



Edivaldo Anderson Ernesto Paciência

Licenciado em Engenharia Civil

**Auto-regeneração de misturas
betuminosas com agentes
encapsulados**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil
(Estruturas e Geotecnia)

Orientador: Doutor Rui Micaelo, Professor Auxiliar da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientadora: Doutora Ana Cristina Freire, Investigadora Auxiliar,
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Doutora Ildi Cismasiu

Arguente: Engenheiro Luís Quaresma

Vogal: Doutor Rui Micaelo



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio, 2018

Auto-regeneração de misturas betuminosas com agentes encapsulados

Copyright © Edivaldo Anderson Ernesto Paciência, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder a vida, saúde e por conceder a oportunidade de fazer o trabalho de fim de curso.

Este trabalho de investigação foi realizado com êxito graças ao apoio de entidades e pessoas, que merecem ser aludidas.

Ao meu orientador, Professor Doutor Rui Micaelo, pela inteira disponibilidade e acompanhamento no decorrer deste trabalho.

À minha orientadora Doutora Ana Cristina Freire por me acompanhar e me receber no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pela transmissão de conhecimentos na fase do programa experimental.

A toda equipa da Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transporte (UPAVMAT) do Departamento de Transportes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelo apoio e motivação incessante.

Às empresas Alves Ribeiro e Galp Energia pelo fornecimento dos materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas.

Ao Edgar Jacob e Irineth Salvador pelo apoio incansável em todos os momentos ao longo do curso. Um agradecimento especial à minha namorada, pelo apoio e por se fazer presente em todos os momentos.

Finalmente a minha família, a quem devo um especial agradecimento, pelo apoio em mais uma etapa da minha vida, amor, educação e por lutarem todos os dias por mim.

Resumo

Nos dias de hoje, os requisitos de qualidade das infraestruturas de transporte são elevados, e por isso é necessário uma constante monitorização do estado dos pavimentos. Da mesma forma é fundamental criar condições para prolongar a vida útil dos mesmos. O envelhecimento do betume está na base de vários tipos de degradações. A manutenção do pavimento ao longo do seu tempo de serviço é onerosa, sendo que uma das técnicas propostas para prolongar a vida útil dos pavimentos consiste na incorporação de rejuvenescedores na mistura betuminosa.

Esta dissertação tem como objetivo avaliar o efeito da incorporação de cápsulas de alginato de cálcio, contendo óleo de girassol, no comportamento mecânico e na capacidade de auto-regeneração de misturas betuminosas usadas em pavimentos rodoviários.

São estudadas misturas betuminosas, com incorporação de cápsulas e óleo de girassol. Avaliou-se a afinidade entre o betume – agregado modificado com cápsulas e óleo. Fabricaram-se provetes para o estudo da auto-regeneração da mistura betuminosa com o auxílio do compactador giratório. Realizaram-se ensaios de tração indireta para estudar o comportamento mecânico das amostras sujeitas a diferentes condições como tempo de repouso, temperatura e carga axial aplicada.

Os resultados dos ensaios de tração indireta permitiram avaliar o efeito das cápsulas de alginato de cálcio na mistura betuminosa. Compararam-se os resultados obtidos para as misturas betuminosas com cápsulas e com óleo de girassol, tendo apresentado um comportamento semelhante na capacidade auto-regenerativa. O ensaio de tração indireta induz um dano muito elevado nos provetes que não é recuperado durante o período de repouso. Considerou-se assim ser necessário identificar outros métodos de ensaio capazes de avaliar com mais eficácia o efeito da regeneração da mistura betuminosa com incorporação de cápsulas de alginato de cálcio.

Palavras Chave:

Cápsulas

Óleo de girassol

Rejuvenescedor

Regeneração

Abstract

Nowadays, the quality requirements for the transport infrastructures are higher. This mean that continuous monitoring of the road condition is mandatory. In addition, it is necessary to extend the life cycle of the pavement materials to require less expensive interventions. Ageing of bitumen is one of the causes for several pavement distresses. To solve this issue, it has been proposed to incorporate rejuvenators in asphalt mixture.

This objective of this dissertation was to evaluate the effect of alginate capsules, containing sunflower oil, on the mechanical behavior and self-healing ability of asphalt mixtures.

One asphalt mixture with added capsules and sunflower oil was studied. In addition, it was analyzed the affinity between the aggregate and the bitumen with both additives. The specimens for the experiments were compacted with the gyratory compactor. The mechanical behavior and self-healing study is based on the indirect tensile test. Different test conditions were used.

The indirect tensile test results showed the effect of adding alginate capsules to the asphalt mixture. The self-healing index of the asphalt mixture with capsules and with oil were similar. This mechanical test induces a high damage level that is not healed during the rest time. It was concluded that other mechanical tests should be studied to further evaluate the self-healing ability provided by these capsules.

Key-words:

Capsules

Sunflower oil

Rejuvenators

Self-Healing

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Estrutura da dissertação..... | 3 |
| 2. Revisão da literatura..... | 5 |
| 2.1. Pavimentos flexíveis e degradações | 5 |
| 2.1.1. Conceitos gerais de pavimentos..... | 5 |
| 2.1.2. Degradações..... | 7 |
| 2.1.2.1. Fendilhamento | 8 |
| 2.1.2.2. Deformações..... | 10 |
| 2.1.2.3. Degradação da camada de desgaste..... | 12 |
| 2.1.2.4. Movimento dos materiais | 13 |
| 2.2. Manutenção e reabilitação de pavimentos | 15 |
| 2.2.1. Medidas de conservação..... | 16 |
| 2.2.2. Medidas de reabilitação | 17 |
| 2.3. Auto-regeneração..... | 17 |
| 2.3.1. Aquecimento por indução de misturas betuminosas..... | 18 |
| 2.3.2. Misturas betuminosas com agentes encapsulados | 24 |
| 3. Programa experimental..... | 41 |
| 3.1. Introdução..... | 41 |
| 3.2. Materiais | 41 |
| 3.2.1. Betume | 41 |
| 3.2.2. Agregados..... | 42 |
| 3.2.3. Cápsulas..... | 43 |
| 3.2.4. Fabrico e compactação de misturas betuminosas | 44 |
| 3.3. Ensaio laboratoriais | 51 |
| 3.3.1. Adesividade | 51 |
| 3.3.2. Propriedades volumétricas dos provetes..... | 54 |
| 3.3.3. Ensaio mecânico – Ensaio de tração indireta..... | 55 |
| 4. Resultados e Discussão..... | 61 |
| 4.1. Considerações gerais..... | 61 |
| 4.2. Avaliação da adesividade agregado – ligante..... | 61 |
| 4.3. Propriedades volumétricas dos provetes..... | 62 |
| 4.4. Ensaio mecânico – Ensaio de tração indireta..... | 63 |
| 4.4.1. Método I..... | 63 |
| 4.4.2. Método II..... | 69 |
| 4.4.2.1. Deformação inicial..... | 72 |
| 4.4.2.2. Tempo de repouso após o primeiro ensaio de tração indireta | 73 |
| 4.4.2.3. Carga axial aplicada após o primeiro ensaio de tração indireta..... | 77 |

| | |
|--|------------|
| 4.4.2.4. Temperatura de ensaio..... | 82 |
| 5. Conclusão e Desenvolvimentos futuros..... | 87 |
| 5.1. Conclusão..... | 87 |
| 5.2. Desenvolvimentos futuros..... | 89 |
| Referências bibliográficas | 91 |
| Documentos normativos | 95 |
| Anexo A - Ficha técnica do betume 35/50..... | 97 |
| Anexo B – Resultados da afinidade entre o agregado e o betume | 99 |
| Anexo C – Propriedades volumétricas dos provetes..... | 101 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1- Estrutura tipo de um pavimento rodoviário e ações | 6 |
| Figura 2.2- Fendas longitudinais ramificadas com perda de material e acompanhada de deformações (nível 3)..... | 9 |
| Figura 2.3- Fendas transversais ramificada e com abertura entre 2 a 4 mm (Nível 2)..... | 9 |
| Figura 2.4- Pele de crocodilo com malha inferior a 40 cm(Nível 3)..... | 10 |
| Figura 2.5- Deformações localizadas com diferença de nível superior a 30 mm (Nível 3)..... | 11 |
| Figura 2.6- Rodeiras com profundidade maior que 30 mm (nível 3)..... | 11 |
| Figura 2.7- Desagregações superficiais com altura entre 30 cm e 100 cm (Nível 2)..... | 12 |
| Figura 2.8- Peladas com largura entre 30 cm e 100 cm (Nível 2)..... | 13 |
| Figura 2.9- Ninhos coma profundidade da cavidade entre 2 e 4 cm (Nível 2) | 13 |
| Figura 2.10- Exsudação de betume com largura superior a 100 cm (Nível 3)..... | 14 |
| Figura 2.11- Subida de finos apenas presentes nos bordos das fendas (Nível 1 à esquerda) e abrangendo a zona de passagem dos pneus (Nível 2 à direita)..... | 14 |
| Figura 2.12- Evolução do estado do tempo e do tempo do útil de vida do pavimento..... | 15 |
| Figura 2.13- Constantes térmicas de misturas betuminosas com diferentes tipos de fibras metálicas | 19 |
| Figura 2.14- Ensaio de resistência à fadiga em provetes MBT e MBQ | 20 |
| Figura 2.15- bobine geradora do aquecimento por indução | 21 |
| Figura 2.16- Imagem infravermelho de um provete após o aquecimento | 21 |
| Figura 2.17- Velocidade do aquecimento por indução com diferentes distâncias entre a bobine e o provete de MBT | 22 |
| Figura 2.18- Velocidade do aquecimento por indução com diferentes distâncias entre a bobine e o provete de MBQ | 22 |
| Figura 2.19- Taxa de regeneração por indução de provetes MBT e MBQ em diferentes temperaturas de aquecimento..... | 23 |
| Figura 2.20- Cápsulas (Grupo I, Grupo II, Grupo III)..... | 25 |
| Figura 2.21- Resultados do ensaio mecânico: (a) Variação da carga e da deformação; (b) Deformação vertical acumulada..... | 25 |
| Figura 2.22- Tamanho médio (a) e força de compressão das cápsulas (b)..... | 26 |
| Figura 2.23- Resultado do ensaio de análise gravimétrica: Cápsulas (a); Componentes básicos das cápsulas (b)..... | 26 |
| Figura 2.24- Tomografia computadorizada da secção transversal do provete com cápsula do grupo II (a) e do grupo III (b)..... | 27 |
| Figura 2.25- Variação da rigidez k (a) e da deformação permanente d (b) com carga cíclica da mistura betuminosa com e sem cápsulas..... | 28 |
| Figura 2.26- Variação da rigidez em relação ao tempo de repouso em provetes sem cápsulas (a) e com cápsulas (b) | 29 |
| Figura 2.27- Variação da deformação em relação ao tempo de repouso em provetes sem cápsulas (a) e com cápsulas e com cápsulas (b)..... | 29 |
| Figura 2.28- Número de ciclos até a rotura para diferentes tipos de misturas betuminosas (a) e máxima tensão horizontal..... | 31 |
| Figura 2.29- Esquema do ensaio de fissura - regeneração aplicado a uma laje..... | 32 |
| Figura 2.30- Variação da taxa de regeneração como o tempo | 32 |
| Figura 2.31- Configuração de viga em fundação elástica (BOEF) aplicado para medir a fissura e o comportamento de regeneração do betume, (a) Ilustração do modelo de ensaio, (b) Ranhura a meio vão da viga, (c) Dimensões da peça de alumínio, (d) Dimensões do bloco de betume, (e) Secção transversal da peça de alumínio e de betume, (f) Dimensões da ranhura no betume | 33 |
| Figura 2.32- Morfologia das cápsulas contendo rejuvenescedores sob diferentes temperaturas (a) 180 °C, (b) 200 °C, (c) 220 °C, e (d) 240 °C..... | 34 |
| Figura 2.33- Microcápsulas distribuídas de forma homogénea no betume mantendo a sua forma original | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.34- Curvas de carga – deslocamento do ensaio BOEF a 0°C (a) e 25°C (b) para os ciclos de regeneração e betume envelhecido (① primeiro ciclo, ② segundo ciclo, ③ terceiro ciclo, betume envelhecido e ⑤ quarto ciclo)..... | 36 |
| Figura 2.35- Tempo de regeneração e ciclo de cura..... | 37 |
| Figura 2.36- Análise da secção transversal da fibra com a taxa de rejuvenescedor/ alginato (70:30). (a) Imagem ESEM da secção transversal da fibra. (b) Parede e espessura do compartimento da fibra | 39 |
| Figura 2.37- Efeito das fibras na rigidez da mistura de asfalto..... | 39 |
| Figura 2.38- Efeito das fibras na resistência da mistura de asfalto | 40 |
| Figura 3.1- Composição da mistura de agregados (Frações de calcário e filer) | 43 |
| Figura 3.2- Cápsulas de alginato de cálcio contendo óleo de girassol | 43 |
| Figura 3.3- Preparação da quantidade de cápsulas para o fabrico de cada provete..... | 44 |
| Figura 3.4- Curvas granulométricas das frações da mistura..... | 45 |
| Figura 3.5- Curva granulométrica da mistura de agregados | 46 |
| Figura 3.6- Compactador giratório Troxler Electronic..... | 48 |
| Figura 3.7- Diagrama do movimento de compactação do provete (EN 12697-31) | 49 |
| Figura 3.8- Fases do processo de fabrico da mistura betuminosa com cápsulas de alginato de cálcio | 50 |
| Figura 3.9- Provete cilíndrico com cápsulas de alginato de cálcio com 100mm de altura e 50mm de diâmetro | 50 |
| Figura 3.10- Ensaio laboratoriais do programa experimental | 51 |
| Figura 3.11- Ensaio de adesividade – Garrafas em rolamento | 53 |
| Figura 3.12- Ensaio de adesividade – Agregados com óleo, antes (A) e após 72h (B) de rolamento | 53 |
| Figura 3.13- Ensaio de adesividade – Agregados com cápsulas, após 72h de rolamento | 54 |
| Figura 3.14- Determinação da baridade dos provetes com e sem cápsulas | 55 |
| Figura 3.15- Ensaio de tração indireta do provete cilíndrico..... | 58 |
| Figura 3.16- Estabilómetro para o ensaio Marshall | 58 |
| Figura 3.17- Sequência do ensaio de tração indireta e regeneração das misturas betuminosas.. | 59 |
| Figura 4.1- Afinidade entre o agregado, betume contendo cápsulas ou óleo | 61 |
| Figura 4.2- Ensaio ITS, $\delta \geq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, MBO (Método I)..... | 65 |
| Figura 4.3- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, MBO (Método I)..... | 66 |
| Figura 4.4- Ensaio ITS, $\delta \leq 3\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, MBO (Método I)..... | 66 |
| Figura 4.5- Ensaio ITS com diferentes níveis de dano, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, MBO (Método I)..... | 67 |
| Figura 4.6- Provete 6 MBO, nível de dano $\geq 100\%$ (2ºITS) | 68 |
| Figura 4.7- Provete 10 MBO, nível de dano $\leq 75\%$ (2º ITS) | 69 |
| Figura 4.8- Ensaio ITS, deformação inicial, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 5kN, MBC e MBO (Método II) | 72 |
| Figura 4.9- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, carga de 5kN, MBC (Método II) | 74 |
| Figura 4.10- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, carga de 5kN, MBO (Método II) | 74 |
| Figura 4.11- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 5kN, MBC (Método II)..... | 74 |
| Figura 4.12- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 5kN, MBO (Método II) | 74 |
| Figura 4.13- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 5kN, MB (Método II)..... | 75 |
| Figura 4.14- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 96h, carga de 5kN, MBC (Método II) | 75 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.15- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 96h, carga de 5kN, MBO (Método II) | 75 |
| Figura 4.16- Tempo de repouso (24h, 72h, 96h): Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20° , carga de 5kN, MBC, MBO e MB (Método II)..... | 76 |
| Figura 4.17- Tempo de repouso (24h, 72h, 96h): Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C , carga de 5kN, MBC, MBO e MB (Método II)..... | 77 |
| Figura 4.18- Carga axial aplicada aos provetes | 78 |
| Figura 4.19- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 7,5kN, MBC (Método II)..... | 79 |
| Figura 4.20- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 7,5kN, MBO (Método II) | 79 |
| Figura 4.21- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 10kN, MBC (Método II)..... | 79 |
| Figura 4.22- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 10kN, MBO (Método II) | 79 |
| Figura 4.23- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, sem aplicação de carga axial, MBC (Método II) | 80 |
| Figura 4.24- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, sem aplicação de carga axial, MBO (Método II) | 80 |
| Figura 4.25- Carga axial (0kN, 5kN, 7,5kN e 10kN) e Força média: Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)..... | 81 |
| Figura 4.26- Carga axial (0kN, 5kN, 7,5kN e 10kN) e Recuperação: Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)..... | 81 |
| Figura 4.27- Força média e Recuperação (sem carga, 5kN, 7,5kN e 10kN): Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)..... | 82 |
| Figura 4.28- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 10°C e tempo de repouso de 72h, carga axial de 10kN, MBC (Método II)..... | 83 |
| Figura 4.29- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$, temperatura de 10°C e tempo de repouso de 72h, carga axial de 10kN, MBO (Método II) | 83 |
| Figura 4.30- Ensaio ITS, $\delta \leq 3\text{mm}$, temperatura de -14°C e tempo de repouso de 72h, carga axial de 10kN, MBC (Método II)..... | 83 |
| Figura 4.31- Ensaio ITS, $\delta \leq 3\text{mm}$, temperatura de -14°C e tempo de repouso de 72h, carga axial de 10kN, MBO (Método II)..... | 83 |
| Figura 4.32- Temperatura (-14°C , 10°C e 20°C) e Força média: Ensaio ITS, tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)..... | 84 |
| Figura 4.33- Temperatura (-14°C , 10°C e 20°C) e Recuperação: Ensaio ITS, tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II) | 85 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1- Tipos de intervenção para medidas de conservação | 16 |
| Tabela 3.1- Características do betume 35/50..... | 42 |
| Tabela 3.2- Propriedades das cápsulas de alginato de cálcio..... | 44 |
| Tabela 3.3- Características da mistura betuminosa a partir do estudo Marshall..... | 46 |
| Tabela 3.4- Quantidades da mistura betuminosa com cápsulas..... | 47 |
| Tabela 3.5- Quantidades da mistura betuminosa com óleo | 47 |
| Tabela 3.6- Quantidades da mistura betuminosa | 47 |
| Tabela 3.7- Quantidades da mistura betuminosa para ensaio de adesividade..... | 52 |
| Tabela 4.1- Valores médios, mínimos e máximos das propriedades volumétricas dos provetes | 62 |
| Tabela 4.2- Método I- Resultados gerais do ensaio ITS, temperatura 20°C, tempo de repouso de 24h - MBO..... | 64 |
| Tabela 4.3- - Método II- Resultados gerais do ensaio ITS, MBC..... | 70 |
| Tabela 4.4- Método II- Resultados gerais do ensaio ITS, MB e MBO | 71 |
| Tabela B.1- Resultados da afinidade entre o agregado e betume..... | 99 |
| Tabela C.1- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 5 – 9)..... | 101 |
| Tabela C.2- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 10 – 14)..... | 101 |
| Tabela C.3- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 15 – 19)..... | 101 |
| Tabela C.4- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 20 – 22, 21A, 23A)..... | 102 |
| Tabela C.5- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 25A, 26, 30 – 32)..... | 102 |
| Tabela C.6- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 33 – 37)..... | 102 |
| Tabela C.7- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 38 – 42)..... | 103 |
| Tabela C.8- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 43 – 47)..... | 103 |
| Tabela C.9- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 48 – 52)..... | 103 |
| Tabela C.10- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 53 – 57)..... | 104 |
| Tabela C.11- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 58 – 62)..... | 104 |
| Tabela C.12- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 63 – 67)..... | 104 |
| Tabela C.13- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 68 – 72)..... | 105 |
| Tabela C.14- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 73 – 77)..... | 105 |
| Tabela C.15- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 78 – 83)..... | 105 |
| Tabela C.16- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 84 – 88)..... | 106 |
| Tabela C.17- Propriedades volumétricas dos provetes (MB 1 – 3)..... | 106 |
| Tabela C.18- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 1C – 5C)..... | 106 |
| Tabela C.19- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 6C – 10C)..... | 107 |
| Tabela C.20- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 11C – 15C)..... | 107 |
| Tabela C.21- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 16C – 20C)..... | 107 |
| Tabela C.22- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 21C – 25C)..... | 108 |
| Tabela C.23- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 26C – 33C)..... | 108 |
| Tabela C.24- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 34C – 38C)..... | 108 |
| Tabela C.25- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 39C – 43C)..... | 109 |
| Tabela C.26- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 44C – 48C)..... | 109 |
| Tabela C.27- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 49C, 50C)..... | 109 |

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A rede rodoviária, representa uma das infraestruturas mais importantes para o desenvolvimento de um país. Portugal possui neste momento uma vasta rede rodoviária, na sua maioria constituída com pavimentos do tipo flexível que requerem ações frequentes de manutenção e reabilitação durante o período de vida útil dos mesmos. É necessário garantir níveis elevados de circulação com conforto e segurança. Do ponto de vista macroeconómico a questão da manutenção e reabilitação das infraestruturas rodoviárias merece a maior atenção devido as restrições orçamentais que não permitem alocar os fundos necessários para a mesma. Nos dias de hoje, os padrões de exigência de qualidade são maiores, e por isso é necessário uma constante monitorização do estado dos pavimentos. Da mesma forma é necessário criar condições para prolongar a vida útil dos mesmos.

As condições climáticas e de tráfego no tempo de serviço do pavimento são fatores que provocam o envelhecimento da mistura betuminosa (Aurstad *et al.*, 2016). Ao longo do tempo, a rigidez da mistura betuminosa aumenta e a capacidade de relaxação diminui, o ligante torna-se mais frágil surgindo deste modo microfendas. Por fim aparecem fendas entre o agregado e o betume (García, Schlangen e Ven, Van De, 2011; Su, Schlangen e Wang, 2015).

O envelhecimento da mistura betuminosa leva ao aumento da rigidez e conseqüentemente à mudança nas propriedades físico-químicas como a ductilidade e adesão do ligante, comprometendo deste modo o desempenho do betume e posteriormente da mistura betuminosa. Os principais sinais de envelhecimento da mistura betuminosa são a oxidação, evaporação, exsudação e a rigidez (Karlsson e Isacsson, 2006).

Segundo Lu e Isacsson (Lu e Isacsson, 2002), ao longo do processo de envelhecimento oxidativo da mistura betuminosa, as resinas (maltenos) transformam-se em asfaltenos e os aromáticos convertem-se em resinas e estas por fim oxidam e transformam-se em asfaltenos. Deste modo, aumenta a percentagem de asfaltenos, resultando numa maior rigidez do pavimento.

O envelhecimento do betume está na base de vários tipos de degradações. A manutenção do pavimento ao longo do seu tempo de serviço é onerosa. Uma das técnicas propostas consiste na aplicação de rejuvenescedores à superfície para retardar e/ou renovar o pavimento envelhecido (Su, Schlangen e Wang, 2015).

Na literatura é referido que a mistura betuminosa é um material que tem capacidade de regeneração sem ação externa. De modo que, quando surge uma fissura no pavimento é possível que esta fissura possa ser fechada mas para que tal aconteça é necessário que o pavimento atinja uma temperatura mínima, 20°C a 70°C, (García *et al.*, 2013) e tempo suficiente sem tráfego, tornando assim reduzida a sua eficácia prática (Garcia, Jelfs e Austin, 2015). Sendo assim, neste trabalho pretende-se

tirar maior proveito desta característica do betume, acelerando e estimulando a sua capacidade de regeneração com a adição de agentes rejuvenescedores encapsulados.

O fenómeno de regeneração ou auto-regeneração da mistura betuminosa foi divulgado pela primeira vez em 1960 (Bazin e Saunier, 1967). Diversos autores têm abordado que a regeneração do pavimento é influenciada pela viscosidade do betume (betumes com baixa viscosidade, aceleram o processo de regeneração) (García, Schlangen e Ven, Van De, 2011; Pauli, 2014), composição química do betume (betumes de diferentes origens apresentam diferentes composições e diferentes propriedades de regeneração) (Apegyei, Grenfell e Airey, 2014; García, Schlangen e Ven, Van De, 2011), densidade do conjunto de agregados (misturas menos densas e com maior quantidade de betume apresentam melhores propriedades de regeneração) (Bhairampally, Lytton e Little, 2000; García, Schlangen e Ven, Van De, 2011).

