 2nd International Conference - WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities, Braga.
- Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2013b). *Formulação e caracterização de ligantes numa mistura betuminosa com uma taxa de reciclagem elevada*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.
- Antunes, M.L. (2005). *Exigências funcionais e estruturais de pavimentos*, Ação de Formação: Conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários Fundação para a Formação Contínua em Engenharia Civil Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Novembro de 2005.
- APA (2006). *Resumo dos RSU 2006*, Disponível em: <http://www.wapambiente.pt/politicasambiente/Residuos/gestaoresiduos/RU/Documents/Resumo%20RSU%202006pdf>; Acedido em 29 de Janeiro de 2014
- Baptista, A.M.C. (2006). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central - Contribuição para o seu estudo e aplicação*, Universidade de Coimbra.
- Batista, A. (2006). *Misturas betuminosas recicladas a quente em central. Contribuição para o seu estudo e aplicação*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes da faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Batista, F.A. (2004). *Novas técnicas de reabilitação de pavimentos. Misturas betuminosas densas a frio*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2004), Porto, Portugal.
- Batista, F.A., Antunes, M.L., Marques, J.A. (2000). *Reutilização de materiais betuminosos fresados na reabilitação de pavimentos*, 1º Congresso Rodoviário Português, 28-30 Novembro, vol II, 689-702, Lisboa, Portugal.
- Batista, F.G.d.M.R. (2009). *Reabilitação de Pavimentos Flexíveis através de Reciclagem com Cimento*, Instituto Superior Técnico.
- Becker, Y.M., Maryro, P., Méndez, P.M., Rodríguez, Y. (2001). *Polymer Modified Asphalt*, Vision Tecnologia, Vol. 9, pp. 39-50.
- Becker, Y.M., Muller, A.J., Rodriguez, Y. (2003). *Use of Rheological Compatibility Criteria to Study SBS Modified Asphalts*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 90, pp. 1772-1782.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2005). *Pavimentos Rodoviários*, Coimbra.
- Brownridge, J. (2010). *The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation*, Compendium of Papers, the First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach, CA, April 13–15.

CEDEX (2001). *Seguimiento de la obra de reciclado en caliente en la carreta N-525 en la Provincia de ZAMORA*, Convenio de Estudio de las Técnicas de Reciclado de Firmes y Estabilización de Explanadas – Cedex 31-497-3-076.

CEPSA (2014). *Betumes Modificados*, Disponível em: [http://www.cepsa.com/cepsaPt/O\\_Que\\_Oferecemos/Produtos\\_Asfalticos/Produtos/Estrada\\_/Betumes/Betumes\\_Modificados/](http://www.cepsa.com/cepsaPt/O_Que_Oferecemos/Produtos_Asfalticos/Produtos/Estrada_/Betumes/Betumes_Modificados/); Acedido em 4 de outubro de 2014.

Costa, L., Fernandes, S., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M. (2013). *Valorização de resíduos plásticos na modificação de betumes para pavimentos rodoviários*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Costa, L.M.B. (2010). *Incorporação de Resíduos Plásticos em Misturas Betuminosas*, Universidade do Minho.

Costa, L.M.B. (2013). *Projeto de Tese - Estudo e Otimização de Ligantes Modificados e Misturas Betuminosas Inovadoras com Resíduos Plásticos*, Universidade do Minho.

Costa, M.S.d., Diogo, A.C. (2013). *Reciclagem a quente em central de misturas betuminosas na perspectiva da regeneração do betume*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

EAPA (1998). *Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas*, Tradução da APORBET Edição da European Asphalt Pavement Association (ISBN 90-801214-9-5), Breukelen, Holanda.

EAPA (2007). *Environmental Guidelines on Best Available Techniques for the Production of Asphalt Paving Mixes*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.

Especificação LNEC E 472 (2009). *Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Felipetto, E. (2003). *“Processamento de polímeros” Apresentação*. Pontifícia universidade católica do rio grande do sul. Faculdade de Engenharia, Disponível em: [http://www.tifnet.com.br/disciplinas/polimeros\\_aula\\_01.pdf](http://www.tifnet.com.br/disciplinas/polimeros_aula_01.pdf); Acedido em 28 de Maio 2014.

Ferreira, C.I.G. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*, Universidade do Minho.

FHWA (2009). *Polymer Modified Asphalt Emulsions*, Federal Highway Administration US DoT.

Fonseca, P. (2004). *Reciclagem se Pavimentos Rodoviários*, RECIPAV - Engenharia e Pavimentos, Lda. ed, RECIPAV - Engenharia e Pavimentos, Lda, Disponível em: <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>; Acedido em 17 de Fevereiro de 2014.

Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Abreu, L.P.F. (2013). *Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de Reciclagem*, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Fuentes-Audén, C., Sandoval, J.A., Jerez, A., Navarro, F.J., Martínez-Boza, F.J., Partal, P., Gallegos, C. (2008). *Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen*, Vol. 27 (8), pp. 1005-1012.

- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., González, O., Muñoz, M.E. (2004). *Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen*, Fuel, Vol. 83 (1), pp. 31-38.
- Gomes, L.F.D.S. (2005). *Reciclagem De Misturas Betuminosas a Quente em Central*, Universidade do Porto.
- Guimarães, M.F.M.S.C. (2012). *Regeneração de betumes no âmbito da reciclagem a quente em central*, Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico.
- Herrington, P.R., Ball, G.F.A. (1995). *Thermal decomposition o asphalt sulfoxides*, Fuel, Vol. 74, pp. 1232-1235.
- INIR (2011). *Construção e Reabilitação de Pavimentos - Reciclagem de Pavimentos*, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias.
- Isacson, U., Lu, X. (1998). *Bituminous binders and mixes*, State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design : report of RILEM Technical Committee 152-PBM, Performance of Bituminous Materials.
- Isacson, U., Lu, X. (1995). *Testing and appraisal of polymer modified road bitumens - state of the art*, Materials and Structures, Vol. 28, pp. 139-159.
- Johansson, L.S., Lu, X., Isacson, U. (1998). *Ageing of road bitumens*. State of de art, Department of Infrasstructure and Planning, Royal Institute of Technology.
- Lamontagne, J., Dumas, P., Mouillet, V., Kister, J. (2001). *Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens*, Fuel, Vol. 80 (4), pp. 483-488.
- López, E., Serrada, C.G., Martín, J.A., Cabezón, B.C. (2005). *La regeneración del betún envejecido de aglomerados usados una apuesta económico-ecológica* Carreteras, Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, ISSN 0212-6389, Nº. 148, 2006, págs. 48-67.
- Lucas, E., Soares, B., Monteiro, E. (2001). *Caraterização de Polímeros*, E-papers. Pag. 25-26
- Mahrez, A., Karim, M.R. (2003). *Rheological evalution of ageing properties of rubber crumb modified bitumen.*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, p. 820-833.
- Mantzos, L., Capros, P. (2006). *European energy and transport: trends to 2030: update 2005*. Belgium: European Commission.
- Martinho, F., Picado-Santos, L.G., Pais, J.C. (2004). *Reciclagem de pavimentos rodoviários - Selecção do processo construtivo*, 3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.
- Martinho, F.C.G. (2004). *Reciclagem de Pavimentos - Estado da Arte, Situação Portuguesa e Selecção do Processo Construtivo*, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra.
- Mckay, J.F., Wolf, J.M. (1992). *Infrared stydy of the aging of asphalts in contact with aggregates*, Fuel Sience and Technology International, Vol. 10, 4-6, pp. 935-951.

- Monismith, C.L. (1981). *Fatigue Characteristics of Asphalt Paving Mixtures and Their Use in Pavement Design*, Proceedings, 18th Paving Conference, University of New Mexico, Albuquerque, USA.
- Mota-Engil (2010). *Direcção de agregados*, Disponível em: [http://agregadosmota-engileu/indexphp?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=29](http://agregadosmota-engileu/indexphp?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=29); Acedido em 11 de Agosto de 2014.
- Palha, D., Fonseca, P., Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2013). *Solutions to improve the recycling rate and quality of plant produced hot mix asphalt*, 2nd International Conference - WASTES: solutions, treatments, opportunities, Braga.
- Palha, D., Fonseca, P., Guimarães, C., Abreu, L., Silva, H., Oliveira, J., Pereira, P. (2014). *Avaliação do desempenho de misturas betuminosas recicladas com elevadas taxas de material fresado*, 7º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Inhambane/Moçambique.
- Petersen, J.C. (1986). *Quantitative functional group analysis of asphalt using differential infrared spectrometry and selective chemical reactions - Theory and application*, Transportation Research Record 1096, Vol. 1-11.
- Petersen, J.C. (1998). *A dual Sequential mechanism for the oxidation of petroleum asphalts*, Petroleum Science and Technology, Vol. 16:9, pp. 1023-1959.
- PIARC (2002). *Guideline Hot Mix Asphalt Recycling in Plan*, World Road Association, 2002.
- ProbiGalp (2014). *Betumes Modificados*, Disponível em: [http://www.probigalp.pt/prod\\_item2\\_frame.php](http://www.probigalp.pt/prod_item2_frame.php); Acedido em 1 de Setembro de 2014.
- Robinson, H.L. (2005). *Polymers in asphalt*, United Kingdom: Smithers Rapra Technology ISSN: 0889\_3144.
- Shell (1991). *Shell Bitumen Handbook*, Shell Bitumen U. K., Chertsey.
- Shen, J., Amirkhanian, S., Miller, J.A. (2007). *Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement*, Journal of Materials in Civil Engineering.
- Sidney, H.G. (1998). *Handbook of thermoset plastics*, Second Edition, United States of America: Noyes Publications. ISBN-0-8155-1421-2.
- Silva, H., Oliveira, J.R.M., Peralta, E.J., Ferreira, C.I.G. (2009). *Evaluation of the rheological behaviour of Warm Mix Asphalt (WMA) modified binders*, 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials, Rhodes, GREECE, pp. 661-673.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G. (2012). *Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?*, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 60 (0), pp. 38-48.
- Vasudevan, R., Velkennedy, R., Ramalinga, A., Sekar, S., Sundarakannan, B. (2010). *Utilization of Waste Polymers for Flexible Pavement and Easy Disposal of Waste Polymers*, International Journal of Pavement Research and Technology Volume Issue 1: 34-42.

Whiteoak, D. (1991). *The Shell bitumen handbook*. Shell bitumen U.K., Chertsey.

WRAP (2004). *The Quality Protocol for the Production of Aggregates from Inert Waste*, Disponível em: <http://www.wrap.org.uk>; Acedido em 20 de Setembro de 2014.

Zhang, F., Yu, J., Han, J. (2011). *Effects of thermal oxidative ageing on dynamic viscosity, TG/DTG, DTA and FTIR of SBS- and SBS/sulfur-modified asphalts*, Construction and Building Materials, Vol. 25 (1), pp. 129-137.

Zoorob, S.E., Suparna, L.B. (2000). *Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)*, Cement & Concret Composites 22 (2000) 233-242.