Ao longo de vários anos foram propostos diversos materiais com o fim de alterar as propriedades dos betumes envelhecidos, sendo referidos na literatura como recuperadores, agentes de reciclagem, modificadores ou agentes de amolecimento, modificadores de reciclagem, rejuvenescedores, óleos aromáticos (Karlsson e Isacson, 2006). Karlsson e Isacson (Karlsson e Isacson, 2006) diferenciaram os métodos regenerativos em *softening agents* e *rejuvenating agents*. Os agentes de amolecimento (*softening agents*) são usados para baixar simplesmente a viscosidade do betume envelhecido e os rejuvenescedores (*rejuvenating agents*) tem o propósito de restaurar as propriedades físicas e química das misturas betuminosas (García, Schlangen e Ven, Van De, 2011; Karlsson e Isacson, 2006). Contudo, existem algumas confusões em ambas terminologias nos diversos autores, encontrando deste modo alguns autores a chamarem de rejuvenescedores a produtos que apenas baixam a viscosidade do betume.

Os rejuvenescedores são constituídos por óleos lubrificantes com elevada proporção de constituintes de malteno (Asli *et al.*, 2012). Quando espalhado sobre a superfície do pavimento apresentam alguma dificuldade em penetrar e causam redução do atrito na interface pneu-pavimento. Deste modo, quando são aplicados é necessário encerrar a estrada ou o espaço em que foi colocado o material por algum tempo. Saliente-se também que os rejuvenescedores podem ser nocivos ao ambiente (Asli *et al.*, 2012; Garcia, Austin e Jelfs, 2016; García, Schlangen e Ven, Van De, 2011; Shen, Amirkhanian e Aune Miller, 2007; Su, Schlangen e Wang, 2015).

De modo a resolver este problema, surgem então os rejuvenescedores encapsulados que são aplicados durante o processo de fabrico da mistura betuminosa. Quando aparecem fissuras no pavimento estas cápsulas rompem e libertam o rejuvenescedor, fazendo com que o pavimento recupere parcialmente o seu estado inicial, ou seja, regenera-se (García, Schlangen e Ven, Van De, 2011; Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016). A incorporação de agentes com vista a promover a auto-regeneração dos pavimentos rodoviários apresenta-se como uma mais-valia ao comportamento e prolongamento da vida útil das infraestruturas rodoviárias.

O presente documento investiga o efeito de cápsulas contendo regenerador em misturas betuminosas. O regenerador em causa é o óleo de girassol e o material usado para o encapsulamento foi o cálcio-alginato (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016). Estas cápsulas, são colocadas durante o processo de fabrico da mistura betuminosa e resistem às condições em que são feitas as misturas.

Considera-se que estas cápsulas são simples de serem fabricadas, sendo que o processo funciona da seguinte maneira: à temperatura ambiente o regenerador é envolvido por uma estrutura polimérica feita de cálcio-alginato. Esta cápsula resulta da reação do alginato de sódio com os íons de cálcio construindo por sua vez uma estrutura porosa, conhecida como “egg-box” (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016; Mookhoek, Fischer e Zwaag, Van Der, 2012).

Os componentes químicos e as propriedades das cápsulas estão explicitados na secção 3.

As cápsulas contendo óleo de girassol, estão no grupo dos agentes de amolecimento e têm o papel de baixar a viscosidade da mistura tornando-a deste modo, menos rígida porém menos propensa a gerar fissuras (Garcia, Austin e Jelfs, 2016).

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação é avaliar o efeito da incorporação de cápsulas de cálcio-alginato, contendo óleo de girassol, no comportamento mecânico e na capacidade de auto-regeneração de misturas betuminosas usadas em pavimentos rodoviários.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente documento está organizado em 5 capítulos em que são apresentados os aspetos fundamentais para a exposição e compreensão dos objetivos apresentados.

No capítulo 1 faz-se um enquadramento do tema bem como a apresentação dos objetivos deste documento. Pretende-se compreender em como os agentes regeneradores podem combater contra o envelhecimento das misturas betuminosas.

No capítulo 2 faz-se uma breve revisão dos conhecimentos acerca das degradações que existem nos pavimentos flexíveis e sobre as medidas de conservação e reabilitação dos pavimentos. Abordou-se acerca de alguns dos métodos regenerativos existentes *in situ* e sobre as misturas betuminosas com agentes encapsulados.

No capítulo 3 apresentam-se algumas considerações sobre os materiais utilizados no programa experimental bem como a metodologia de compactação das misturas betuminosas. São apresentados também os diferentes ensaios usados no programa experimental e uma breve descrição dos mesmos.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados do ensaio das características da mistura betuminosa. Expõem-se também os resultados do ensaio de tração indireta em diferentes condições de ensaio.

Finalmente, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões sobre os resultados e são sugeridas algumas ideias para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. Revisão da literatura

2.1. Pavimentos flexíveis e degradações

2.1.1. Conceitos gerais de pavimentos

Um pavimento rodoviário é constituído por várias camadas de diferentes espessuras, colocadas sobre uma plataforma de suporte, sendo esta constituída pelo leito do pavimento e pelo solo de fundação. Caso o solo de fundação apresente características resistentes que cumpram os requisitos necessário para a estrutura de pavimento, a camada de leito de pavimento poderá não ser uma camada diferenciada da camada de fundação, passando este a ser parte integrante da mesma. Contudo, caso as propriedades do material existente no local não cumpram os requisitos, para esta camada poderá ser utilizado um solo selecionado de melhores características ou mesmo ser aplicada uma solução de tratamento de solo com ligantes, de um modo geral hidráulicos.

O pavimento rodoviário é submetido a ações devidas ao tráfego, pelas cargas transmitidas pela passagem dos rodados dos veículos, ao clima, pelos gradientes térmicos que provocam as variações da temperatura dos materiais das várias camadas, com maiores efeitos nas camadas betuminosas e à ação da água (Pereira e Miranda, 1999).

De um modo sintetizado, tal como mostra a Figura 2.1, o pavimento é constituído por um conjunto de camadas ligadas, constituídas por agregados estabilizados com material ligante (betuminoso ou hidráulico) que por sua vez são colocados na parte superior do pavimento e por camadas granulares, constituídas, em geral, por agregados não ligados, que são colocados na parte inferior do pavimento (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011).

As camadas por sua vez estão divididas em camada superficial (camada de desgaste) e o corpo do pavimento. A camada superficial tem a função de garantir a segurança e o conforto na circulação bem como a capacidade de impermeabilizar o pavimento, de modo a que não haja entrada de água do exterior para as camadas subjacentes.

O corpo do pavimento tem o papel fundamental de suportar as cargas proporcionadas pelo tráfego e é constituído por camadas estabilizadas com ligante (betuminoso ou hidráulico) e por camadas granulares não ligadas. As camadas ligadas são mais coesas e resistem aos esforços de compressão, tração e corte e as camadas não ligadas, que fazem parte do corpo do pavimento, resistem apenas aos esforços de compressão e de corte, tal como mostra a Figura 2.1. As tensões induzidas ao pavimento pela passagem dos rodados dos veículos reduzem-se em profundidade, ou seja, à medida em que se caminha para as camadas granulares. Cada camada tem também o papel de servir de apoio à camada sobrejacente. Deste modo, no caso das camadas betuminosas, a camada de desgaste está assente sobre a camada de regularização. A seguir encontra-se a camada de base e a camada de sub-base, esta última

está assente diretamente sobre a fundação, podendo esta ser de solo tratado com cimento ou então o mais comum ser construída por materiais granulares estabilizados mecanicamente apenas por compactação (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; Ledo dos Santos, 2009).

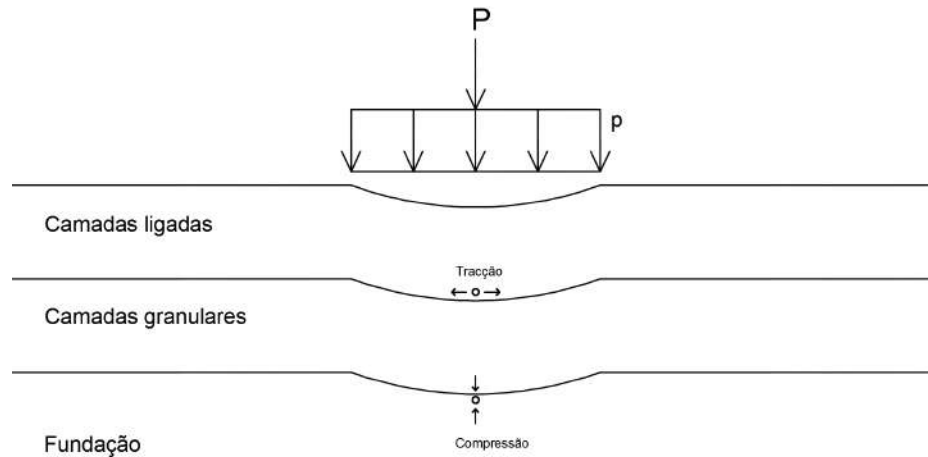


Figura 2.1- Estrutura tipo de um pavimento rodoviário e ações (adaptado de (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011))

A constituição das camadas define o tipo de pavimento, sendo que existem três tipos de pavimentos que se diferenciam, nomeadamente pavimento rígido, semi-rígido e flexível.

Os pavimentos rígidos são constituídos por uma camada de ligante hidráulico (betão de cimento), na camada superior, e por uma ou duas camadas de material granular ou de agregado estabilizado com material hidráulico nas camadas inferiores (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011).

Os pavimentos semi-rígidos, são constituídos por uma ou duas camadas de mistura betuminosa nas camadas superiores e uma de agregado estabilizado com material hidráulico (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011).

Os pavimentos flexíveis são constituídos por misturas betuminosas nas camadas superiores e por material granular ou material granular estabilizado com ligante hidráulico nas camadas inferiores, sendo as últimas mais espessas que as primeiras. Este tipo de pavimento é mais deformável quando comparado com os outros tipos de pavimentos sendo o mais usado em Portugal (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; Minhoto, 2005).

O dimensionamento de um pavimento tem como base a resistência do solo de fundação, as características dos materiais e a intensidade do tráfego (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011). O comportamento estrutural depende da qualidade dos materiais e das respetivas camadas que constituem o pavimento.

Devido à intensidade do tráfego e à ação dos agentes atmosféricos, o pavimento vai-se degradando entrando deste modo em níveis mínimos de serviço e posteriormente poderá atingir níveis em que os critérios mínimos estruturais não são satisfeitos.

2.1.2. Degradações

Ao longo da vida útil do pavimento surgem diversas degradações que comprometem a qualidade do pavimento. Uma degradação não evolui isoladamente no tempo, originando outras novas, que por sua vez interferem com as características das primeiras. A este ciclo de degradações dá-se o nome de “princípio da cadeia de consequências” (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011). O processo de degradação do pavimento depende de dois fatores (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011):

- Fatores passivos (materiais utilizados, espessura das camadas, qualidade da obra);
- Fatores ativos (ações do tráfego e dos agentes climáticos).

Em países com climas mais frios o pavimento pode estar sujeito a temperaturas mais baixas o que leva a um aumento de rigidez da mistura betuminosa tornando-a mais frágil, podendo apresentar consequentemente fissuras por retração. Estas fissuras causadas pelo ciclo de gelo e degelo, permitem a entrada de água no corpo do pavimento, atendendo que esta pode expandir ou contrair. A expansão da água, na fase de gelo, nas camadas subjacentes permite que estas tenham um movimento ascendente que por sua vez resulta em fendilhamento da camada superficial (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; Lima da Silva, 2013).

Em países com clima mais quente, onde a mistura betuminosa está submetida a temperaturas mais elevadas, o pavimento pode apresentar deformações plásticas.

A presença de água no pavimento pode provocar a lavagem dos finos, colocando em causa a integridade do mesmo, nomeadamente o atrito interno dos agregados (solo de fundação e camadas granulares). Por essa razão é necessário garantir que a camada de desgaste impeça o máximo possível a entrada de água nas camadas subjacentes.

O tráfego vai degradando o pavimento no decorrer do tempo, pois é aplicado sobre ele cargas cíclicas causando desta forma deformações constantes, ou seja, assentamento do pavimento.

Assim, em pavimentos flexíveis as degradações mais significativas são as deformações permanentes e o fendilhamento por fadiga.

De uma forma geral, os pavimentos podem apresentar as seguintes degradações (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; Lima da Silva, 2013; Pereira e Miranda, 1999):

- Fendilhamento;
- Deformações;
- Desagregação de camadas de desgaste;
- Movimento de materiais;
- Reparações.

Estas degradações podem ser ainda discriminadas nos seguintes tipos:

- Tipos de fendilhamentos
 - Fendas (Fadiga, longitudinais, transversais, parabólicas)
 - Pele de crocodilo (malha fina e malha larga)

- Tipos de deformações:
 - Deformações localizadas
 - Rodeiras
 - Ondulação
 - Abatimento (longitudinal e transversal)

- Tipos de desagregações da camada de desgaste:
 - Desagregações superficiais
 - Cabeça de gato
 - Pelada
 - Ninhos (covas)

- Tipos de movimento de materiais
 - Exsudação
 - Subida de finos

2.1.2.1. Fendilhamento

Um dos primeiros sinais da perda de qualidade estrutural dos pavimentos flexíveis é o aparecimento de fendas, sendo estas um dos principais tipos de degradação que os pavimentos apresentam. Normalmente surgem por fadiga dos materiais das camadas betuminosas, devido à solicitação exaustiva dos esforços de tração por flexão das camadas, provocados pelo tráfego, evolução de defeitos de construção e ação térmica (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; Ledo dos Santos, 2009).

Os vários tipos de degradação apresentados na família dos fendilhamentos são distinguidos quanto à localização, origem e evolução de outras degradações.

As fendas por fadiga do pavimento provenientes das tensões de tração repetidas causadas pelas cargas dos pneus dos veículos são as mais comuns. Podem ser isoladas ou ramificadas e conforme o afastamento dos seus bordos podem ser fechadas ou abertas. Normalmente as fendas na sua fase inicial são isoladas e formam-se no sentido longitudinal e posteriormente ramificam-se (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; COST, 1999; Ledo dos Santos, 2009).

As fendas longitudinais (Figura 2.2) localizam-se junto ao eixo ou ao longo da zona de passagem dos pneus dos veículos. Normalmente existem devido a deficiência da drenagem junto às bermas, deficiência no processo de execução das juntas de construção ou ainda devido a deficiências no processo de construção relativamente à ligação entre as camadas que constituem o pavimento. O início de fadiga das misturas betuminosas também é um fator que causa fendas longitudinais bem como o envelhecimento precoce do ligante betuminoso. A evolução deste tipo de fenda consiste no desenvolvimento de ramificações ou o aumento da abertura das mesmas. No entanto, devido à perda da capacidade de impermeabilização da superfície do pavimento há uma lavagem de finos das camadas subjacentes por causa da entrada de água pelas fendas (E.P., 2008).



Figura 2.2- Fendas longitudinais ramificadas com perda de material e acompanhada de deformações (nível 3) (E.P., 2008)

As fendas transversais (Figura 2.3) compreendem parte ou toda largura da faixa de rodagem, são consideravelmente perpendiculares ao eixo da via, podendo ser isoladas ou com um espaçamento variável. Normalmente existem devido à deficiência no processo de compactação das camadas subjacentes ou ainda devido à deficiência no processo de execução da junta transversal de construção. A evolução deste tipo de fenda consiste no desenvolvimento de ramificações ou o aumento da abertura das mesmas, subida e lavagem de finos devido a entrada acelerada de água causada pelos veículos (E.P., 2008).



Figura 2.3- Fendas transversais ramificada e com abertura entre 2 a 4 mm (Nível 2) (E.P., 2008)

As fendas parabólicas existem quando há falta de estabilidade da camada de desgaste e deficiências na ligação desta às camadas betuminosas subjacentes. Estas aparecem na zona de passagem do rodado, sendo que o eixo da parábola está orientado no eixo longitudinal (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011).

A pele de crocodilo (Figura 2.4) é uma consequência da ramificação das fendas, ou seja, a evolução das fendas dá origem a este tipo de degradação que por sua vez abrange toda ou parte da via. No decorrer do seu desenvolvimento a pele de crocodilo pode ser caracterizada quanto à abertura dos bordos das fendas, em abertas ou fechadas ou pela formação de malhas ou grelhas largas, com uma abertura maior ou igual a 40 cm, ou estreitas, com uma abertura menor ou igual a 40 cm. A evolução deste tipo de degradação consiste em malhas cada vez mais estreitas e fendas cada vez mais abertas. A pele de crocodilo demonstra o franco e rápido estado de degradação do pavimento, pois o pavimento passa a ser submetido a mais esforços pela falta de homogeneidade do mesmo, provocando deste modo a formação de rodeiras na via. Devido o aparecimento de múltiplas fendas as camadas granulares são afetadas por causa da entrada de água pelas fissuras que se encontram no pavimento (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; E.P., 2008; Ledo dos Santos, 2009).



Figura 2.4- Pele de crocodilo com malha inferior a 40 cm(Nível 3) (E.P., 2008)

Os principais fatores do princípio e evolução das fendas são a qualidade dos materiais, agressividade do tráfego, ações climáticas e camadas estruturais de reduzida compactidade (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011).

2.1.2.2. Deformações

As deformações localizadas (Figura 2.5) normalmente acontecem numa pequena área do pavimento em diferentes pontos formando, deste modo, depressões ou alteamentos no mesmo que por sua vez são medidos em centímetros. Normalmente são combinadas com a rotura do pavimento e podem surgir devido ao estacionamento constante de veículos pesados, na área deformada, e também podem surgir por excesso de betume na mistura, ou seja, em misturas betuminosas de estabilidade reduzidas. A falta de capacidade do solo de fundação também pode ser um causador deste tipo de deformação, bem

como a falta de ligações entre as camadas e deficiência no processo de execução das juntas de construção transversais. A evolução deste tipo de degradação consiste num aumento do desnível, provocando deste modo o agravamento de irregularidade longitudinal (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; E.P., 2008; Maia, 2012).



Figura 2.5- Deformações localizadas com diferença de nível superior a 30 mm (Nível 3) (E.P., 2008)

A estabilidade das misturas betuminosas é uma propriedade que é responsável pela resistência da mistura à deformação causada pelas cargas de longa duração a temperaturas elevadas. Para além da densidade da mistura e da quantidade de betume, a estabilidade da mistura depende do atrito interno entre os agregados que compõem a mesma. Assim sendo, a falta de resistência da mistura origina rodeiras (Figura 2.6) no pavimento, conhecidas como o tipo de degradação mais considerável na família das deformações, são deformações longitudinais que surgem na faixa de passagem dos rodados dos veículos. No entanto, são distinguidas como rodeiras de pequeno raio e de grande raio, formando desta forma deformações plásticas no pavimento. Para além da falta de resistência da mistura, este tipo de deformações pode também surgir devido à baixa capacidade estrutural do solo de fundação ou das camadas granulares do pavimento e a deficiência nos elementos de drenagem, no caso das rodeiras de grande raio. A evolução deste tipo de degradações consiste no aumento gradual da profundidade das rodeiras, fendilhamento do tipo pele de crocodilo ou pelo surgimento de fendas longitudinais (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; E.P., 2008; Maia, 2012).



Figura 2.6- Rodeiras com profundidade maior que 30 mm (nível 3) (E.P., 2008)

A ondulação é um tipo de deformação que não se constata num pavimento corretamente projetado, mas quando surge é reconhecida por ser uma deformação transversal que se repete com

determinada frequência ao longo do pavimento. Pode ocorrer na camada de desgaste, em que surge uma deformação suave ao longo do pavimento e também pode ocorrer devido a uma pequena deformação da fundação (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011; Ledo dos Santos, 2009).

2.1.2.3. Degradação da camada de desgaste

As desagregações superficiais (Figura 2.7) são distinguidas pela perda do mastique bem como pelo arranque do agregado do pavimento. Normalmente surgem devido a falta de adesividade ligante-agregado, segregação da mistura betuminosa, deficiência no processo de compactação e temperaturas de compactação baixas. O envelhecimento do ligante bem como a falta de qualidade dos materiais da camada de desgaste são fatores que contribuem para este tipo de degradação. Durante o processo de fabrico da mistura betuminosa é necessário ter em atenção a limpeza dos agregados e o sobreaquecimento do betume. A evolução deste tipo de degradação consiste no aumento da área afetada, caminhando deste modo a degradações do tipo pelada (E.P., 2008).



Figura 2.7- Desagregações superficiais com altura entre 30 cm e 100 cm (Nível 2) (E.P., 2008)

A desagregação do tipo pelada (Figura 2.8) é uma consequência do fendilhamento do tipo pele de crocodilo sendo distinguida pelo o arranque da camada de desgaste em forma de placas. Normalmente surgem devido a deficiência da ligação da camada de desgaste às subjacentes ou quando a camada de desgaste tem pouca espessura. A evolução deste tipo de degradações consiste no aumento da área danificada, perda da capacidade da camada de desgaste em impedir a entrada de água e formação de ninhos na camada subjacente. Tal como as outras degradações, a falta de qualidade dos materiais compromete a vida útil do pavimento, ou seja, acelera o processo de envelhecimento do mesmo (E.P., 2008).



Figura 2.8- Peladas com largura entre 30 cm e 100 cm (Nível 2) (E.P., 2008)

Os ninhos (Figura 2.9) fazem parte da evolução da desagregação do tipo pedalada e outras degradações, formando deste modo cavidades na camada de desgaste que posteriormente atingem as camadas subjacentes. Normalmente surgem da evolução de outros tipos de degradações, destacando-se mais as desagregações superficiais e fendilhamento do tipo pele de crocodilo. A qualidade dos materiais continua a ter um papel preponderante no que diz respeito a durabilidade dos pavimentos, particularmente os materiais usados no fabrico da camada de desgaste. A evolução deste tipo de degradações consiste no aumento da área danificada bem como a profundidade dos ninhos, ou seja, vão danificando cada vez mais as camadas subjacentes e também a intensidade do tráfego pode acelerar o processo dos ninhos (E.P., 2008).



Figura 2.9- Ninhos com a profundidade da cavidade entre 2 e 4 cm (Nível 2) (E.P., 2008)

2.1.2.4. Movimento dos materiais

A exsudação (Figura 2.10) faz parte da evolução das rodeiras, deformações localizadas e outro tipo de degradações. É um tipo de movimento de materiais que surgem na zona de passagem dos pneus dos veículos e consiste na subida do ligante betuminoso à superfície na camada de desgaste. Normalmente surge devido a reduzida viscosidade e estabilidade do ligante betuminoso em pavimentos submetidos a tráfego intenso. A rega de colagem excessiva e o excesso de ligante betuminoso na camada de desgaste também são um dos fatores para ocorrer este tipo de degradação. A evolução deste tipo de degradação consiste no aumento da área afetada e da película de ligante betuminoso (E.P., 2008).

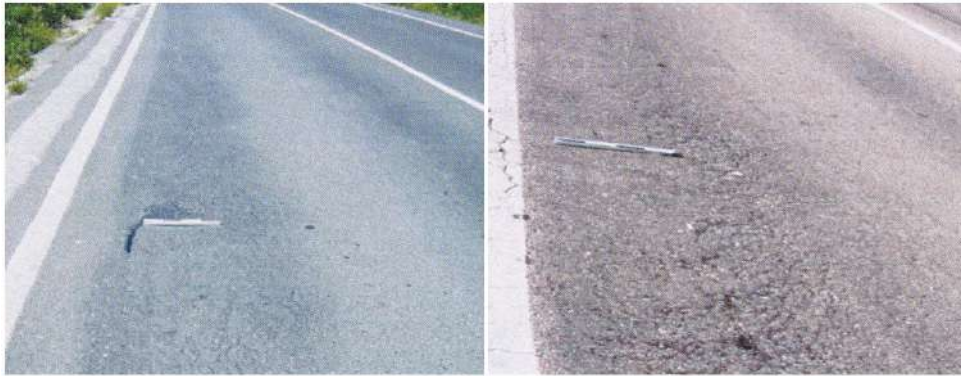


Figura 2.10- Exsudação de betume com largura superior a 100 cm (Nível 3) (E.P., 2008)

A subida de finos distingue-se pela textura esbranquiçada que o pavimento apresenta na camada superficial, tal como mostra a Figura 2.11. Os finos são provenientes do solo de fundação bem como das camadas granulares que constituem o pavimento. Normalmente surgem devido ao fendilhamento do pavimento, permitindo deste modo a infiltração da água que por sua vez arrasta-os à superfície. A evolução deste tipo de degradação consiste no aumento de finos à superfície como se pode ver na Figura 2.11 onde à esquerda é apresentado o nível 1 deste tipo de degradação e à direita o nível 2 onde se constata o aumento da textura esbranquiçada (E.P., 2008).



Figura 2.11- Subida de finos apenas presentes nos bordos das fendas (Nível 1 à esquerda) e abrangendo a zona de passagem dos pneus (Nível 2 à direita)(E.P., 2008)

2.2. Manutenção e reabilitação de pavimentos

Durante o período de vida útil do pavimento, período de tempo desde a sua concepção até a fase em que este não cumpre com as exigências inerentes, são tomadas medidas de manutenção e reabilitação que por sua vez têm o objetivo de prolongar e garantir a qualidade funcional e estrutural do pavimento, tal como mostra a Figura 2.12, mantendo deste modo a segurança e o conforto dos utentes (Lima da Silva, 2013).

Portanto, é necessário acompanhar a evolução dos pavimentos ao longo do ciclo de vida de maneira a intervir, com técnicas de manutenção ou reabilitação. A intervenção pode ser com ou sem o aumento da capacidade de carga do pavimento, ou então reciclando o material do pavimento já existente (Jiménez e Sánchez, 2006).

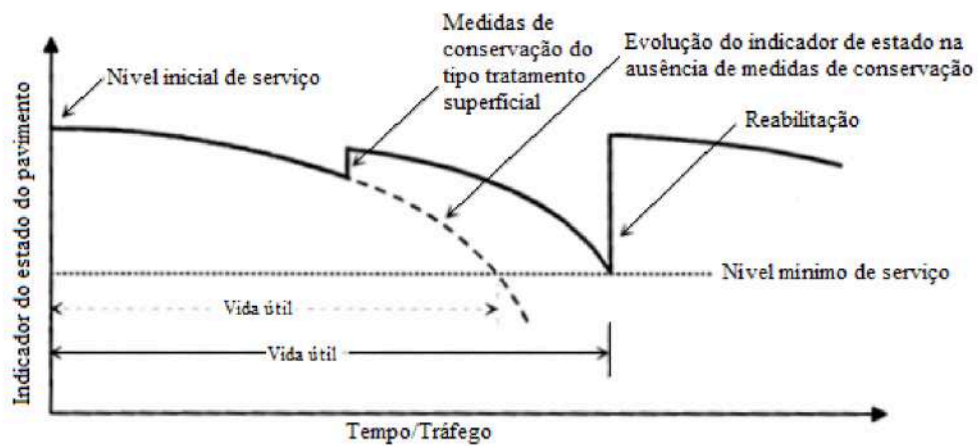


Figura 2.12- Evolução do estado do tempo e do tempo do útil de vida do pavimento (Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, 2004)

2.2.1. Medidas de conservação

Neste tipo de intervenção pretende-se atuar de uma maneira mais generalizada na superfície do pavimento de forma melhorar as características funcionais, ou tratar-se de defeitos pontuais, como por exemplo os que se encontram no grupo da desagregação de camadas de desgaste, ou ainda na selagem e fendas. Este tipo de intervenção não tem a intenção de aumentar a capacidade de carga do pavimento. Sendo assim é possível observar no Tabela 2.1 os diferentes tipos de intervenção recomendados para os diversos tipos de degradação (Jiménez e Sánchez, 2006).

Tabela 2.1- Tipos de intervenção para medidas de conservação (Jiménez e Sánchez, 2006)

| Degradações | Fresagem/ escarificação | Reparações pontuais | Selagem | Tratamentos superficiais | Camadas finas |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|---------|-----------------------------|------------------|
| Ondulações locais | XX | X | | | XX |
| Superfície ondulada | XX | | | | XX |
| Depressões | | XX | O | O | |
| Deformações | O | XX | | | |
| Ressaltos | X | O | | O | XX |
| Pele de crocodilo | | X | O | XX | XX |
| Fendas em malha larga | | X | X | X | XX |
| Fendas longitudinais no eixo | | O | XX | O | O |
| Fendas nas rodeiras | | O | X | X | X |
| Fendas no bordo da via | | O | X | X | O |
| Fendas em dente de serra | | O | X | O | X |
| Fendas de retração | | X | O | O | X |
| Fendas de reflexão | | O | X | O | X |
| Fendas em curva | | O | | O | O |
| Desprendimento de agregados | | O | | X | XX |
| Desagregação | | X | O | XX | XX |
| Exsudação | X | | | O | X |
| Ninhos | | XX | | O | X |
| Zonas de acumulação de água | | | | | X |
| Zonas com humidade | | O | O | O | |

Notas: O – Técnica pouco corrente; X - Técnica utilizada apenas em determinadas classes de estradas; XX – Técnica de uso geral.

2.2.2. Medidas de reabilitação

Para o caso de reabilitação dos pavimentos, esta faz-se quando se tem como objetivo repor ou melhorar as características estruturais do pavimento preparando-o deste modo para um novo ciclo, ou seja, para um novo período de vida útil, nomeadamente, quando o volume de tráfego aumenta ou mesmo quando o pavimento é submetido a novas solicitações.

O reforço de pavimentos flexíveis, umas das intervenções mais frequentes na reabilitação de pavimentos, tem como objetivo a recuperação da capacidade estrutural bem como a aumento da sua vida útil. Para tal, é adicionado uma espessura de materiais betuminosos executado sobre o pavimento antigo. Geralmente, os métodos usados para o dimensionamento de materiais betuminosos para reforço são idênticos aos métodos usados quando se trata de pavimentos novos. Na aplicação da espessura de reforço é necessário ter em conta as informações relativas ao tráfego, condições geotécnicas e climáticas, bem como o historial do pavimento antigo, de forma a definir os materiais a utilizar e a espessura necessária. As vezes é necessário aplicar a técnica de fresagem caso o pavimento antigo esteja numa fase de degradação mais avançada ou mesmo para garantir que o pavimento esteja a uma cota que não comprometa os passeios existentes ou outras galerias (Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, 2004; Jiménez e Sánchez, 2006; Lima da Silva, 2013; Sobral Campos Jacinto, 2003).

Antigamente os critérios de seleção dos projetos de reabilitação de pavimentos rodoviários tinham como principal foco as facetas relativas a economia e de ordem técnica. Nos dias de hoje, já se pesa mais as questões ambientais e deste modo a reutilização de materiais em diversas áreas tem ganhado espaço, de forma que o mesmo se faz refletir na área dos pavimentos precisamente na reabilitação de pavimentos em estado avançado de degradação (Jiménez e Sánchez, 2006; Lima da Silva, 2013; Sobral Campos Jacinto, 2003).

Neste documento dar-se-á mais destaque a outras metodologias alternativas para regeneração de misturas betuminosas, com o objetivo de aumentar o tempo de vida útil dos pavimentos mantendo as suas características estruturais e funcionais.

2.3. Auto-regeneração

Nesta secção são apresentadas algumas metodologias aplicadas em misturas betuminosas de maneira a estimular o seu comportamento auto-regenerativo. De forma não exaustiva escolheu-se duas técnicas, nomeadamente, o aquecimento por indução e aplicação de cápsulas de alginato em misturas betuminosas.

2.3.1. Aquecimento por indução de misturas betuminosas

Muitas pesquisas têm provado que a temperatura é um fator influente nas propriedades de regeneração da mistura betuminosa.

Tem sido investigado outro método de regeneração de pavimentos, conhecido como aquecimento de misturas betuminosas por indução. É adicionado à mistura betuminosa fibras metálicas durante o processo de fabrico das mesmas, com a garantia destas tornarem a mistura condutora, otimizando-a de acordo com a condutibilidade térmica e a velocidade de aquecimento por indução da mistura. Este método, foi desenvolvido pelos investigadores da Universidade de Delft. Deste modo, quando surgem fissuras na mistura betuminosas é aplicado o aquecimento por indução de forma a aumentar a capacidade de regeneração da mesma (Liu *et al.*, 2017). Dai (Dai, Wang e Mohd Hasan, 2013), divulgou que o aquecimento por indução pode ser repetido pelo menos 6 vezes. García (García *et al.*, 2011), constatou que o aquecimento por indução não agrava o envelhecimento do betume devido ao curto espaço de tempo de aquecimento. Também tem sido provado que o aquecimento por indução pode prevenir a desagregação de misturas betuminosas abertas (Liu *et al.*, 2014). Estes investigadores perceberam que o tipo de aquecimento pode aumentar as propriedades de regeneração por conseguirem restaurar a taxa de resistência à flexão e deformação por fadiga devido a cura das fissuras (García, 2012; Liu *et al.*, 2011, 2012).

A primeira estrada em que foi aplicado este conceito, de aquecimento por indução, foi a A58 em Holanda e a primeira intervenção foi realizada em 2015 (Liu, Schlangen e Ven, Van de, 2013). Segundo a entidade gestora pode ser economizado cerca de 90 milhões de euros por ano por investir em regeneração de misturas betuminosas, acrescentando deste modo 50 % da sua vida útil. Por um lado, gastam o dobro na concessão deste tipo de misturas, comparativamente com as misturas betuminosas padrão, mas acabam economizar em manutenção (Liu *et al.*, 2017).

Têm sido desenvolvidas muitas tecnologias para reduzir a temperatura de fabrico e aplicação de misturas betuminosas no local, nomeadamente as misturas betuminosas temperadas (MBT). Existem várias tecnologias de fabrico deste tipo de misturas e inclusive patenteadas, nomeadamente aditivos orgânicos e químicos com base a tecnologias de espuma. Este tipo de mistura permite uma redução de 20°C – 30°C da temperatura de fabrico e aplicação da mistura, aumento da trabalhabilidade da mistura e redução da viscosidade do betume. Os investigadores compararam a partir do ensaio dano-cura-dano, dois tipos de misturas, nomeadamente misturas betuminosas a quente (MBQ) e misturas betuminosas temperadas (MBT). Fabricou-se provetes (pelo método Marshall e vigas) com 63,5mm de espessura, com o objetivo de estudar a eficiência do aquecimento para as correspondentes misturas. A MBT apresentou resultados de resistência a fadiga ligeiramente superiores, porém resultados inferiores de resistência a fissuras à baixa temperatura, relativamente as MBQ. A aplicação de aditivos em MBT não influenciou a velocidade de aquecimento por indução. Ambas as misturas apresentam rácios de grande

regeneração com aquecimento por indução e o rácio de recuperação a fadiga é altamente dependente da tensão aplicada (Liu *et al.*, 2017).

A experiência do aquecimento por indução foi realizada usando um sistema com a capacidade de 7,9 kW e uma frequência de 123 kHz. Foi usada uma câmara infravermelho para medir a velocidade de aquecimento da amostra. A distância do aparelho e o provete variava de 30 mm a 20 mm e 10 mm de forma a estudar o efeito da velocidade de aquecimento na amostra. A força do campo magnético variava com a distância entre o aparelho e a amostra, que resultará em diferentes velocidades de aquecimento. Foram usadas três amostras para cada tipo de aquecimento. Para melhor perceber este gradiente de aquecimento, foram medidas a média da velocidade de aquecimento por indução no topo da superfície do provete, no meio e no fundo (Liu *et al.*, 2017).

Para determinar fibras adequadas, foram incorporadas na mistura betuminosa três tipos de fibras metálicas (nomeadamente A02, A08 e Q1-80) onde foram investigadas as características térmicas e a velocidade de aquecimento por indução. A Figura 2.13 mostra a condutibilidade térmica, difusividade térmica e aquecimento específico do betume com os de diferentes tipos de fibras metálicas. Pode ser visto na mesma figura que a mistura betuminosa com diferentes tipos de fibras metálicas mostram uma capacidade térmica similar. A mistura betuminosa com fibra metálica Q1-80 tem uma condutibilidade térmica ligeiramente maior, fazendo com que seja mais fácil transferir o aquecimento para promover a regeneração (Liu *et al.*, 2017).

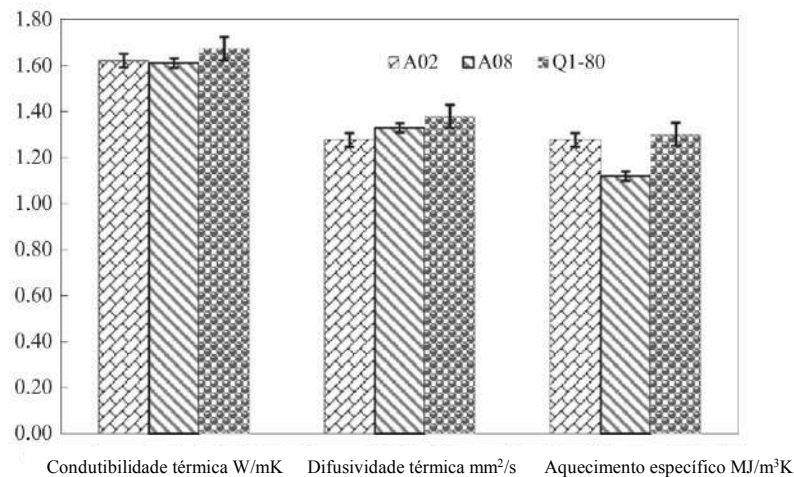


Figura 2.13- Constantes térmicas de misturas betuminosas com diferentes tipos de fibras metálicas (Liu *et al.*, 2017)

Foram feitos ensaios de fadiga por flexão de quatro pontos em provetes MBT e MBQ para comparar suas resistências à fadiga. A Figura 2.14 mostra as linhas de fadiga dos provetes MBT e MBQ contendo fibras metálicas Q1-80. Pode ser visto na mesma figura que o provete MBT tem melhor resistência à fadiga do que a MBQ (Liu *et al.*, 2017).

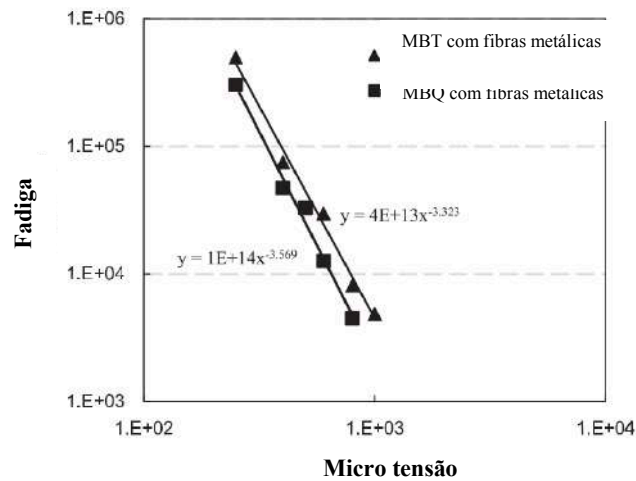


Figura 2.14- Ensaio de resistência à fadiga em provetes MBT e MBQ (Liu *et al.*, 2017)

A intensidade do campo magnético abaixo da bobine geradora do aquecimento por indução (Figura 2.15) não é homogênea, que resulta na não homogeneidade do aquecimento da amostra. Mesmo na superfície do provete, há também um gradiente térmico. A Figura 2.16 mostra uma típica imagem infravermelha de um provete após o aquecimento por indução, e vê-se claramente a variação de temperatura (Liu *et al.*, 2017).

A distância entre o aparelho e a superfície do provete tem uma influência significativa na eficiência de aquecimento do mesmo. A Figura 2.17 mostra a velocidade de aquecimento no topo da superfície do provete de MBT com diferentes distâncias de aquecimento. A velocidade de aquecimento no topo da superfície do provete a distância de 10mm, 20mm e 30mm é de 0,98 °C/s, 0,66 °C e 0,42 °C respectivamente. Isto significa que a mais alta eficiência de aquecimento foi alcançada com a menor distância de aquecimento (Liu *et al.*, 2017).

A Figura 2.18 mostra a velocidade de aquecimento no topo da superfície de amostras de MBQ com diferentes distâncias de aquecimento. Os provetes de MBT e MBQ apresentaram velocidades de aquecimento por indução semelhantes. A nuance reside no fato de que a amostra de MBT possui um conteúdo de vazios de ar ligeiramente menor, o que resulta em uma velocidade de aquecimento por indução ligeiramente maior dos provetes de MBQ (Liu *et al.*, 2017).



Figura 2.15- Bobine geradora do aquecimento por indução (Liu *et al.*, 2017)

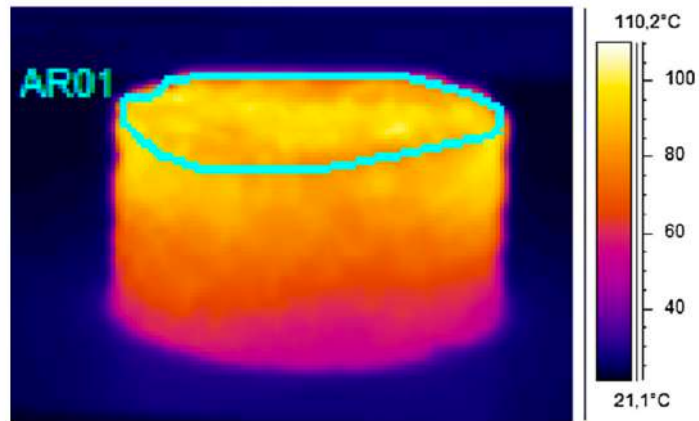


Figura 2.16- Imagem infravermelho de um provete após o aquecimento (Liu *et al.*, 2017)

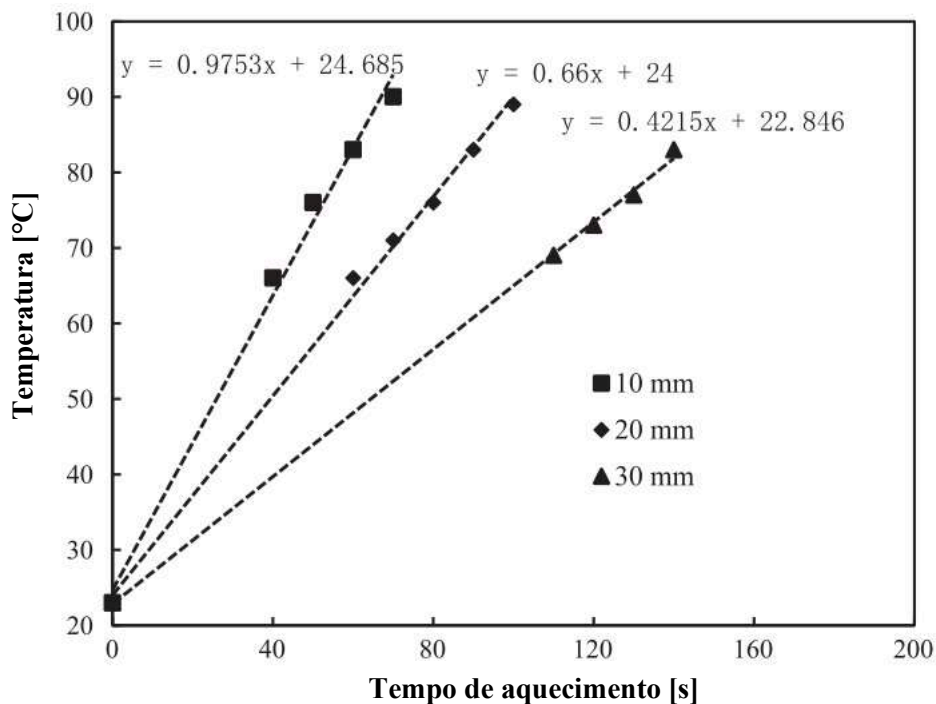


Figura 2.17- Velocidade do aquecimento por indução com diferentes distâncias entre a bobine e o provete de MBT (Liu *et al.*, 2017)

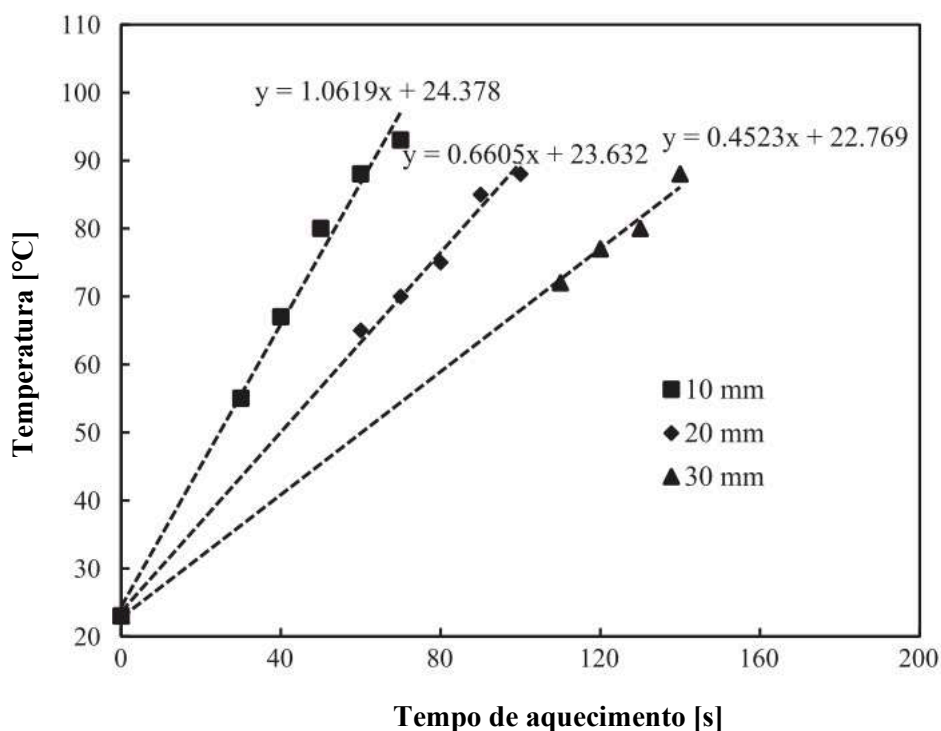


Figura 2.18- Velocidade do aquecimento por indução com diferentes distâncias entre a bobine e o provete de MBQ (Liu *et al.*, 2017)

Para qualificar a temperatura de aquecimento em taxas de regeneração e para comparar a capacidade desta nos provetes de MBT e MBQ em diferentes temperaturas de aquecimento, foram investigados os danos no prolongamento de vida à fadiga dos provetes em diferentes temperaturas de aquecimento. Para isto, as vigas foram testadas à fadiga com $600\mu\epsilon$ e 10 Hz à 15°C. De seguida, os provetes foram aquecidos por indução em diferentes temperaturas e posteriormente foram submetidos à temperatura de 15°C por 3 h (Liu *et al.*, 2017).

A Figura 2.19 mostra a taxa de regeneração por indução (taxa de recuperação de tempo/ vida de fadiga) de provetes MBT e MBQ em diferentes temperaturas de aquecimento. Como mostra a mesma figura, a taxa de regeneração do fundo do provete MBT e MBQ são altamente dependentes da temperatura. A taxa de regeneração aumenta com o aumento da temperatura de aquecimento (Liu *et al.*, 2017).

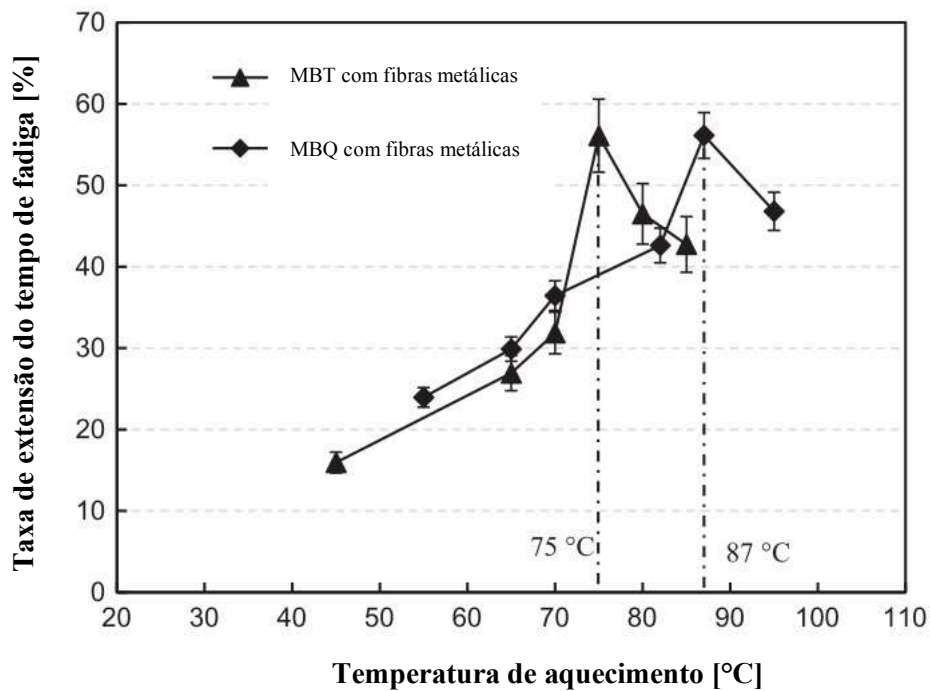


Figura 2.19- Taxa de regeneração por indução de provetes MBT e MBQ em diferentes temperaturas de aquecimento (Liu *et al.*, 2017)

2.3.2. Misturas betuminosas com agentes encapsulados

Os regeneradores, como já foi referido, têm o papel de baixar a viscosidade ou melhorar as propriedades físicas e químicas da mistura quando são solicitados a partir de fissuras no pavimento. O conceito das cápsulas resume-se simplesmente em colocar esses rejuvenescedores presos de modo a serem somente ativados de maneira autónoma no tempo certo. Deste modo, quando surgem fendas no pavimento as cápsulas rompem e libertam assim o regenerador. Portanto, pretende-se restaurar zonas limitadas do material.

Micaelo (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016), fez um estudo em que aplicou 3 grupos de cápsulas em misturas betuminosas (Figura 2.20). No entanto, foram testadas cápsulas com diferentes características morfológicas, resistência e tamanho. As cápsulas são constituídas por óleo de girassol no seu núcleo e envolvidas com uma estrutura polimérica de alginato de cálcio. Para o fabrico desta cápsula foram usadas as seguintes composições: (1) Alginato de Sódio ($C_6H_7O_6Na$) (Sigma-Aldrich), (2) Cloreto de Cálcio ($CaCl_2$) (Sigma-Aldrich), (3) Óleo de girassol e (4) Resina epóxi-cimento para o grupo I e II.

Foram selecionados dois grupos de cápsulas, nomeadamente o grupo I e II, em que para além da estrutura polimérica de alginato de cálcio foi-lhes aplicado mais um revestimento em epóxi-cimento, permanecendo o grupo III com apenas a estrutura polimérica. Usou-se como rejuvenescedor o óleo de girassol, por não ser necessário algum tratamento ou medidas de segurança especiais em laboratório na sua aplicação, e também por ser termicamente estável (Asli *et al.*, 2012; Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016; Zargar *et al.*, 2012).

As cápsulas utilizadas neste estudo feito por Micaelo et al, são aproximadamente esféricas e as principais características como resistência, composição e tamanho, são influenciadas geralmente pela relação óleo/ água e o número de revestimento que contém a cápsula (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

O betume usado para a mistura foi o AC20 base 40/60 (EN 13108-1). A mistura foi submetida (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016) a um processo de envelhecimento, antes da adição das cápsulas, de forma a simular o caso real do envelhecimento do pavimento. A mistura betuminosa levou cerca de 12 dias em estufa a 85°C. Após esse procedimento foram adicionadas as cápsulas na mistura e foram então fabricados, com o compactador giratório, provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura respetivamente (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

Os provetes foram testados sob compressão uniaxial cíclica sem confinamento lateral, realizados a 20°C em três fases: ensaio, descanso, ensaio. Foram aplicados diferentes tempos de descanso de 3h, 6h, 12h, 24h e 48h respetivamente, de forma a dar tempo que o óleo se difundisse e mudasse as características do betume. Este procedimento foi realizado em todos os provetes, com e sem cápsulas (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

A carga máxima durante o ciclo, para os provetes com cápsulas do grupo I e II foi de 20kN. Escolheu-se este valor porque corresponde a 28% da carga de “pico” obtida a partir do ensaio de compressão uniaxial dos provetes sem cápsula medidas numa deformação constante de 5mm/min. No caso dos provetes com cápsulas do grupo III o nível de carga foi diminuído para 14kN porque apresentaram danos significativos quando se aplicou a carga de 20kN. A variação da carga e da deformação durante os ciclos de carga está representada na Figura 2.21 (a). Em cada ciclo existe sempre uma pequena deformação a que não é recuperada. A evolução da deformação permanente encontra-se na Figura 2.21 (b) (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).



Figura 2.20- Cápsulas (Grupo I, Grupo II, Grupo III) (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

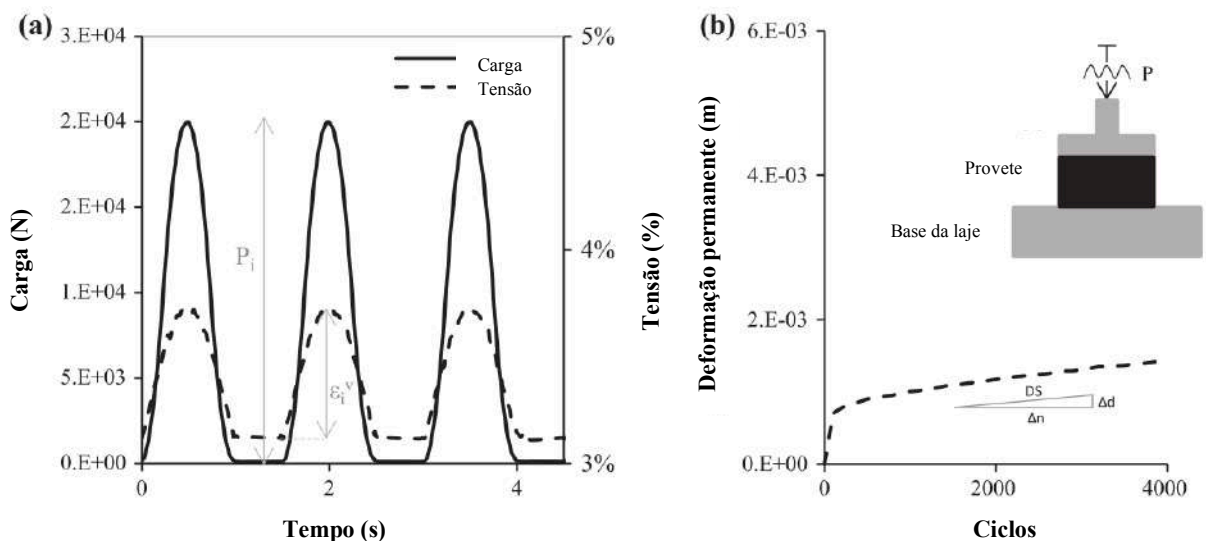


Figura 2.21- Resultados do ensaio mecânico: (a) Variação da carga e da deformação; (b) Deformação vertical acumulada (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

Analisou-se o diâmetro e a força de compressão dos três grupos de cápsulas, tal como mostra a Figura 2.22. Constatou-se que o tamanho médio variou entre 4,6mm (grupo III) a 6,8mm (grupo I) e aumentou linearmente com o número de revestimentos. Além disso, a força das cápsulas foi altamente afetada pela temperatura, em que a 20°C a força média das cápsulas do grupo I foi aproximadamente duas vezes maior que as restantes. As cápsulas do grupo II e III tiveram resultados semelhantes, embora

as cápsulas do grupo II serem revestidas de epóxi. A 130°C a força média de compressão das cápsulas foi de 12N, 8,4N e 6,1N para cápsulas do grupo I, II e III (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

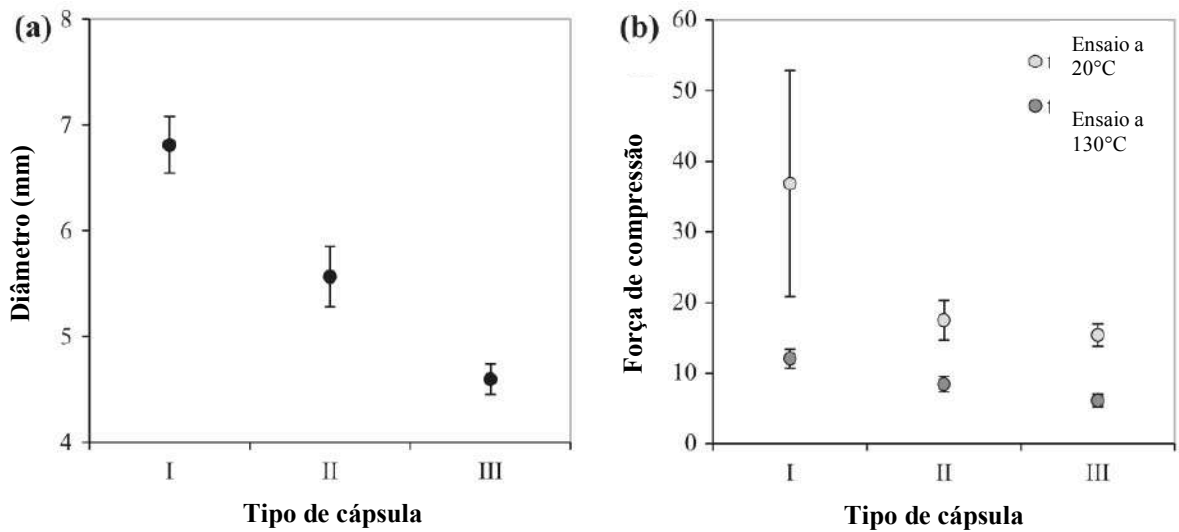


Figura 2.22- Tamanho médio (a) e força de compressão das cápsulas (b) (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

Foi demonstrado a partir da análise termo gravimétrica (*Thermogravimetric analysis* - TGA), resultados de como os diferentes grupos de cápsulas resistem a altas temperaturas durante o processo de fabrico da mistura betuminosa, embora perderem $\leq 4\%$ de massa no fabrico da mesma. Esta perda foi causada pela degradação do alginato de cálcio e evaporação de água das cápsulas. Os resultados desta análise para as cápsulas estão apresentados na Figura 2.23 (a) e para os componentes básicos das mesmas estão apresentados na Figura 2.23 (b) (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

Remanescente

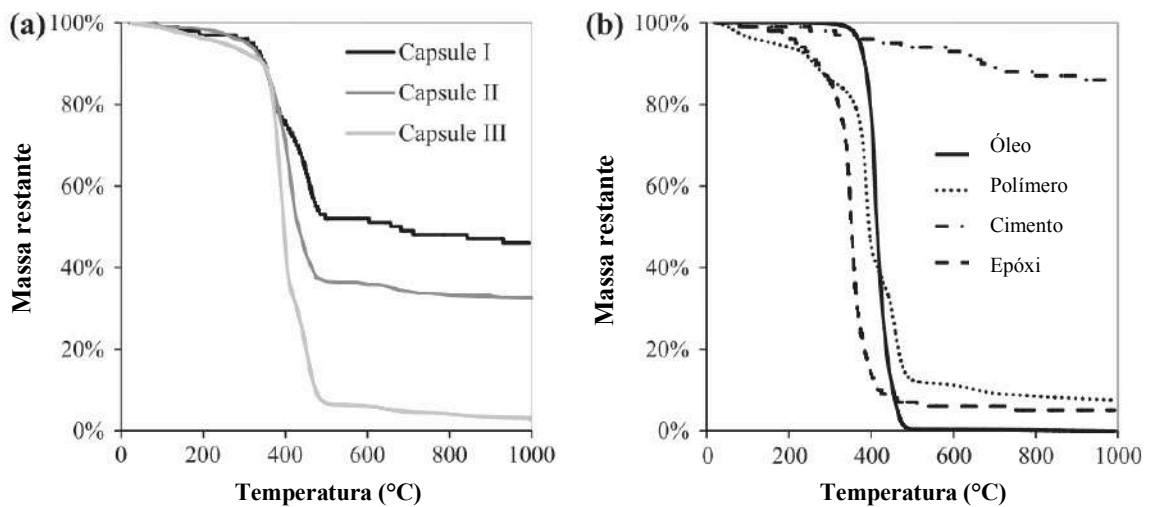


Figura 2.23- Resultado do ensaio de análise gravimétrica: Cápsulas (a); Componentes básicos das cápsulas (b) (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

Com isto, conseguiu-se observar que as cápsulas resistiram durante o processo de mistura e não libertaram o óleo durante a compactação. Caso isso acontecesse a mistura se tornaria mais mole e provavelmente ocorreria o fenômeno de deformação permanente. A Figura 2.24 mostra a secção transversal dos provetes com diferentes grupos de cápsulas, onde foi possível constatar a diferença do grupo sem e com revestimento exterior. Observou-se que as cápsulas sem revestimento exterior (Grupo III), têm a vantagem de adaptarem a forma a volta dos agregados, Figura 2.24 (b). Desta forma, utilizou-se as cápsulas do grupo III para os ensaios seguintes (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

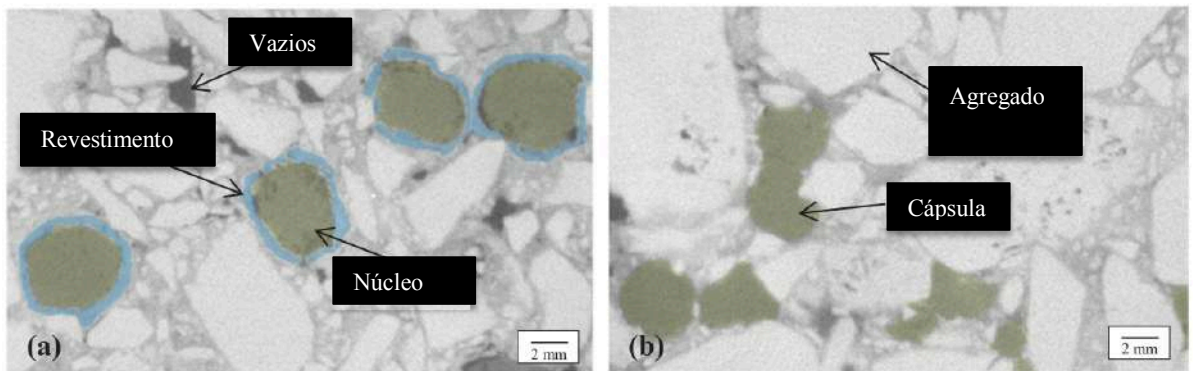


Figura 2.24- Tomografia computadorizada da secção transversal do provete com cápsula do grupo II (a) e do grupo III (b) (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

Foram fabricados provetes sem cápsula de modo a comparar a rigidez relativamente aos provetes com cápsulas do grupo III. Constatou-se que a rigidez dos provetes sem cápsulas cresceu constantemente enquanto que a rigidez dos provetes com cápsulas decrescia a partir dos 500 ciclos de carga, Figura 2.25 (a). Isto aconteceu provavelmente porque as cápsulas romperam durante o ensaio. Após o período de repouso (48h), é possível observar na mesma figura que a rigidez dos provetes sem cápsula permaneceu constante, enquanto que a rigidez dos provetes com cápsulas crescia. Os provetes com cápsula tiveram um comportamento diferente relativamente aos provetes sem cápsula, isto é, após o período de repouso possivelmente devido regeneração das fissuras causadas pelo ensaio (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

Comparou-se também a deformação vertical acumulada dos dois tipos de provetes, Figura 2.25 (b). Durante o primeiro ciclo foi imposto uma deformação de 1 a 2mm. Os provetes tiveram tendências diferentes, ou seja, os sem cápsulas apresentaram uma taxa de deformação menor comparativamente aos provetes com cápsulas. A razão para estes resultados, tem haver com a difusão de óleo na mistura betuminosa. Os provetes sem cápsula apresentaram uma taxa de deformação similar antes e depois do período de repouso. Por outro lado, a taxa de deformação dos provetes com cápsulas após o repouso foi

maior. Isto acontece provavelmente porque o óleo reduziu a viscosidade da mistura betuminosa (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

A Figura 2.26 mostra a relação da rigidez média antes (K^1) e depois (K^2) do período de repouso. Na Figura 2.26 (a) observa-se a relação de provetes sem cápsulas, mas com betume envelhecido e não envelhecido. Na Figura 2.26 (b) observa-se a relação de provetes com cápsulas, nomeadamente do grupo I, II e III. A taxa de rigidez do grupo III aumentou cerca de 15% depois do período de repouso de 48h, o que mostra a regeneração considerável das fissuras. O mesmo não aconteceu com as cápsulas do grupo I, em que a rigidez não teve uma mudança significativa. Isto mostra que este grupo de cápsulas sendo mais rígido não conseguiu romper de forma a libertar o rejuvenescedor suficiente para alterar as propriedades da mistura betuminosa. Sendo assim, o grupo III mostrou-se mais apto a alterar as propriedades da mistura betuminosa (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

A Figura 2.27 mostra a relação da deformação média dos provetes antes (DS^1) e depois (DS^2) do tempo de repouso. Na Figura 2.27 (a) observa-se a relação da deformação média dos provetes sem cápsulas, mas com o betume envelhecido e não envelhecido. Na Figura 2.27 (b) observa-se a relação da deformação média dos provetes com cápsulas. Constatou-se que a taxa de deformação dos provetes sem cápsula não alterou consideravelmente após o período de repouso. O mesmo não aconteceu aos provetes com cápsulas, em que o de uma maneira geral a taxa de deformação cresceu. Verificou-se que a taxa de deformação para os provetes com cápsula do grupo II e III foi relativamente superior (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

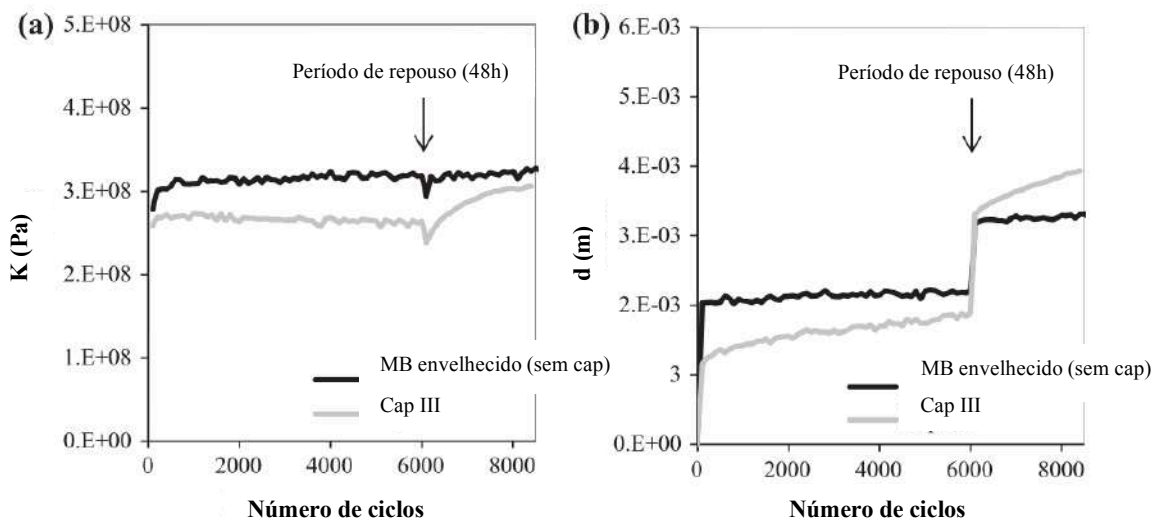


Figura 2.25- Variação da rigidez k (a) e da deformação permanente d (b) com carga cíclica da mistura betuminosa com e sem cápsulas (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

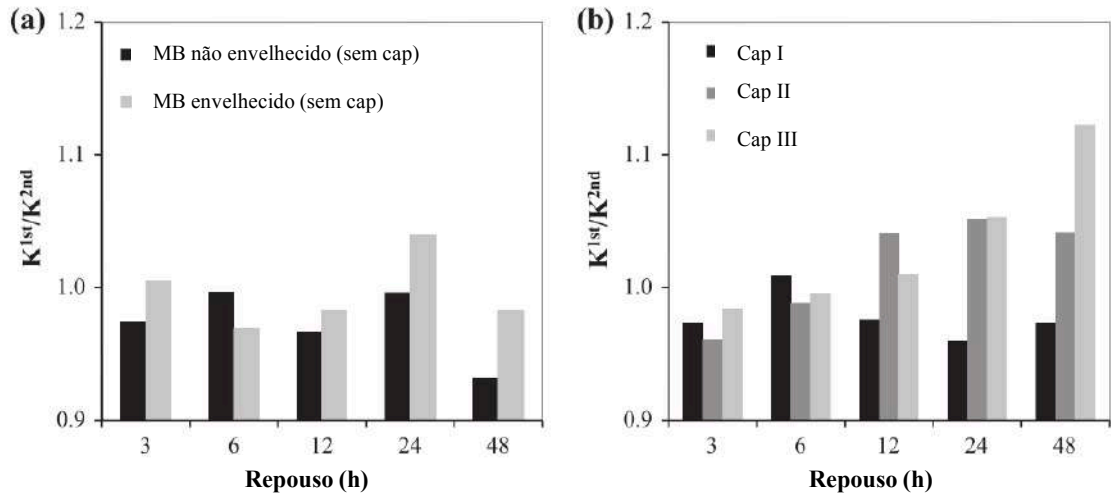


Figura 2.26- Variação da rigidez em relação ao tempo de repouso em provetes sem cápsulas (a) e com cápsulas (b) (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

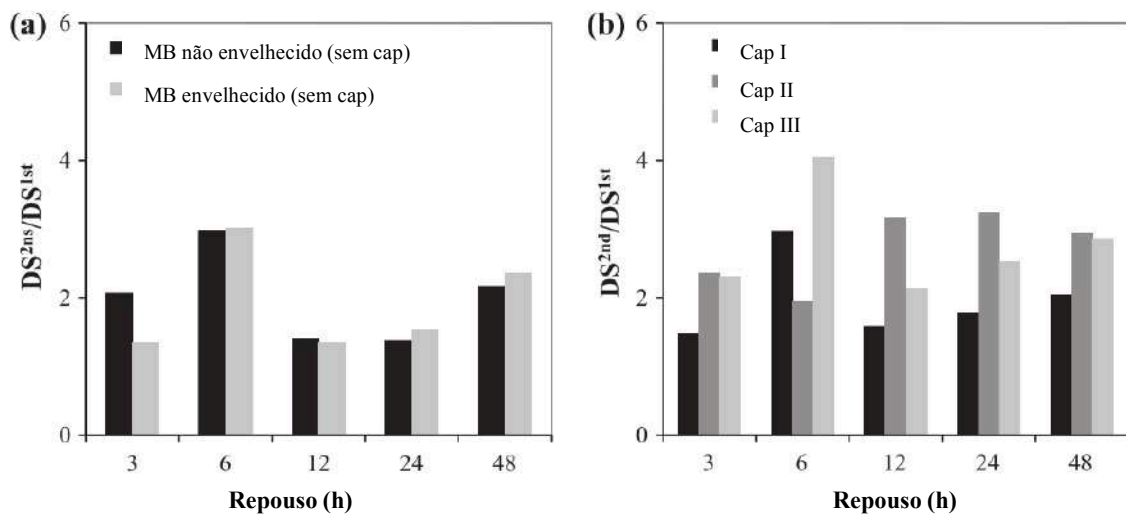


Figura 2.27- Variação da deformação em relação ao tempo de repouso em provetes sem cápsulas (a) e com cápsulas e com cápsulas (b) (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

O revestimento aplicado as cápsulas do grupo I e II não foi necessário para a resistir ao processo de fabrico da mistura betuminosa e compactação. As cápsulas do grupo III, sem revestimento, adaptam a sua forma a volta dos agregados.

Todas as cápsulas libertam uma percentagem de óleo durante o processo de fabrico da mistura betuminosa. Isto não afeta o processo de compactação, mas afetou a resistência à deformação permanente da mistura.

Os resultados deste estudo também mostraram que as cápsulas libertam o rejuvenescedor durante os ciclos de carga, sendo as cápsulas com revestimento as que menos libertaram rejuvenescedor.

Os provetes com cápsulas apresentaram um aumento significativo de rigidez depois do tempo de repouso. Por outro lado a resistência à deformação permanente foi inferior relativamente aos provetes sem cápsulas (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

Al-Mansoori (Al-Mansoori *et al.*, 2017), fez um estudo em que aplicou as mesmas cápsulas, mas agora sem o acréscimo do revestimento de resina epóxi, ou seja, semelhante as cápsulas usadas no presente documento. Este estudo teve como foco principal a abordagem geral do efeito das cápsulas de alginato de cálcio no desempenho mecânico e nas propriedades de regeneração da mistura betuminosa. Deste modo, foram feitos ensaios de sensibilidade a água, rigidez, resistência a erosão e de fadiga.

No que diz respeito a quantidade de cápsulas, foram aplicadas em termos de massa proporcional ao total da mistura 0,10%, 0,25% e 0,50%, respetivamente. Isto corresponde a um valor de óleo – betume de 1, 1%, 2,8% e 5,5%.

Tal como o estudo anterior feito por Micaelo (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016), neste também foram fabricados provetes sem cápsulas.

As cápsulas podem libertar o rejuvenescedor durante o processo de mistura e compactação. Entretanto, foi adicionado o montante equivalente de óleo na mistura sem cápsulas de maneira a diferenciar a regeneração relativamente a libertação de óleo das cápsulas durante o processo de mistura (Al-Mansoori *et al.*, 2017; Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

Foram fabricados provetes cilíndricos e prismáticos, com o compactador giratório (ângulo interno efetivo de 2°, pressão de 650 kpa e menos de 250 rotações) e pelo Roller Compact, respetivamente.

O módulo de rigidez e o número de ciclos até atingir à rotura por fadiga foram determinados por meio de ensaios de tração indireta em provetes cilíndricos a 20°C. Os mesmos provetes foram usados primeiro para o ensaio do módulo de rigidez e depois para a rotura por fadiga. O módulo de rigidez foi medido seguindo os procedimentos definidos na norma EN 12697 – 26 (Al-Mansoori *et al.*, 2017).

Tal como já foi visto, os provetes com cápsula apresentam menos rigidez relativamente aos provetes sem cápsula, mas não diminuem a resistência a fadiga comparando com os provetes sem cápsula. O módulo de rigidez para as diferentes misturas betuminosas foi medido à 20°C. Uma das hipóteses levantadas foi do tamanho das cápsulas, a medida em que este cresce menos rigidez terá o provete. Na Figura 2.28 (a) são retratados o número de ciclos até a rotura por fadiga, para diferentes misturas betuminosas. Neste sentido, pode ser observado que a quantidade de cápsulas na mistura betuminosa dos provetes não influenciou na vida à fadiga dos mesmos. Por outro lado, à vida a fadiga dos provetes com cápsulas foi aproximadamente 15% mais baixa comparativamente aos provetes sem cápsulas. É bem conhecido que, seja em testes de fadiga controlados por tensão ou deformação, o número de ciclos até a rotura diminui com o aumento da tensão aplicado ou do nível de deformação, Figura 2.28 (b) (Al-Mansoori *et al.*, 2017).

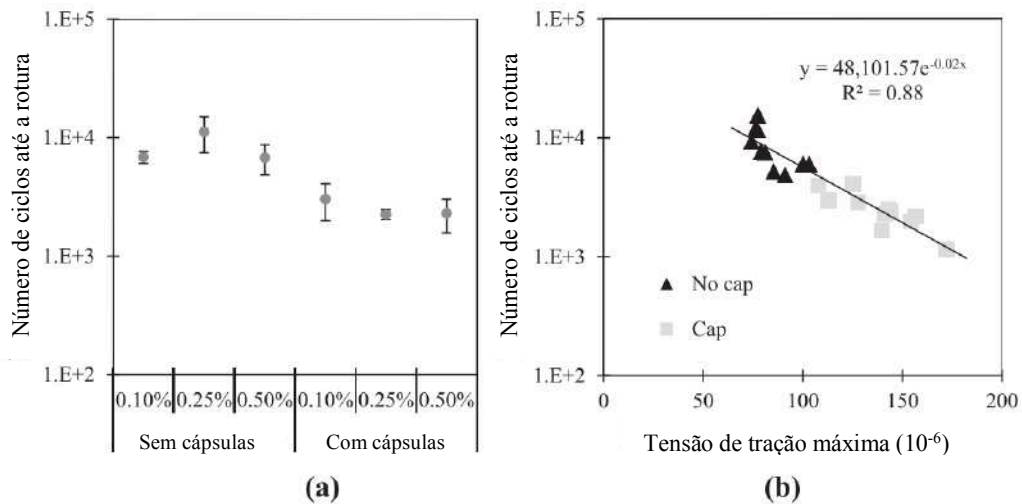


Figura 2.28- Número de ciclos até a rotura para diferentes tipos de misturas betuminosas (a) e máxima tensão horizontal (Al-Mansoori *et al.*, 2017)

Nesta pesquisa (Al-Mansoori *et al.*, 2017) utilizou-se um novo método de regeneração (Figura 2.29) que permite simular as fissuras causadas devido a carga que o pavimento sofre por causa do tráfego. A regeneração do betuminoso foi quantificada pela recuperação da resistência à flexão das lajes. Para facilitar a criação da fissura na laje, foi feito um corte transversal de 5mm de profundidade no meio da mesma. O ensaio foi feito à temperatura de 20°C com um carregamento de 2mm/min até a rotura dividindo a laje em duas partes. Observou-se na Figura 2.30 que os provetes com 0,25% e 0,50% apresentaram maior regeneração relativamente aos provetes sem cápsula. Geralmente a taxa de regeneração cresce aproximadamente até 72h do período de repouso do provete. Períodos acima das 72h não apresentam resultados de regeneração mais significativos. Depois de atingir o nível de regeneração máximo este permaneceu constante. A taxa de regeneração dos provetes prismáticos com 0,50% de cápsulas após o tempo de repouso de 72h foi mais de 50%, ou seja, mais da metade da resistência à flexão inicial.

Constatou-se na mesma figura que com 0,10% de cápsulas não é suficiente para garantir uma capacidade de regeneração extra. A taxa de regeneração de 11,01% para os provetes sem cápsulas foi obtida graças a adição de óleo durante o processo de fabrico da mistura betuminosa, de forma a compensar a quantidade de óleo que é libertada das cápsulas durante o processo de mistura. Estima-se que a taxa de regeneração dos provetes seria menor se não tivessem aplicado alguma percentagem de óleo, durante a mistura, para compensar o que é libertado pelas cápsulas (Al-Mansoori *et al.*, 2017).

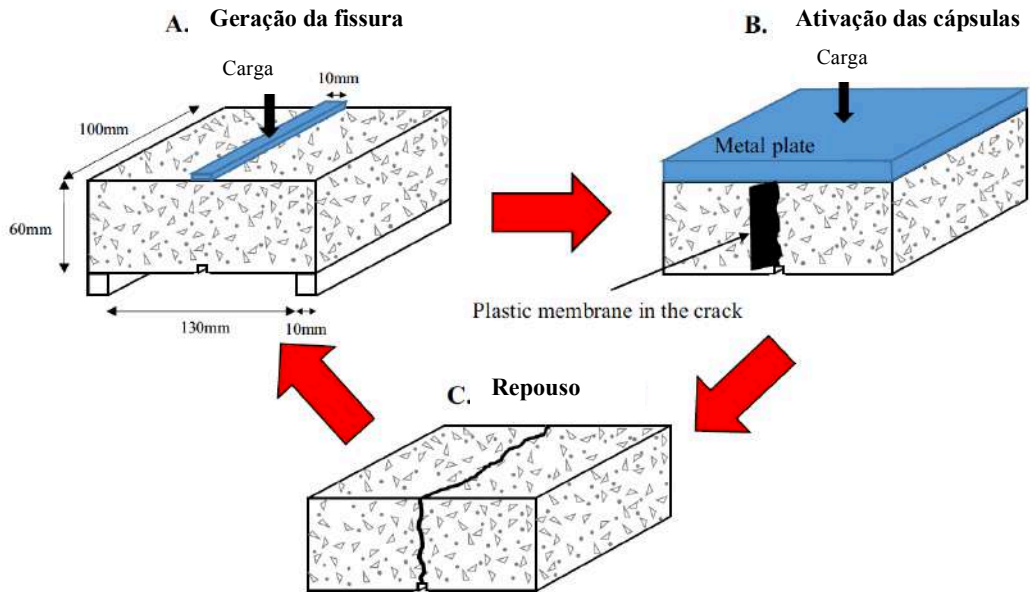


Figura 2.29- Esquema do ensaio de fissura - regeneração aplicado a uma laje (Al-Mansoori *et al.*, 2017)

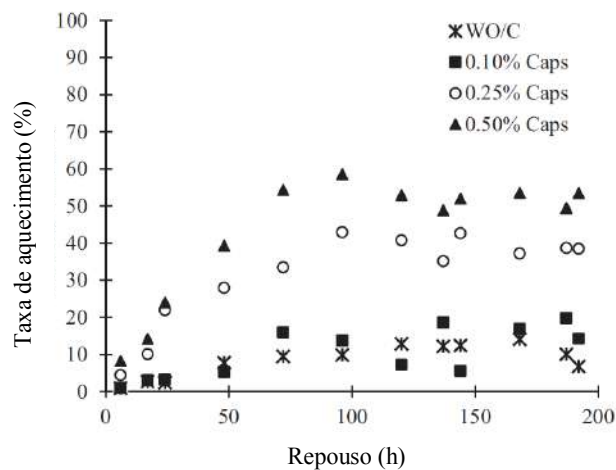


Figura 2.30- Variação da taxa de regeneração como o tempo (Al-Mansoori *et al.*, 2017)

Relativamente a análise a sensibilidade a água, provavelmente a reidratação do alginato de cálcio pode comprometer a preservação do óleo que se encontra no interior das cápsulas (Vreeker *et al.*, 2008). De igual modo o inchaço das cápsulas pode afetar a ligação ou aderência cápsula ao betume, mas os resultados mostraram que as cápsulas diminuem a suscetibilidade de dano por humidade na mistura betuminosa por 4,4%. A razão é que as cápsulas adaptam a sua forma a volta dos agregados e reduzem os vazios da mistura betuminosa.

De uma maneira geral verificou-se que as cápsulas de alginato afetam positivamente na compatibilidade, perda de partículas e nas propriedades de regeneração, enquanto que afetam negativamente no módulo de rigidez.

A fissura causa um desequilíbrio na estrutura do provete. Sendo assim, devido a presença das cápsulas que por sua vez facilitam a difusão do betume pela fissura, e baixam a viscosidade da mistura betuminosa, dá-se início ao processo de regeneração. Este processo termina quando a estrutura encontra um novo equilíbrio.

Jun Feng et al. 2016 (Su *et al.*, 2016), realizou um estudo experimental com o intuito de analisar mecanismos de regeneração do betume com adição de microcápsulas contendo rejuvenescedores. Neste estudo usou-se como material do revestimento da cápsula um polímero comercial de formaldeído – melanina modificado por metanol (o conteúdo sólido foi de 78,0%). O rejuvenescedor foi o óleo aromático (a densidade é de 0,922 g/cm³ e a viscosidade é de 4,33 Pa.s).

O betume envelhecido 40/50 foi misturado com amostras de microcápsulas diferentes usando um misturador de hélice por 30 min a 160 ° C com uma velocidade constante de 200 rot/ min.

Neste estudo feito por Jun Feng, foi usado uma nova configuração para avaliar a propagação da fissura e o comportamento de regeneração do betume puro denominado por ensaio BOEF. O ensaio é ilustrado na Figura 2.31. Este, compreende numa viga apoiada em duas peças retangulares de alumínio e betume entre as duas peças. A viga fica apoiada numa base de borracha de forma a simular um contacto e atrito completo. A fissura, causada a partir de uma carga colocada no meio da viga, surgiu a partir do ligeiro corte feito na mesma (Su *et al.*, 2016).

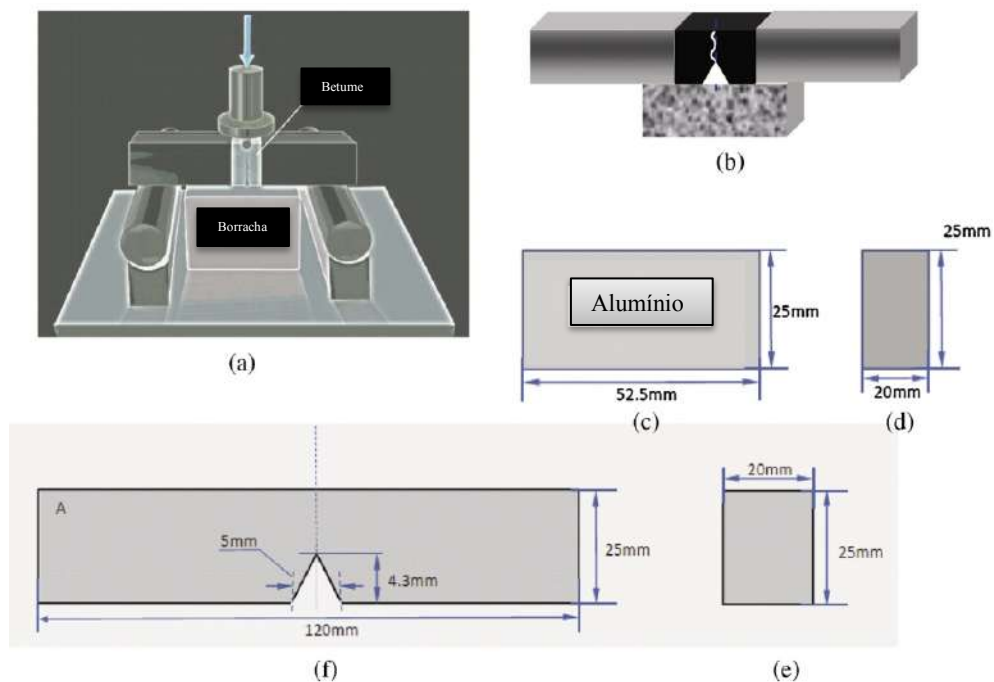


Figura 2.31- Configuração de viga em fundação elástica (BOEF) aplicado para medir a fissura e o comportamento de regeneração do betume, (a) Ilustração do modelo de ensaio, (b) Ranhura a meio vão da viga, (c) Dimensões da peça de alumínio, (d) Dimensões do bloco de betume, (e) Secção transversal da peça de alumínio e de betume, (f) Dimensões da ranhura no betume (Su *et al.*, 2016)

Salienta-se que a morfologia, o tamanho médio e a espessura do revestimento são os três parâmetros principais das microcápsulas. Neste estudo elas apresentam um tamanho médio entre 10 – 30 μm e uma espessura média entre 2,1 – 2,3 μm . Na Figura 2.32 é possível observar o estado de uma microcápsula contendo rejuvenescedor sob diferentes temperaturas entre 180 e 240°C. O revestimento desta microcápsula resistiu até a temperatura entre 180 e 200°C, cedendo deste modo para temperaturas superiores a estas (Su *et al.*, 2016).

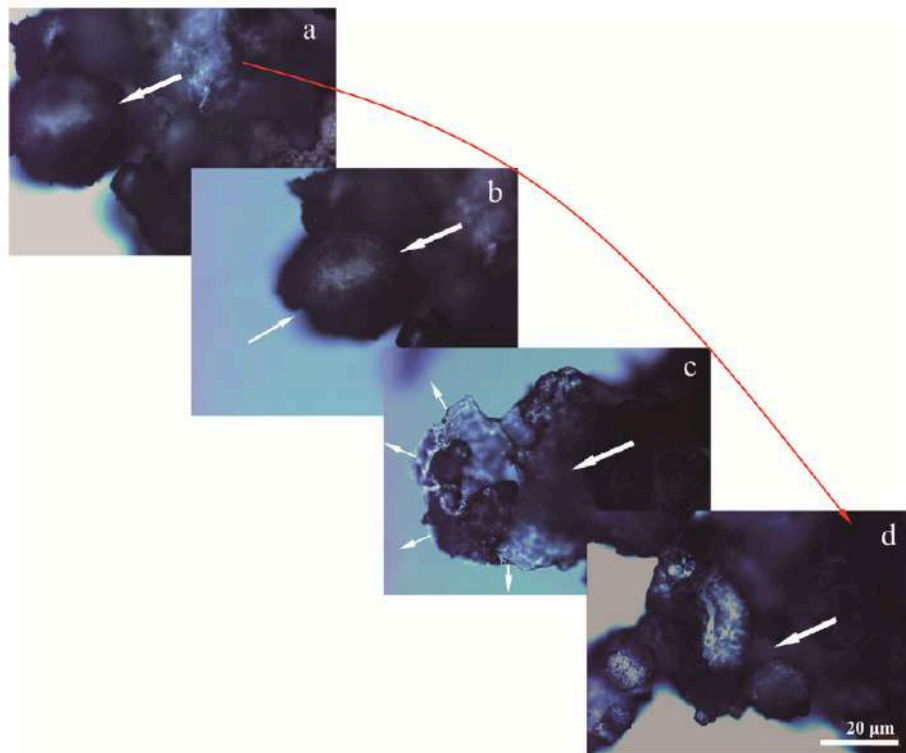


Figura 2.32- Morfologia das cápsulas contendo rejuvenescedores sob diferentes temperaturas (a) 180 °C, (b) 200 °C, (c) 220 °C, e (d) 240 °C (Su *et al.*, 2016)

Na Figura 2.33, pode-se observar que as microcápsulas foram distribuídas de forma homogênea no betume mantendo a sua forma original. Estas sobreviveram ao processo de mistura com o betume. Na Figura 2.33 (a) as microcápsulas resistem à temperatura do betume de 200°C por 10min. Quanto as figuras (b e c) mostram a morfologia das microcápsulas a 100°C e 20°C, em que quase todas as microcápsulas mantiveram a forma original sem decomposição térmica (Su *et al.*, 2016).

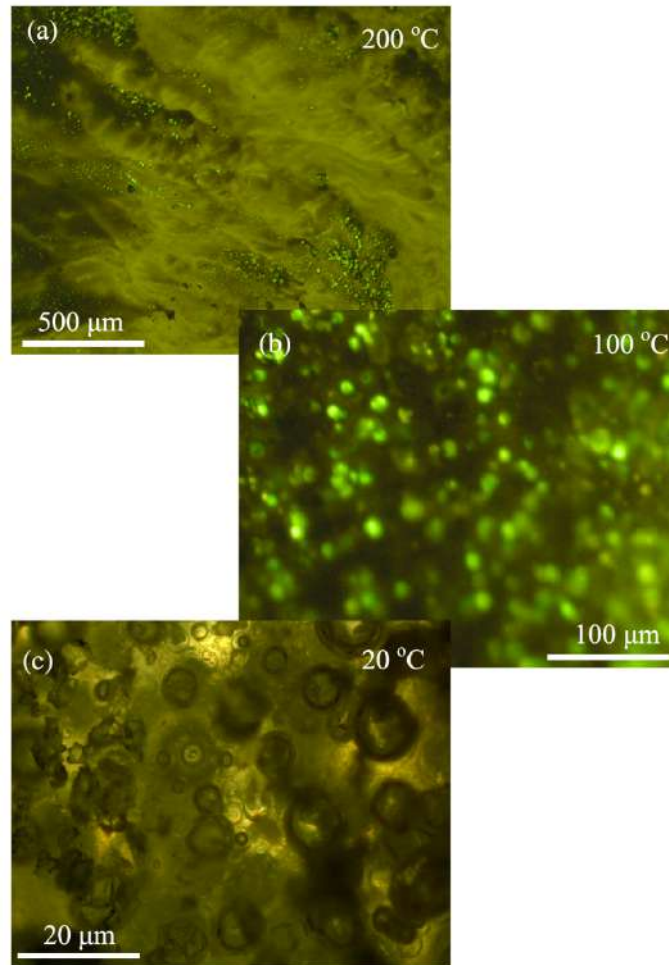


Figura 2.33- Microcápsulas distribuídas de forma homogênea no betume mantendo a sua forma original (Su *et al.*, 2016)

Foram feitos ensaios mecânicos de forma a verificar o comportamento regenerativos da mistura. Várias pesquisas têm mostrado que o comportamento regenerativo é geralmente dependente do tamanho da fissura (Qiu, 2012). Têm sido usados métodos numéricos e experimentais de forma a descobrir valores de estruturas fissuradas (Qiu, 2012; Su *et al.*, 2015). Com base nisto selecionou-se 4 níveis (0,2; 0,4; 0,6 e 0,8mm), que foram aplicados em betumes submetidos posteriormente a períodos de repouso. As fissuras foram geradas pelo método BOEF à temperatura de 0°C e 25°C, com uma velocidade de deslocamento de 0,02 mm/s (Su *et al.*, 2015).

O ensaio de carga – descarga – carga foi elaborado para provar a recuperação das propriedades mecânicas do provete.

Verificou-se que a capacidade de regeneração da resposta de recarga monotônica é dependente do tempo e da temperatura de regeneração (Su *et al.*, 2015). A Figura 2.34 (a) mostra as curvas de carga e deslocamento do ensaio BOEF a 0°C para amostras contendo 2,0% de microcápsulas e a Figura 2.34 (b) mostra o mesmo ensaio, mas à temperatura de 25°C. As curvas ① ② ③ ④ representam o primeiro,

segundo, terceiro e quarto ciclo de regeneração de carga e a ④ representa a curva de carga e deslocamento do betume envelhecido sem a incorporação de microcápsulas.

Para cada provete, houve um intervalo de 10 dias entre os ciclos de regeneração. A medida que se se aumentavam os ciclos de regeneração diminuía a carga aplicada aos provetes. O desempenho da recuperação elástica dos ciclos, foram relativamente idênticos. Para as curvas ① ② ③ a carga máxima aplicada foi além do valor da carga aplicada na curva ④.

De acordo com a Figura 2.35, os provetes com ciclo de regeneração à temperatura de ensaio de 25°C apresentaram uma velocidade de regeneração das fissuras superior relativamente aos provetes à temperatura de 0°C. O tempo de regeneração foi de 45, 23, 14, 10 e 7h durante os ciclos de regeneração de 1 a 5, respetivamente. Com este estudo é possível verificar a estabilidade térmica das microcápsulas bem como a sua contribuição na capacidade de regeneração da mistura betuminosa (Su *et al.*, 2016).

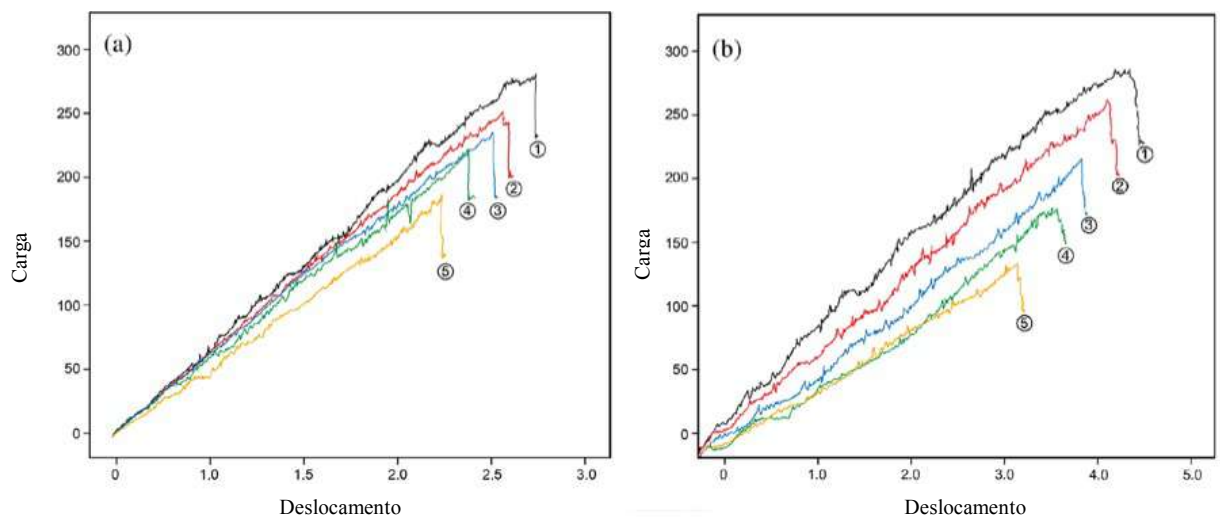


Figura 2.34- Curvas de carga – deslocamento do ensaio BOEF a 0°C (a) e 25°C (b) para os ciclos de regeneração e betume envelhecido (① primeiro ciclo, ② segundo ciclo, ③ terceiro ciclo, betume envelhecido e ⑤ quarto ciclo) (Su *et al.*, 2016)

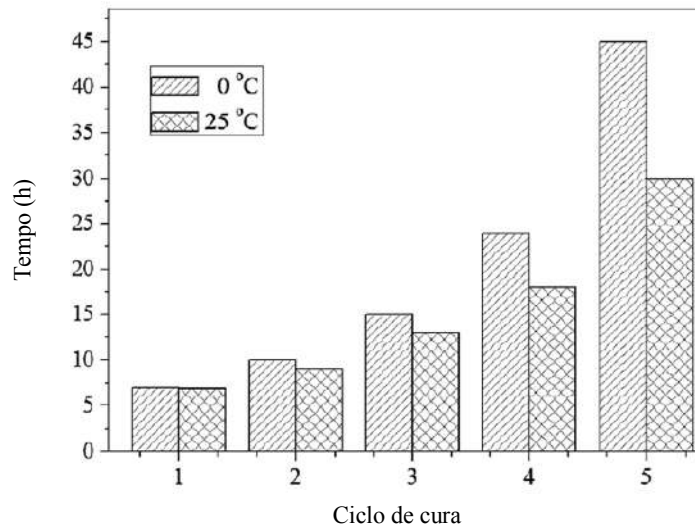


Figura 2.35- Tempo de regeneração e ciclo de cura (Su *et al.*, 2016)

Amir Tabakovic *et al.* (2017) (Tabaković *et al.*, 2017) desenvolveu uma tecnologia de regeneração do pavimento betuminoso, onde o rejuvenescedor é encapsulado dentro de fibras de alginato. As fibras são suficientemente resistentes termicamente e têm propriedades mecânicas capazes de se adaptarem durante o processo de mistura e compactação. Neste estudo, os investigadores encontraram uma relação ótima de rejuvenescedor/ alginato na fibra respectivamente de 70:30 (Figura 2.36) e uma quantidade ótima de fibras em relação a quantidade de betume da mistura de 5% respectivamente. Sendo assim, foi feita uma mistura betuminosa drenante com 5% de fibra de alginato (70:30) em que os resultados mostraram alta resistência, rigidez e melhores propriedades de regeneração em comparação com a mistura betuminosa sem fibras, e misturas contendo fibras com pouca quantidade de rejuvenescedores. Foram feitas fibras com diferentes taxas, nomeadamente de 0:10, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30 e 80:20 (Tabaković *et al.*, 2017).

O betume usado para a mistura foi um ligante betuminoso tradicional 70/100 (EN 13108-7). A mistura foi submetida a um processo de envelhecimento, antes da adição das fibras, de forma a simular o caso real do envelhecimento do pavimento. Sendo assim, neste estudo feito por estes investigadores pode-se dizer que 15 anos representam um envelhecimento de 4h a 135°C seguido de 4 dias a temperatura de 85°C em estufa. As fibras são adicionadas gradualmente durante o processo de mistura de maneira a não criar aglomerados. Após o processo de mistura as amostras foram compactadas de acordo com a norma EN 12697- 31:2007 usando o compactador giratório SERVOPAC. A pressão de compactação estática foi de 600 kPa com a velocidade angular de 30 rot/min e ângulo de 1,25°. É usado um certo número definido de rotações com o objetivo de controlar a compactação, neste caso, 100 rotações. Para esse estudo o provete cilíndrico é compactado até atingir a dimensão de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Depois da compactação, os provetes são deixados no molde para curar por 2h (Tabaković *et al.*, 2017).

Realizou-se o ensaio de módulo de rigidez por tração indireta (ITSM) e o ensaio de tração indireta (ITS), sendo ambos feitos à temperatura de 20°C (Tabaković *et al.*, 2017).

De forma a verificar a eficiência das fibras, foram feitos ensaios que tiveram o seguinte programa (Tabaković *et al.*, 2017):

- (1) Dois tipos de quantidades de fibras: 5% e 10%.
- (2) Ensaio: ITSM e ITS.
- (3) Temperatura de ensaio: 20°C.
- (4) Temperatura de cura ou regeneração: 20°C.
- (5) Tempo de cura ou regeneração: 20 e 40 h após o ensaio inicial.

Os ensaios tiveram a seguinte sequência que segue abaixo.

- (1). Os provetes são condicionados a temperatura de ensaio.
- (2) Ensaio ITSM diâmetro I e diâmetro II.
- (3) Repouso dos provetes por 2 h, de seguida faz-se o primeiro ensaio ITS.
- (4) Colocar o provete dentro do “anel de cura” por 2h.
- (5) Voltar a fazer o ensaio ITSM bem como o ensaio ITS.
- (6) Colocar o provete dentro do “anel de cura” por mais 18 h.
- (7) Ensaio preliminar ITSM.
- (8) Segundo ensaio ITS.
- (9) Colocar o provete dentro do “anel de cura” por mais 20 h.
- (10) Ensaio preliminar ITSM.
- (11) Terceiro ensaio ITS.

Neste estudo foram provocadas na mistura betuminosa fissuras e testou-se a eficiência da regeneração das amostras com e sem incorporação de fibras. Os resultados mostraram que a mistura betuminosa sem fibras pode curar as fissuras ou regenerar os danos. Todavia, as misturas betuminosas com fibras curavam os danos com mais rapidez. Os provetes sem fibras regeneravam-se em 6h enquanto que os provetes com fibras precisavam apenas de 2h para regenerar, ou seja, o processo de regeneração foi três vezes mais rápido. Pode-se dizer que estes resultados se verificaram dentro das condições de ensaio que foram adotadas para esse estudo. Estes resultados mostram que os rejuvenescedores podem aperfeiçoar a habilidade no processo de regeneração das misturas betuminosas (Tabaković *et al.*, 2017).

Os resultados da Figura 2.37 bem como na Figura 2.38 mostram o efeito das fibras e sua capacidade de regeneração. Os resultados também mostraram que grandes quantidades de fibra, não melhoram necessariamente o desempenho da mistura betuminosa (Tabaković *et al.*, 2016, 2017).

O grande objetivo é tornar o processo de regeneração das misturas betuminosas mais eficiente de maneira a diminuir os danos que normalmente aparecem.

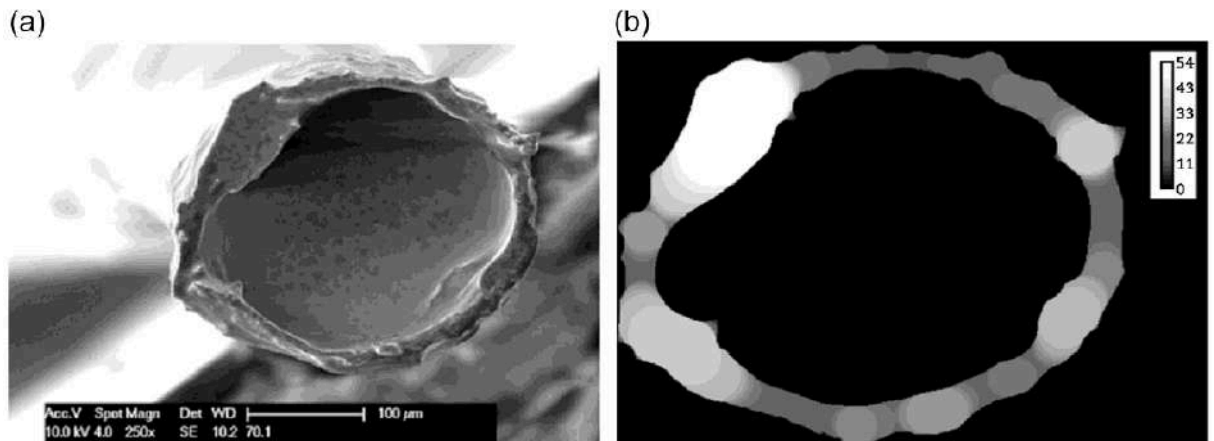


Figura 2.36- Análise da secção transversal da fibra com a taxa de rejuvenescedor/ alginato (70:30). (a) Imagem ESEM da secção transversal da fibra. (b) Parede e espessura do compartimento da fibra (Tabaković *et al.*, 2017)

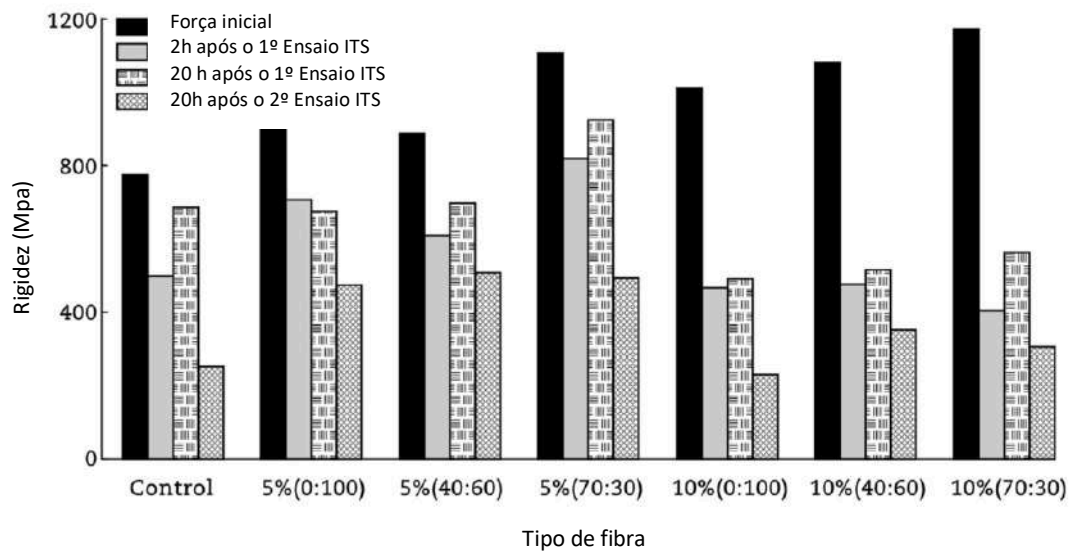


Figura 2.37- Efeito das fibras na rigidez da mistura de asfalto (Tabaković *et al.*, 2017)

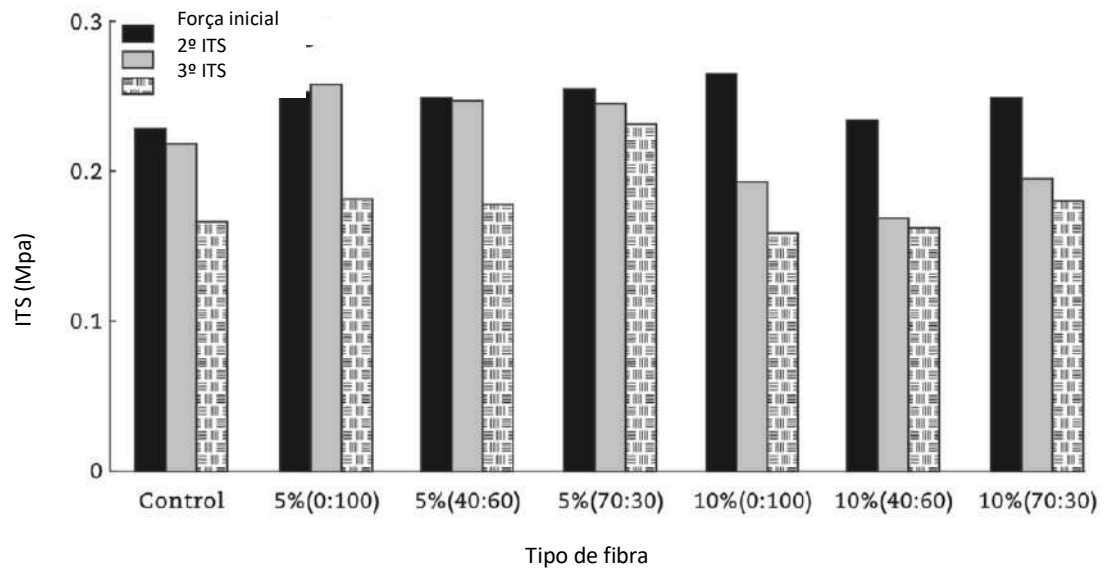


Figura 2.38- Efeito das fibras na resistência da mistura de asfalto (Tabaković *et al.*, 2017)

3. Programa experimental

3.1. Introdução

O programa experimental foi realizado na Unidade de Pavimentos e Materiais para Infraestruturas de Transporte (UPAVMAT) do Departamento de Transportes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O programa experimental teve como objetivo o estudo da auto-regeneração de misturas betuminosas com agentes encapsulados. Foi analisado o comportamento mecânico dos provetes de misturas betuminosas, com adição de cápsulas ou óleo de girassol. Deste modo, foram feitos ensaios de forma a verificar qual a recuperação destes provetes em carregamentos sucessivos. Para além disso, foi feito o ensaio de adesividade dos agregados com a adição de cápsulas ou óleo.

O ensaio experimental foi dividido em várias fases: determinação da afinidade entre o agregado e o betume, fabrico de provetes com cápsulas e sem cápsulas, caracterização dos provetes e por fim a avaliação do seu desempenho, através do ensaio de tração indireta.

Neste capítulo será realizada uma descrição breve dos materiais usados no programa experimental bem como de alguns dos ensaios laboratoriais utilizados para a caracterização das misturas betuminosas.

3.2. Materiais

Os materiais usados foram fornecidos por duas empresas, nomeadamente a Alves Ribeiro com os agregados, naturais e de origem calcária, e o betume pela Galp Energia. As cápsulas foram obtidas da Universidade de Nottingham.

3.2.1. Betume

Para efetuar o estudo foi usado um betume de penetração, classe 35/50. O betume usado neste estudo é considerado como sendo um betume de pavimentação e cumpre com o requisitos exigidos pela norma NP EN 12591- 2011 (E.P., 2014). As amostras foram fornecidas em dois lotes, com o mesmo tipo de betume 35/50, e verificadas pelo fornecedor. As características do betume selecionado para este estudo, encontram-se no Tabela 3.1, cumprindo desta forma com a mesma norma.

Tabela 3.1- Características do betume com penetração normal 35/50

| Características | Método | Unidade | 1º Lote | 2º lote | Limites |
|--|--------------------|--------------------|----------|----------|------------|
| Penetração a 25°C | EN 1426 | 0,1 mm | 46 | 41 | 35 - 50 |
| Temperatura de amolecimento | EN 1427 | °C | 51 | 51 | 50 - 58 |
| Viscosidade cinemática a 135°C | EN 12595 | mm ² /s | 554 t) | 554 t) | ≥ 370 |
| Solubilidade | EN 12592 | % | 100,0 t) | 100,0 t) | ≥ 99,0 |
| Ponto de inflamação (Vaso Aberto) | EN ISO 2592 | °C | 343 t) | 343 t) | ≥ 240 |
| Índice de Penetração | EN 12591 - Anexo A | - | -1,1 | -1,3 | -1,5 - 0,7 |
| Ponto de fragilidade de Fraass | EN 12593 | °C | -6 t) | -6 t) | ≤ -5 |
| Teor em parafinas | EN 12606 - 2 | % | < 3,0 t) | < 3,0 t) | ≤ 4,5 |
| Densidade | - | - | | | ~1,1 |
| Resistência ao envelhecimento a 163°C | | | | | |
| Penetração retida | EN 12607-1 | % | 81 t) | 81 t) | ≥ 53 |
| Aumento da temperatura de amolecimento | | °C | 2,8 t) | 2,8 t) | ≤ 11 |
| Variação de massa (valor absoluto) | | % | 0,0 t) | 0,0 t) | ≤ 0,5 |

Nota: t) valores típicos

3.2.2. Agregados

Os agregados fazem parte dos constituintes da mistura betuminosa, precisamente da parte sólida, representando deste modo cerca de 90 a 95% do seu peso e 75 a 85% do seu volume (Branco, Ferreira e Picado-Santos, 2011). Os agregados selecionados (Figura 3.1) para o fabrico da mistura betuminosa são de origem calcária, naturais e submetidos apenas ao processamento mecânico, e foram fornecidos em dois lotes. Portanto, para este estudo foram usadas as frações 12/20, 6/12 e 0/4 de natureza calcária e ainda filer recuperado, designação dada a todo agregado em que a maior parte passa pelo peneiro de 0,063 mm. Os agregados foram selecionados de acordo com os requisitos da norma NP EN 13043- 2004, esquartelados e armazenados em estufa (E.P., 2014).



Figura 3.1- Composição da mistura de agregados (Frações de calcário e filer)

3.2.3. Cápsulas

As cápsulas utilizadas para este estudo foram fabricadas na Universidade de Nottingham. Estas são cápsulas de alginato de cálcio, Figura 3.2, com um diâmetro médio de 2,9 mm contendo óleo de girassol. O fluido, neste caso o óleo de girassol, é aprisionado na estrutura polimérica obtida durante a reação do alginato de cálcio com íons de cálcio. Os materiais usados para o fabrico das cápsulas foram o (1) Alginato de Sódio ($C_6H_7O_6Na$), (2) Cloreto de Cálcio ($CaCl_2$) e (3) Óleo de girassol (Al-Mansoori *et al.*, 2017; Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016). As propriedades das cápsulas encontram-se no Tabela 3.2 e na Figura 3.3 é ilustrado a fase de preparação da quantidade das mesmas para o fabrico de cada provete.



Figura 3.2- Cápsulas de alginato de cálcio contendo óleo de girassol



Figura 3.3- Preparação da quantidade de cápsulas para o fabrico de cada provete

Tabela 3.2- Propriedades das cápsulas de alginato de cálcio (Al-Mansoori *et al.*, 2017; Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016)

| Propriedades | Unidades | Valores |
|----------------------------------|----------|---------|
| Diâmetro médio | mm | 2,9 |
| Força de compressão | | |
| 20°C | N | 21,9 |
| 130°C | N | 12,0 |
| Conteúdo em óleo | % | 48,0 |
| Perda de massa com a temperatura | | |
| 100°C | % | 0,7 |
| 200°C | % | 2,9 |

3.2.4. Fabrico e compactação de misturas betuminosas

Trata-se de uma mistura betuminosa a quente (MBQ) e de acordo com o Anexo Nacional da NP EN 13108-1:2011 é uma mistura do tipo AC 20 base 35/50 (MB) (E.P., 2014). Conforme o estudo de formulação, foi calculada a percentagem ótima de betume para a mistura com o valor de 4,7% corresponde ao estudo pelo método Marshall. Este estudo de formulação, cuja metodologia está descrita no Anexo Nacional da NP EN 13108-1:2011 Formulação de misturas betuminosas, para além de

permitir calcular a percentagem ótima de betume, permite também determinar as grandezas mecânicas da mistura betuminosa. Os resultados finais apresentados através do estudo de formulação encontram-se no Tabela 3.3, bem como a curva granulométrica das frações da mistura (Figura 3.4) e da mistura dos agregados, que se encontra na Figura 3.5. Obtidas as quantidades necessárias da mistura, finalmente são fabricadas as amostras com o auxílio do compactador giratório.

De acordo com o estudo de formulação, a composição adotada para esta mistura segue-se abaixo:

- Fração 12/20 mm 20%
- Fração 6/12 mm 28%
- Fração 0/4 mm (calcário) 25%
- Fração 0/4 mm (basalto) 24%
- Filer Recuperado 3%
- Betume 4,7%

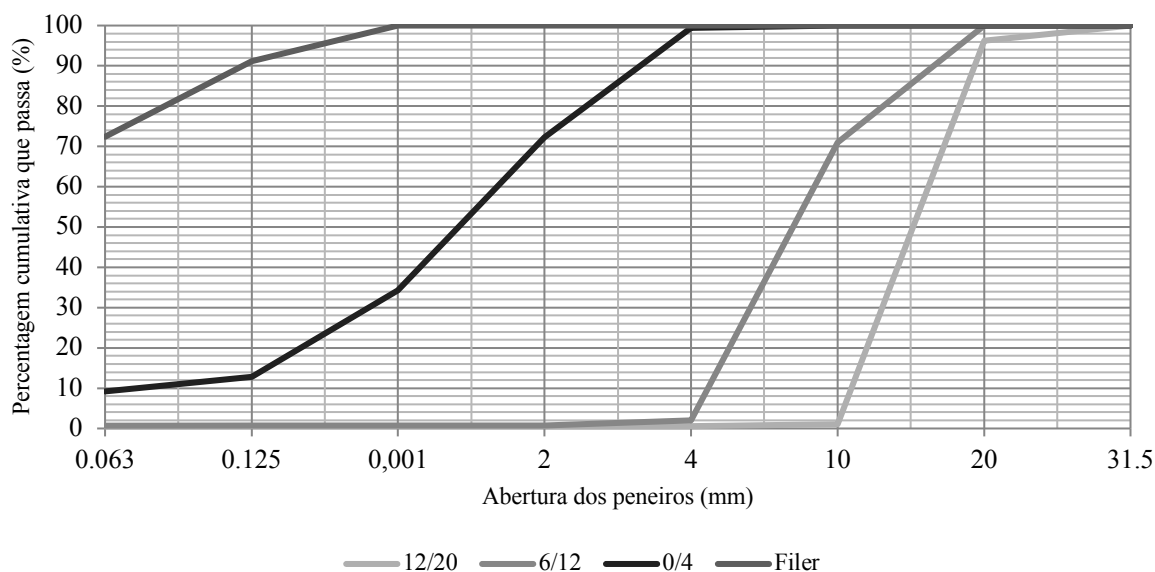


Figura 3.4- Curvas granulométricas das frações da mistura

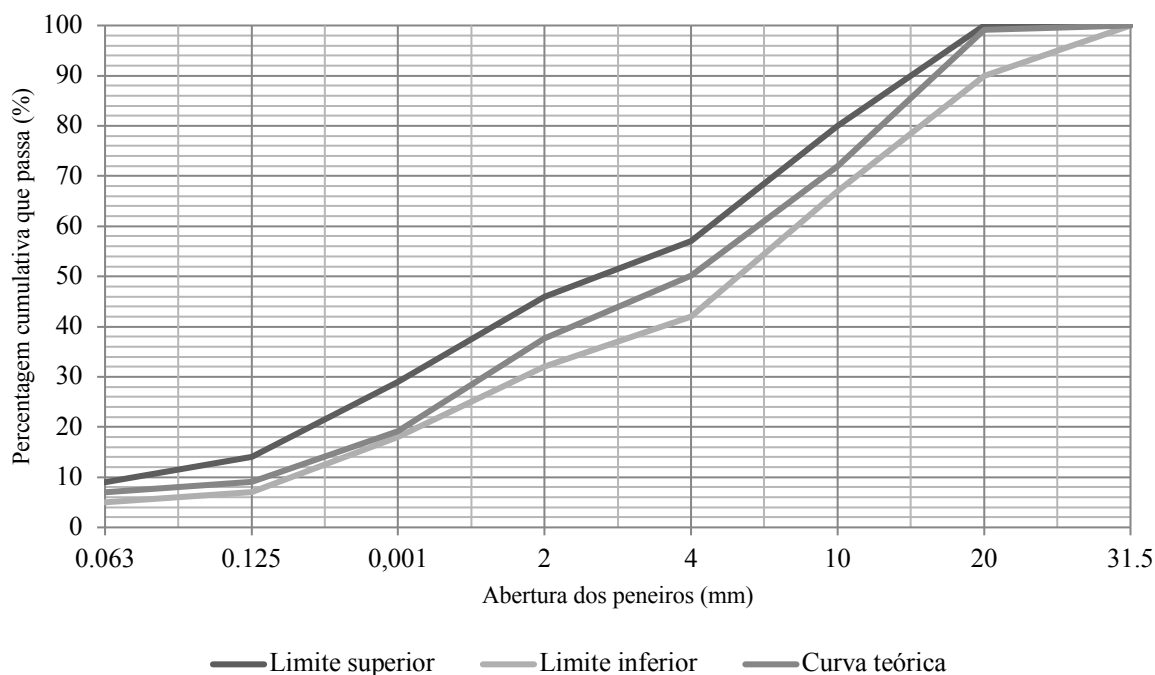


Figura 3.5- Curva granulométrica da mistura de agregados

Tabela 3.3- Características da mistura betuminosa a partir do estudo Marshall

| Características da mistura betuminosa | Unidades | Valores C.E | Valores obtidos |
|---------------------------------------|-------------------|-------------|-----------------|
| Baridade da mistura | g/cm ³ | - | 2,46 |
| Porosidade | % | 3 - 6 | 3,6 |
| Estabilidade (Força de rotura) | kN | 7,5 - 15 kN | 13,8 |
| Deformação | mm | 2 - 4 | 3,0 |
| Quociente Marshall | kN/mm | Qmin2,5 | 4,6 |
| Resistência conservada | % | ≥ 80 | 93,0 |
| Sensibilidade à água ITSR | % | - | 87 |
| Vazios na mistura de agregados (VMA) | % | >14 | 14,8 |
| Porcentagem de ligante betuminoso | % | - | 4,7 |

A mistura betuminosa usada para o programa experimental é constituída por agregado calcário e betume 35/50 respetivamente, não fazendo parte o agregado basalto. De modo que a fração 0/4 mm foi apenas de calcário constituindo assim 49% da quantidade da mistura de agregados.

Foram fabricados três tipos de misturas betuminosas distintas. No Tabela 3.4, Tabela 3.5 e Tabela 3.6, são apresentadas as quantidades usadas na composição da mistura betuminosa, com incorporação de cápsulas e com incorporação de óleo. Para este estudo experimental usou-se 0,5% de cápsulas relativamente a massa total da mistura betuminosa (10,7% da massa de betume).

Foi aplicado 0,1% de óleo, para o caso da mistura sem adição de cápsulas, que representa a quantidade de óleo que se estima ser libertado durante a produção da mistura betuminosa com cápsulas.

A partir da análise termo gravimétrica (*Thermogravimetric analysis* - TGA) conseguiu-se saber que as cápsulas possuem 48% de óleo (Tabela 3.2) e por análise química *Fourier Transform Infrared spectroscopy* (FTIS) conseguiu-se observar que 16% é perdido (Micaelo, Al-mansoori e Garcia, 2016).

Tabela 3.4- Quantidades da mistura betuminosa com cápsulas

| Materiais | % | Massa parcial | Massa acumulada |
|-----------|------|---------------|-----------------|
| | | [g] | [g] |
| 0/4 | 46,5 | 445,30 | 445,30 |
| 6/_12 | 26,6 | 254,5 | 699,8 |
| 12/_20 | 19,0 | 181,8 | 881,6 |
| Filler | 2,8 | 27,3 | 908,9 |
| Betume | 4,7 | 44,8 | 953,7 |
| Cápsulas | 0,5 | 4,8 | 958,5 |

Tabela 3.5- Quantidades da mistura betuminosa com óleo

| Materiais | % | Massa parcial | Massa acumulada |
|-----------|------|---------------|-----------------|
| | | [g] | [g] |
| 0/4 | 46,7 | 450,9 | 450,9 |
| 6/_12 | 26,7 | 257,6 | 708,5 |
| 12/_20 | 19,0 | 184 | 892,5 |
| Filler | 2,9 | 27,6 | 920,1 |
| Betume | 4,7 | 45,4 | 965,5 |
| Óleo | 0,1 | 0,5 | 966,0 |

Tabela 3.6- Quantidades da mistura betuminosa

| Materiais | % | Massa parcial | Massa acumulada |
|-----------|------|---------------|-----------------|
| | | [g] | [g] |
| 0/4 | 46,7 | 450,9 | 450,9 |
| 6/_12 | 26,7 | 257,6 | 708,5 |
| 12/_20 | 19,1 | 184 | 892,5 |
| Filler | 2,9 | 27,6 | 920,1 |
| Betume | 4,7 | 45,4 | 965,5 |

Para o fabrico dos provetes usados neste programa experimental, utilizou-se o compactador giratório ilustrado na Figura 3.6. Optou-se pelo compactador giratório, porque diferente do compactador por impacto, este solicitaria menos as cápsulas na fase de fabrico dos provetes. Alguns autores indicam que o método de compactação deste aparelho permite obter provetes com um comportamento

semelhante ao pavimento em obra (Khan *et al.*, 1998; Peterson, Robert L.; Mahboub, Kamyar C.; Anderson, R. Michael; Masad, Eyad; Tashman, 2004). Este compactador foi usado na metodologia SUPERPAVE Giratory Compactor (SGC), para formulação de misturas betuminosas (Micaelo, 2008).



Figura 3.6- Compactador giratório Troxler Electronic

O compactador giratório é um aparelho que tem como objetivo final a compactação de misturas betuminosas em moldes cilíndricos. De acordo com a norma EN 12697-31, o processo de compactação é feito a partir da combinação de uma ação de corte rotativo e uma força resultante vertical (Costa, 2015). A mistura betuminosa é colocada dentro do molde cilíndrico, de seguida à compactação é obtida a partir da ação simultânea de uma compressão estática de baixo, e da ação de corte resultante do movimento de eixo do molde, mantendo as extremidades do provete perpendiculares ao eixo (Figura 3.7). Existem disponíveis dois tipos de molde metálicos, nomeadamente de 100 mm e de 150 mm de diâmetro interno, sendo que para este estudo foi usado o primeiro (Figura 3.8).

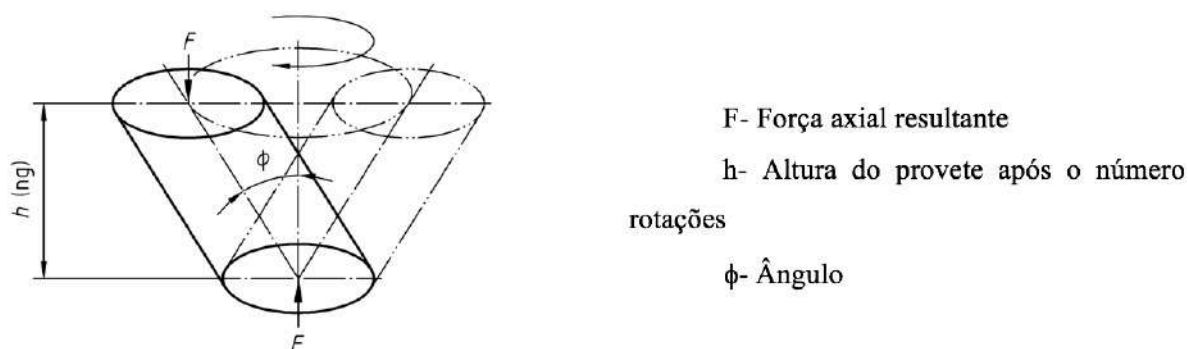


Figura 3.7- Diagrama do movimento de compactação do provete (EN 12697-31)

É indispensável calibrar o aparelho devidamente e com regularidade, de acordo com o manual de operação e manutenção do compactador giratório modelo 4140, de modo que as misturas compactadas apresentem características semelhantes uma das outras (Troxler Electronic Laboratories, 2006). Deste modo, é necessário calibrar primeiro a pressão, de seguida o ângulo de rotação e por último a altura (Troxler Electronic Laboratories, 2006). Mesmo com parâmetros de valor igual, a experiência mostra que aparelhos de diferentes fabricantes, podem apresentar compactações diferentes (FHWA, 2010).

De acordo com a EN 12697-31 é aconselhável a utilização de uma pressão de 600 ± 18 kPa, uma velocidade de rotação de $30 \pm 0,5$ rpm e um ângulo interno efetivo de $1,16 \pm 0,02$ °. A mesma norma prescreve que para o betume 35/50 a temperatura de compactação é de 160°C .

Foram adotados para este estudo, o fabrico de provetes (Figura 3.9) com os seguintes parâmetros:

- 50 mm de altura,
- 100 mm de diâmetro,
- 200 rotações,
- 600 kpa.

Com o auxílio de um termómetro a laser foi controlada a temperatura da mistura betuminosa desde o processo de fabrico, na misturadora, até à colocação no molde cilíndrico. Neste compactador o molde não é pré-aquecido, entretanto, a temperatura da mistura começa a baixar a partir do momento em que entra em contacto com o mesmo.

De acordo com os parâmetros adotados foram fabricados os provetes de modo que, o compactador dava por fabricado o provete ao fim das 200 rotações ou quando se atingisse os 50 mm de altura. Devido a limitação do número de moldes, não foi possível moldar um número considerável de provetes num só dia. Conseguiu-se notar que a partir do segundo provete ou do terceiro, no grupo de provetes do dia, o processo de compactação era mais rápido porque o molde não estava completamente frio. Apesar disto, os resultados do ensaio de baridade mostraram-se semelhantes.

Foram fabricados três grupos de provetes distintos, nomeadamente provetes de misturas betuminosas (MB), com adição de cápsulas (MBC) e com adição de óleo (MBO). Para este estudo, foram fabricados precisamente 50 provetes do tipo MBC, 88 MBO e 3 provetes do tipo MB.



Figura 3.8- Fases do processo de fabrico da mistura betuminosa com cápsulas de alginato de cálcio



Figura 3.9- Provede cilíndrico com cápsulas de alginato de cálcio com 100mm de altura e 50mm de diâmetro

3.3. Ensaios laboratoriais

No programa experimental, ilustrado na Figura 3.10, foram realizados ensaios laboratoriais com o intuito de se verificar o desempenho das misturas betuminosas, nomeadamente o ensaio de adesividade, e o comportamento mecânico dos provetes através da resistência à tração. Para isso foi necessário verificar a afinidade entre o agregado e o betume, as propriedades volumétricas dos provetes e por fim o ensaio à tração indireta.

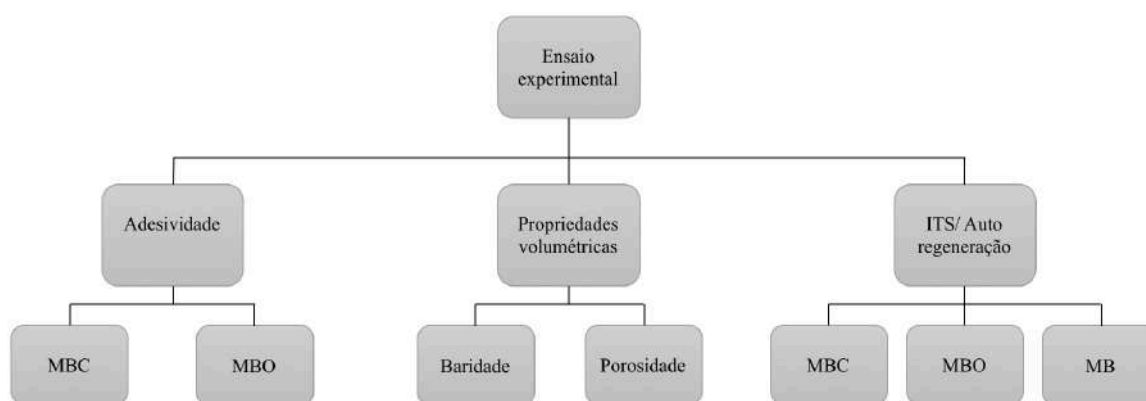


Figura 3.10- Ensaios laboratoriais do programa experimental

3.3.1. Adesividade

Para este ensaio foi usado o procedimento descrito na norma EN 12697-11 de forma a determinar a afinidade entre o agregado e o betume. Deste modo, foi feito o ensaio de afinidade (Figura 3.11) para a mistura betuminosa contendo óleo (Figura 3.12) bem como para a mistura betuminosa contendo cápsulas (Figura 3.13), de forma a analisar, comparativamente o seu comportamento. De acordo com a norma EN 12697-11 o ensaio consiste em determinar a afinidade entre o agregado e o betume a partir de um registo visual da percentagem de betume que cobre as partículas de agregado após a influência da agitação mecânica na presença de água. De acordo com a mesma norma, o ensaio de adesividade pode ser usado para avaliar o efeito da humidade com ou sem agentes adesivos incluindo líquidos, como aminas e fileres, tais como cal hidratada ou cimento, e o efeito de humidade em diferentes agregados para o mesmo ligante. A ação da água é compreendida como um dos principais fatores que compromete a durabilidade das misturas betuminosas, sendo a perda por adesividade um dos mecanismos de degradação da mistura (Terrel e Al-Swailmi, 1994).

No ensaio de adesividade o agregado é peneirado de acordo com a norma EN 12697-2. A fração passada no peneiro 11,2 mm é retida no peneiro de 8 mm e de seguida é lavada. A amostra de agregados

é colocada em estufa a uma temperatura controlada, de maneiras a manter o agregado a $110\pm 5^\circ\text{C}$ de formas a secar completamente e posteriormente ser feita a mistura com o betume. A amostra de betume é colocada em estufa durante 3h a 150°C .

A norma prescreve as quantidades para mistura betuminosa, respetivamente 600g para os agregados e 16g para o betume sendo ambas as quantidades com precisão de $\pm 0,2\text{g}$. As quantidades de material utilizadas no ensaio, agregado e betume, indicadas na norma seguida, EN 12697-11 correspondem a uma quantidade de 3% de betume. As quantidades usadas para esta mistura, tendo em conta a presença do óleo e das cápsulas, encontram-se no Tabela 3.7.

Com base nas quantidades apresentadas pelo Tabela 3.7 foram feitas as misturas betuminosas, assegurando a temperatura no processo da mistura de acordo com a norma. Logo após a mistura, os agregados devidamente envolvidos pelo betume foram divididos em três tabuleiros cobertos de silicone para que o agregado não aderisse às paredes do tabuleiro. Depois disto, o material é armazenado por 24h, sendo que a norma prescreve que o agregado envolvido com o betume deve ser armazenado num período de 12h a 64h a temperatura ambiente (20 ± 5) $^\circ\text{C}$, evitando deste modo a presença a luz solar e a contaminação com poeiras.

Após o repouso de 24h o material foi dividido em três amostras com aproximadamente a mesma massa. Colocou-se cada amostra na respetiva garrafa, fazendo um total de três garrafas, com água destilada a uma temperatura de (5 ± 2) $^\circ\text{C}$. Salienta-se que a baixa temperatura da água destilada evita que os agregados se agrupem antes de começarem a rolar as garrafas.

Foram usadas três garrafas (Figura 3.11), como se referiu anteriormente, de alta resistência ao desgaste com capacidade aproximadamente de 500ml e equipadas com tampa roscada de aperto hermético, com varas de vidro de 30 ± 10 mm de comprimento e 6 ± 1 mm de diâmetro para melhor rolamento e para evitar a formação de grânulos dos agregados.

Tabela 3.7- Quantidades da mistura betuminosa para ensaio de adesividade

| Materiais | % | Massa parcial | | Massa acumulada | |
|-----------------|----------|---------------|----------|-----------------|----------|
| | | Sem cap. | Com cap. | Sem cap. | Com cap. |
| | | [g] | [g] | [g] | [g] |
| 8/11,2 | 100 | 600 | 600 | 600,00 | 600,00 |
| Betume | 100 | 15,68 | 13,00 | 615,68 | 613,00 |
| Óleo / Cápsulas | 0,5/10,8 | 0,32 | 3,00 | 616,00 | 616,00 |



Figura 3.11- Ensaio de adesividade – Garrafas em rolamento

De acordo com a norma EN 12697-11, para betumes com penetração a 25°C igual ou inferior a 100 1/ 10 mm, a velocidade deve ser de 60 rot/min \pm 10%. Depois de começar a rolar as garrafas na máquina de rolamento, é necessário certificar que estas não estejam expostas a luz solar e assegurar que a temperatura da sala de ensaio esteja entre 15°C a 25°C. Garantidas todas condições, dá-se início ao ensaio. Deve-se parar o processo de rolamento após 6h \pm 15min, 24h, 48h e 72h. Antes de voltar ao processo de rolamento é necessário trocar a água destilada e estimar de forma visual a percentagem de betume que reveste o agregado fazendo de seguida o seu devido registo.

Para estimar a percentagem de betume que reveste o agregado, são necessários dois operadores qualificados, que observam cada etapa do ensaio e assim determinam individualmente qual a percentagem de betume que reveste o agregado das três amostras.



Figura 3.12- Ensaio de adesividade – Agregados com óleo, antes (A) e após 72h (B) de rolamento

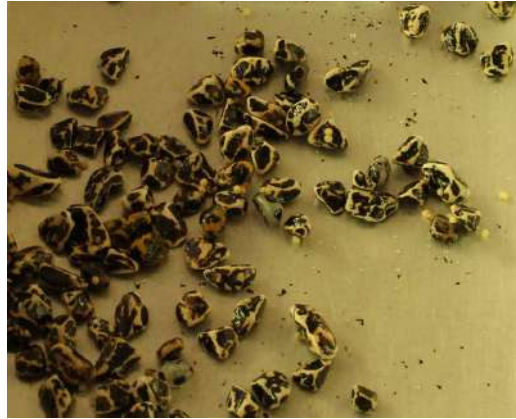


Figura 3.13- Ensaio de adesividade – Agregados com cápsulas, após 72h de rolamento

3.3.2. Propriedades volumétricas dos provetes

Após o fabrico dos provetes foi preciso caracteriza-los a partir do ensaio de baridade dos mesmos, de acordo com a norma EN12697-6, método B - provete saturado com superfície seca (SSD). A baridade é a massa por unidade de volume de um provete, tendo em conta os vazios preenchidos pelo ar e a temperatura de ensaio. O método B é recomendado à medição de provetes de granulometria densa, com um nível de drenagem lenta ou um nível de absorção de água reduzido. Deste modo, o ensaio teve o seguinte procedimento:

- Determinar a massa do provete seco (m_1),
- Determinar a massa volúmica da água à temperatura de ensaio com aproximação a $0,1 \text{ Kg/m}^3$ (ρ_w),
- Mergulhar o provete numa caixa com água a uma temperatura conhecida e deixa-lo saturar, pelo menos por 30min ou até a massa do provete não alterar mais, Figura 3.14,
- Determinar a massa do provete saturado, quando mergulhado em água (m_2),
- Remover o provete da água, secar a superfície e voltar a pesar. Como se trata de um provete denso, não foi necessário mudar de método de ensaio, nesse caso para o método C, porque o provete não drenava. O método C é recomendado à medição de provetes de granulometria densa, com nível de vazios até 15%. Deste modo, obteve-se a massa do provete saturado (m_3).

A baridade do provete foi calculada com os dados acima descritos, a partir da seguinte fórmula.

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$$

A porosidade dos provetes foi calculada com base na norma EN 12697-8, usando deste modo, a baridade máxima teórica da mistura e a baridade dos provetes.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m}$$

Onde,

V_m Porosidade da mistura (%)

ρ_m Baridade máxima teórica (Mg.m^{-3})

ρ_b Baridade do provete (Mg.m^{-3})

Deste modo foi possível controlar a qualidade dos provetes fabricados mediante a baridade dos mesmos bem como a percentagem de porosidade, apresentadas pelo estudo de formulação, como se pode verificar no Tabela 3.3.



Figura 3.14- Determinação da baridade dos provetes com e sem cápsulas

3.3.3. Ensaio mecânico – Ensaio de tração indireta

A resistência à tração indireta aplica-se a provetes cilíndricos, sendo estes solicitados diametralmente à rotura, em condições definidas de temperatura e de carregamento a taxa constante de compressão (Figura 3.15). A norma EN 12697-23 refere que a resistência à tração indireta é o esforço de tração máximo calculado a partir da rotura do provete. De acordo com a mesma norma, os provetes usados neste tipo de ensaio podem ser fabricados pelo compactador giratório, conforme o presente caso de estudo, pelo compactador de impacto ou ainda por carotes extraídas de um pavimento.

Neste estudo, o efeito das cápsulas contendo rejuvenescedores foi avaliado através da recuperação mecânica em ensaios sucessivos de tração indireta. Entre os dois ensaios realizados sobre o mesmo provete, houve um período de repouso de duração variável em condições de temperatura constante. As mesmas condições de ensaio foram avaliadas em provetes de misturas betuminosas com e sem incorporação de cápsulas. De igual forma, foi ainda estudado o efeito do carregamento, simulando

o tráfego rodoviário sobre pavimentos fissurados, nos provetes após o primeiro ensaio mecânico. Este ensaio consistiu na aplicação de uma carga estática de compressão sobre o provete confinado no molde de compactação.

Durante a execução do programa experimental foram utilizados dois procedimentos distintos (método I e II) na preparação do provete após o primeiro ensaio mecânico. No método I, devido ao dano elevado observado no provete, e para possibilitar a aplicação da carga axial sobre o mesmo, foi usado o estabilómetro para diminuir a deformação no eixo perpendicular ao da aplicação da carga sobre o mesmo (Figura 3.16). No método II os provetes cilíndricos não foram submetidos a danos elevados, não tendo sido necessário o uso do estabilómetro.

No método I foram utilizados apenas provetes MBO, sendo estes submetidos ao ensaio de tração indireta à temperatura de 20°C. De seguida, os provetes foram condicionados a um tempo de repouso de 24h, à temperatura de 20°C. Após o ensaio de tração indireta (1º ITS) foi aplicado aos provetes uma carga axial de 5kN, de forma a simular a carga que o pavimento sofre após o surgimento de uma fissura. Por fim, foi calculada a taxa de recuperação a partir do segundo ensaio de tração indireta (2º ITS) aplicado aos mesmos provetes.

No método II os provetes foram submetidos a diferentes temperaturas de ensaio, -14, 10 e 20°C, bem como a diferentes tempos de repouso, nomeadamente, 24h, 72h e 96h. Após o primeiro ensaio de tração indireta foi aplicado aos provetes diferentes cargas axiais, respetivamente de 0kN, 5,0kN, 7,5kN, ou 10kN. Por fim, os mesmos provetes foram submetidos ao segundo ensaio de tração indireta (2º ITS) de forma a calcular a taxa de recuperação que a mistura betuminosa pode atingir.

As amostras, formadas por 3 provetes, foram agrupadas quanto a:

- Temperatura de ensaio de tração indireta (1º ITS)
- Carga a aplicar sobre o provete após o ensaio de tração indireta
- Período de repouso
- Temperatura de ensaio de tração indireta (2º ITS)

O ensaio de tração indireta teve a seguinte sequência (Figura 3.17):

Método I

- (1) Provetes condicionados à temperatura de ensaio.
- (2) Primeiro ensaio ITS (1º ITS).
- (3) Aplicação do “anel” ao provete por 5min.
- (4) Aplicação de uma carga axial ao provete durante 5min.
- (5) Repouso dos provetes a temperatura e ao tempo de ensaio.
- (6) Segundo ensaio ITS (2º ITS).

Método II

- (1) Provetes condicionados à temperatura de ensaio.
- (2) 1º ITS.
- (3) Aplicar uma carga axial ao provete durante 5min.
- (4) Repouso dos provetes a temperatura e ao tempo de ensaio.
- (5) 2º ITS.

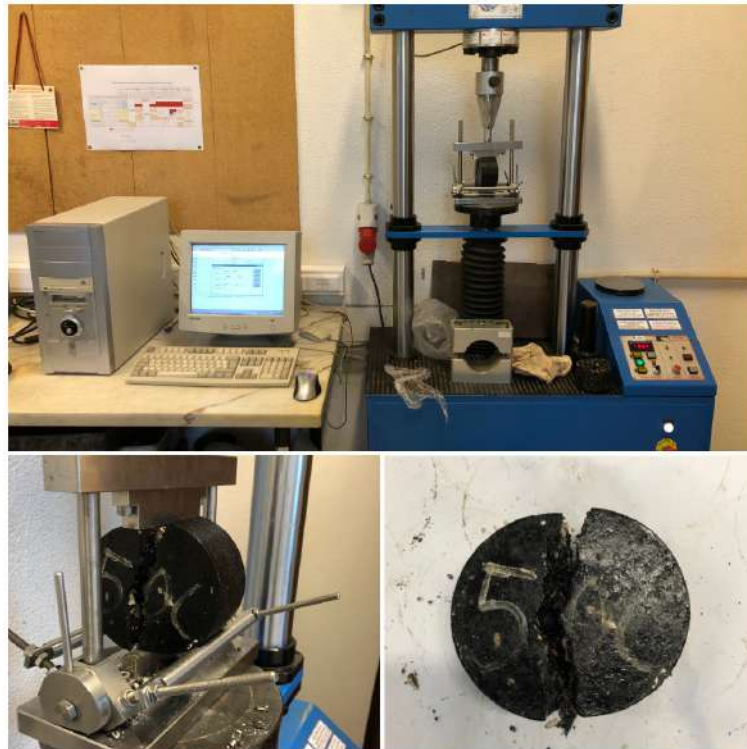


Figura 3.15- Ensaio de tração indireta do provete cilíndrico



Figura 3.16- Estabilómetro para o ensaio Marshall



Figura 3.17- Sequência do ensaio de tração indireta e regeneração das misturas betuminosas

4. Resultados e discussão

4.1. Considerações gerais

Neste capítulo serão descritos e discutidos os resultados obtidos nos ensaios para a avaliação da afinidade entre o agregado e o betume, realizado com adição de cápsulas ou de óleo, às propriedades volumétricas dos provetes compactados e os resultados do ensaio de tração indireta.

4.2. Avaliação da adesividade agregado – ligante

Na Figura 4.1 são apresentados os valores médios do ensaio de afinidade após 6h, 24h, 48h e 72h de rolamento, para o caso de misturas betuminosas contendo cápsulas ou óleo.

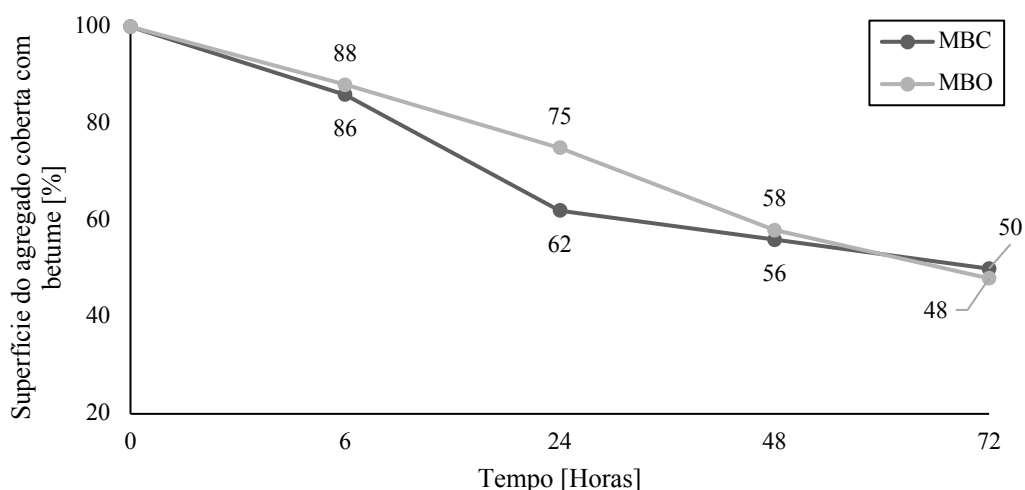


Figura 4.1- Afinidade entre o agregado, betume contendo cápsulas ou óleo

Constatou-se uma grande semelhança nos resultados apresentados, sendo a mistura betuminosa contendo óleo (MBO) a que apresenta resultados mais elevados, comparativamente com a mistura betuminosa contendo cápsulas (MBC), exceto no caso do valor médio obtido após 72h de rolamento. Apesar das pequenas diferenças nas percentagens de superfície do agregado coberta com betume em ambas as misturas, no final do ensaio os valores foram cerca de 50%.

Não foi verificada nenhuma perda elevada de ligação entre o agregado e o betume em ambas as misturas betuminosas. A perda de ligação foi gradual e constante, o que é um aspeto positivo (Lameirão Correia, 2016).

Lameirão Correia, 2016 estudou misturas betuminosas em que aplicou diferentes aditivos. Os resultados de adesividade agregado - betume apresentaram a mesma tendência, terminando com percentagens de superfície do agregado coberta com betume próximas de 50% (Lameirão Correia, 2016).

Anexo B encontram-se os resultados do ensaio da mistura betuminosa contendo cápsulas e da mistura betuminosa contendo óleo.

A afinidade ligante-agregado é uma propriedade referida no Caderno de encargos tipo-obra da Infraestruturas de Portugal, contudo não é apresentada nenhuma limitação ou valor de referência. Apenas refere que deve ser uma propriedade a declarar aquando da caracterização da mistura betuminosa.

4.3. Propriedades volumétricas dos provetes

Os valores médio, mínimo e máximo para a baridade e porosidade dos provetes compactados encontram-se no Tabela 4.1. O valor da baridade dos provetes de mistura betuminosa com cápsulas (MBC) variou entre 2,43 e 2,47 Mg/m³, dos provetes de mistura betuminosa com óleo (MBO) variou entre 2,40 e 2,48 Mg/m³ e por último a baridade dos provetes de mistura betuminosa (MB) que esteve entre 2,46 a 2,47 Mg/m³. Relativamente à porosidade, a percentagem apresentada pelos provetes MBC variou entre 3,31 e 4,79%, dos provetes MBO variou entre 2,87% e 5,91% e dos provetes MB em que a porosidade variou entre 3,29% e 3,53%.

Tabela 4.1- Valores médios, mínimos e máximos das propriedades volumétricas dos provetes

| Propriedades | Média | Mínimo | Máximo |
|--|-------|--------|--------|
| Baridade dos provetes MBC (Mg/m ³) | 2,46 | 2,43 | 2,47 |
| Baridade dos provetes MBO (Mg/m ³) | 2,37 | 2,40 | 2,48 |
| Baridade dos provetes MB (Mg/m ³) | 2,46 | 2,46 | 2,47 |
| Porosidade dos provetes MBC (%) | 3,68 | 3,31 | 4,79 |
| Porosidade dos provetes MBO (%) | 3,28 | 2,87 | 5,91 |
| Porosidade dos provetes MB (%) | 3,44 | 3,29 | 3,53 |

Os resultados obtidos nas amostras utilizadas neste programa experimental, mostram que as características das misturas betuminosas estão dentro dos limites apresentados no estudo de formulação pelo método Marshall, de acordo com o Tabela 3.3. Os resultados das propriedades volumétricas de cada provete encontram-se no Anexo B (E.P., 2014).

4.4. Ensaio mecânico – Ensaio de tração indireta

4.4.1. Método I

Neste método foi realizado o ensaio à tração indireta (ITS) em provetes MBO à temperatura de 20°C. Após o primeiro ensaio de tração indireta (1ºITS), foi aplicado um “anel” ao provete com o intuito de diminuir a deformação no eixo perpendicular ao da aplicação da carga. Aplicou-se a carga axial de 5kN sobre os provetes após o primeiro ensaio de tração indireta e de seguida estes foram submetidos a um tempo de repouso de 24h. Este período foi necessário para que a regeneração ocorresse na mistura betuminosa. Finalmente os provetes foram submetidos ao segundo ensaio de tração indireta (2ºITS), obtendo-se assim a taxa de recuperação relativamente a resistência à tração dos mesmos. São apresentados de forma resumida os resultados dos ensaios do método I no Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Método I- Resultados gerais do ensaio ITS, temperatura 20°C, tempo de repouso de 24h - MBO

| Provetes MBO | Níveis de dano alvo | Níveis de dano reais | | F _{máx} (1° ITS) | | F _{máx} (1° ITS) | ITS | F _{máx} (2°ITS) | | Recuperação | | Recuperação |
|--------------|---------------------|----------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|----------|--------------------------|-------|-------------|-------|-------------|
| | | | Média | [N] | | σ/μ | [Gpa] | [N] | | | Média | σ/μ |
| 5 | 100% | 97% | 100% | 14406 | 14842 | 8,5% | 1,83E-03 | 2544 | 5949 | 17% | 40% | 51,7% |
| 6 | | 100% | | 14852 | | | 1,89E-03 | 5933 | | 40% | | |
| 7 | | 94% | | 13892 | | | 1,77E-03 | 3154 | | 21% | | |
| 33 | | 89% | | 13280 | | | 1,69E-03 | 9792 | | 66% | | |
| 34 | | 108% | | 16033 | | | 2,04E-03 | 4859 | | 33% | | |
| 35 | | 112% | | 16589 | | | 2,11E-03 | 9413 | | 63% | | |
| 8 | 85% | 86% | 83% | 12808 | 12388 | 5% | 1,63E-03 | 13040 | 13622 | 88% | 92% | 6% |
| 20 | | 81% | | 11967 | | | 1,52E-03 | 14204 | | 96% | | |
| 19 | 75% | 75% | 72% | 11197 | 10715 | 8% | 1,43E-03 | 15789 | 14058 | 106% | 95% | 10,6% |
| 21A | | 77% | | 11477 | | | 1,46E-03 | 14826 | | 100% | | |
| 36 | | 68% | | 10130 | | | 1,29E-03 | 13063 | | 88% | | |
| 37 | | 63% | | 9408 | | | 1,20E-03 | 12449 | | 84% | | |
| 38 | | 65% | | 9662 | | | 1,23E-03 | 11385 | | 77% | | |
| 9 | | 78% | | 11549 | | | 1,47E-03 | 15141 | | 102% | | |
| 10 | | 71% | | 10517 | | | 1,34E-03 | 14800 | | 100% | | |
| 11 | | 78% | | 11549 | | | 1,47E-03 | 15317 | | 103% | | |
| 12 | | 74% | | 10945 | | | 1,39E-03 | 13754 | | 93% | | |
| 13 | 50% | 47% | 45% | 7014 | 6623 | 6% | 8,93E-04 | 14187 | 13629 | 96% | 92% | 4,2% |
| 14 | | 41% | | 6089 | | | 7,75E-04 | 12921 | | 87% | | |
| 15 | | 44% | | 6479 | | | 8,25E-04 | 14004 | | 94% | | |
| 16 | | 47% | | 6910 | | | 8,80E-04 | 13403 | | 90% | | |

Sendo: - F_{máx} a força máxima

- σ o desvio padrão

Testaram-se vários provetes com diferentes níveis de dano (100%, 85%, 75% e 50%), de maneira a avaliar o comportamento dos provetes face ao tipo de ensaio imposto. Foi possível estabelecer intervalos de deformação permitindo deste modo dividi-los em três níveis ($\delta \leq 3$ mm, $4 \leq \delta \leq 5$ mm e $\delta \geq 5$ mm).

As Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 apresentam os resultados do primeiro e do segundo ensaio de tração indireta realizados sobre os provetes cilíndricos fabricados com mistura betuminosa com óleo (MBO). De forma a verificar a taxa de recuperação da mistura betuminosa, numa primeira fase, foram realizados ensaios com uma deformação superior a 5mm, (Figura 4.2). Posteriormente foram realizados ensaios com uma deformação inferior a 5mm (Figura 4.3) e por fim inferior a 3mm (Figura 4.4).

Na Figura 4.5 é possível observar os diferentes resultados do ensaio de provetes MBO à tração indireta com um tempo de repouso de 24h após o primeiro ensaio. Nesta mesma figura, são apresentadas as diferentes percentagens de danos e as correspondentes percentagens de recuperação.

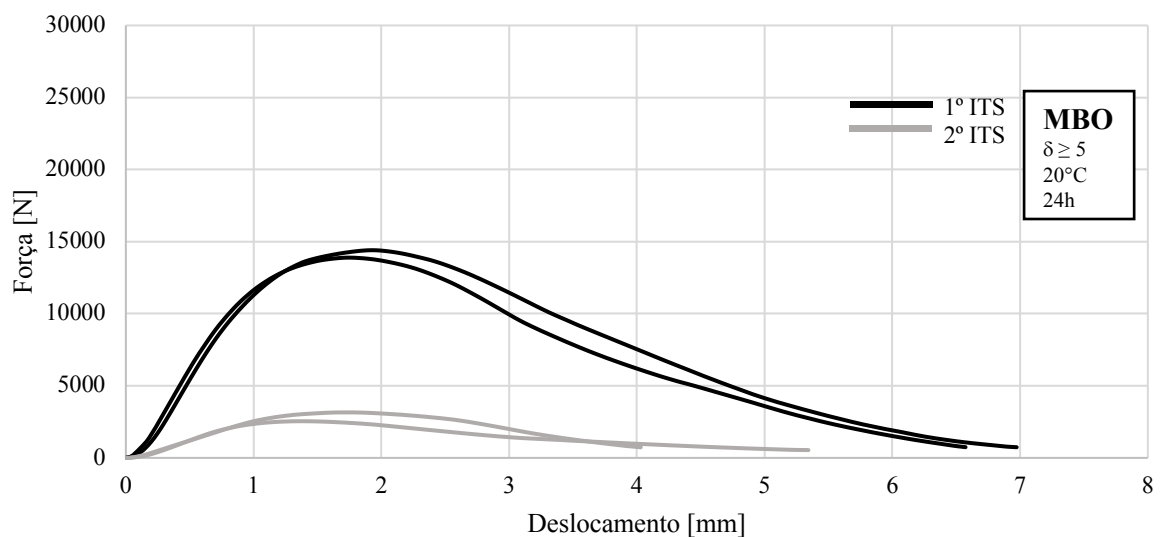


Figura 4.2- Ensaio ITS, $\delta \geq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, MBO (Método I)

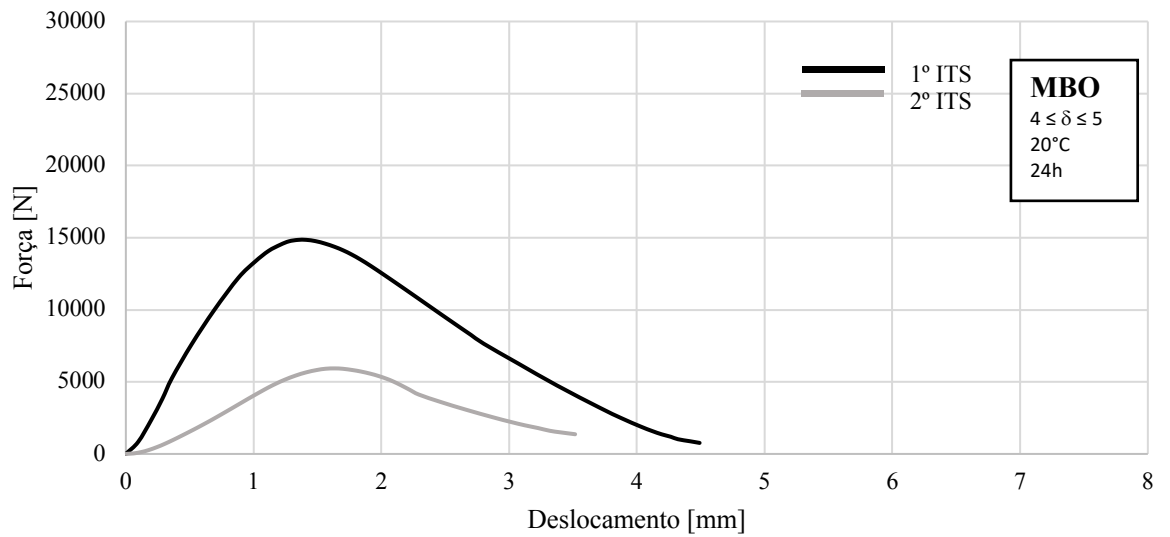


Figura 4.3- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, MBO (Método I)

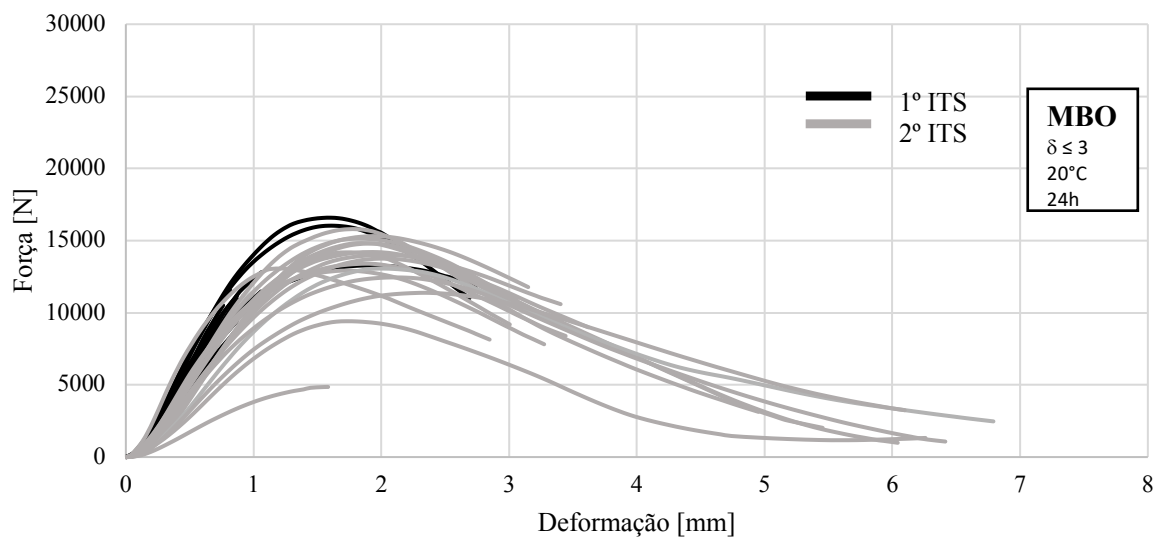


Figura 4.4- Ensaio ITS, $\delta \leq 3$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, MBO (Método I)

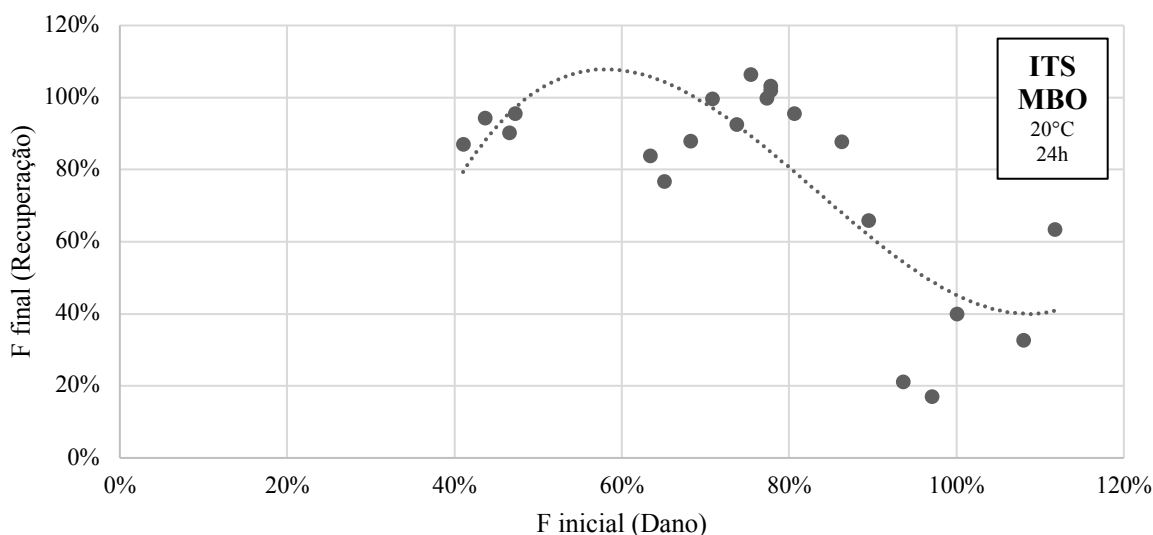


Figura 4.5- Ensaio ITS com diferentes níveis de dano, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, MBO (Método I)

Da análise dos resultados obtidos, verifica-se que foi possível atingir níveis de dano dos provetes (100%, 83%, 72% e 45%) próximos dos pretendidos (100%, 85%, 75% e 50%).

Para o caso do nível de dano de 100%, os valores observados variaram entre 97% e 112%, tendo-se um valor médio de 100%. Constatou-se assim que os provetes submetidos a níveis de dano médio de 100% (Figura 4.6) apresentaram uma recuperação de 40%. Não se verificou uma variação significativa nos valores relativos ao primeiro ensaio de tração indireta (8,5%), mas em termos de recuperação os provetes apresentaram uma variação mais elevada (51,7%). Isto deve-se aos diferentes níveis de deformação apresentados pelos provetes no primeiro ensaio de tração indireta. Pode considerar-se que estes provetes foram submetidos a deformações superiores ou iguais a 5mm (Figura 4.2 e Figura 4.3).

Para o nível de dano médio de 83%, os provetes apresentaram uma recuperação média de 92%. Não se verificou uma variação considerável de resultados tanto no primeiro como no segundo ensaio de tração indireta (5% para o primeiro ensaio e 6% para o segundo ensaio).

Para os 72% de nível de dano médio dos provetes (Figura 4.7), verificou-se uma taxa de recuperação média de 95%. Não foram notadas grandes variações nos resultados do primeiro e segundo ensaio de tração indireta, apresentando valores de 8% e 10,6% respetivamente.

Para os 45% de nível de dano médio dos provetes, obteve-se uma taxa de recuperação média de 92%. Não se verificou grande variação a nível de resultados de força no primeiro e segundo ensaio de tração indireta, apresentando valores de 6% e 4,2%.

A taxa de recuperação dos provetes compactados estabilizou a partir dos 83, 72 e 45% de nível de dano, estando deste modo acima dos 90%.

Assim, com a realização do ensaio de tração indireta, ao solicitar os provetes sobre diferentes condições, pretendeu-se avaliar o nível de regeneração da mistura betuminosa. Foram solicitadas as misturas betuminosas com incorporação de cápsulas de modo que estas estivessem ativadas quando se danificassem os provetes a partir do ensaio de tração indireta. Por outro lado, considerou-se não ser vantajoso submeter os provetes a níveis de deformação excessivos porque diminuía a probabilidade de se regenerarem.

Os níveis de dano estão diretamente ligados às deformações que os provetes foram submetidos. Constatou-se que a taxa de recuperação era inversamente proporcional ao nível de dano causado aos provetes. Por isso, estabeleceu-se um intervalo relativamente a nível de deformação imposta aos provetes no primeiro ensaio de tração indireta, que variava de 3 a 5mm aproximadamente. O intervalo de deformação adotado correspondeu a danos nos provetes de 83% a 100% aproximadamente.

Este método permitiu assim estabelecer limites para as condições de ensaio a adotar através da respetiva validação.



Figura 4.6- Provette 6 MBO, nível de dano $\geq 100\%$ (2°ITS)



Figura 4.7- Provete 10 MBO, nível de dano $\leq 75\%$ (2° ITS)

4.4.2. Método II

Neste método, tal como já foi referido, foram aplicados aos provetes danos próximos dos 100% sem causar uma deformação excessiva, de modo a serem verificadas as percentagens de recuperação possíveis para cada grupo de provetes, nas diferentes condições de ensaio, referidas na secção 3.3.3.

Deste modo, são apresentados de forma resumida os resultados dos ensaios do método II na Tabela 4.3 e Tabela 4.4. Agruparam-se os resultados em função da deformação inicial e do tempo de repouso a que os provetes foram submetidos. Organizaram-se os resultados também quanto à carga axial aplicada ao provete após o primeiro ensaio de tração indireta. A carga axial foi aplicada aos provetes condicionados a 20°C, sendo esta temperatura utilizada também no período de repouso. Finalmente os resultados foram agrupados em função da temperatura de ensaio a que os provetes foram submetidos.

Nos pontos seguintes discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de ITS realizado para as diferentes condições de ensaio apresentas:

- (1) Provetes preconditionados à temperatura de ensaio.
- (2) 1° ITS.
- (3) Aplicar uma carga axial ao provete durante 5min.
- (4) Repouso dos provetes a temperatura e ao tempo de ensaio.
- (5) 2° ITS.

Tabela 4.3- - Método II- Resultados gerais do ensaio ITS, MBC

| Material | Ensaio Mecânico | | Compressão | | Repouso | Resultados | | | | | |
|----------|-----------------|---------------------------------|------------|-------------|---------|------------|----------|--------------|-------------|----------|--------------|
| | Temperatura | Deslocamento | Carga | Temperatura | | Força | | | Recuperação | | |
| | | | | | | μ | σ | σ/μ | μ | σ | σ/μ |
| | ° C | [mm] | [kN] | ° C | | [H] | [kN] | [kN] | [%] | [%] | [%] |
| MBC | -14 | $\delta \leq 3\text{mm}$ | 10 | 20 | 72 | 26,99 | 1,48 | 5,5 | 7,0 | 5,0 | 72,0 |
| MBC | 10 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 10 | 20 | 72 | 26,62 | 0,715 | 2,7 | 7,0 | 1,1 | 15,0 |
| MBC | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 10 | 20 | 72 | 12,61 | 2,514 | 19,9 | 19,0 | 5,8 | 30,0 |
| MBC | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 0 | 20 | 72 | 13,1 | 0,674 | 5,1 | 19,0 | 9,3 | 49,0 |
| MBC | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 7,5 | 20 | 72 | 14,55 | 0,334 | 2,3 | 13,0 | 2,8 | 21,0 |
| MBC | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 5 | 20 | 96 | 15,2 | 0,18 | 1,2 | 12,0 | 5,1 | 42,0 |
| MBC | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 5 | 20 | 72 | 11,51 | 0,336 | 2,9 | 22,0 | 7,2 | 33,0 |
| MBC | 20 | $\delta \leq 3\text{mm}$ | 5 | 20 | 72 | 10,53 | 1,091 | 10,4 | 86,0 | 9,7 | 11,0 |
| MBC | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 5 | 20 | 24 | 12,23 | 0,425 | 3,5 | 12,0 | 3,9 | 32,0 |

Sendo: - μ o valor médio

- σ o desvio padrão

Tabela 4.4- Método II- Resultados gerais do ensaio ITS, MB e MBO

| Material | Ensaio Mecânico | | Compressão | | Repouso | Resultados | | | | | |
|----------|-----------------|---------------------------------|------------|-------------|---------|------------|----------|--------------|-------------|----------|--------------|
| | Temperatura | Deslocamento | Carga | Temperatura | | Força | | | Recuperação | | |
| | | | | | | μ | σ | σ/μ | μ | σ | σ/μ |
| | ° C | [mm] | [kN] | ° C | | [H] | [kN] | [kN] | [%] | [%] | [%] |
| MB | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 5 | 20 | 72 | 17,78 | 0,447 | 2,5 | 12,0 | 1,2 | 10,0 |
| MBO | -14 | $\delta \leq 3\text{mm}$ | 10 | 20 | 72 | 34,29 | 12,634 | 36,8 | 8,0 | 11,4 | 142,0 |
| MBO | 10 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 10 | 20 | 72 | 31,64 | 1,022 | 3,2 | 4,0 | 2,6 | 66,0 |
| MBO | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 10 | 20 | 72 | 12,86 | 0,628 | 4,9 | 23,0 | 8,0 | 35,0 |
| MBO | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 0 | 20 | 72 | 13,76 | 0,958 | 7,0 | 21,0 | 3,1 | 15,0 |
| MBO | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 7,5 | 20 | 72 | 13,53 | 0,618 | 4,6 | 25,0 | 3,9 | 16,0 |
| MBO | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 5 | 20 | 96 | 19,92 | 0,804 | 4,0 | 13,0 | 0,9 | 7,0 |
| MBO | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 5 | 20 | 72 | 16,4 | 1,169 | 7,1 | 16,0 | 0,7 | 5,0 |
| MBO | 20 | $\delta \leq 3\text{mm}$ | 5 | 20 | 72 | 16,51 | 1,589 | 9,6 | 81,0 | 11,8 | 15,0 |
| MBO | 20 | $4 \leq \delta \leq 5\text{mm}$ | 5 | 20 | 24 | 15,61 | 0,519 | 3,3 | 11,0 | 1,5 | 13,0 |

Sendo: - μ o valor médio

- σ o desvio padrão

4.4.2.1. Deformação inicial

A deformação imposta aos provetes no primeiro ensaio de tração indireta, condiciona a taxa de recuperação que eles podem atingir. De acordo com os limites estabelecidos no método I, foram testados provetes MBC e MBO. Na Figura 4.8 apresentam-se as taxas de recuperação obtidas em função do deslocamento dos provetes. Observa-se na mesma figura que para deformações inferiores ou iguais a 3mm, os provetes MBC apresentaram uma taxa de recuperação de 86% e os provetes MBO tiveram uma taxa de recuperação de 81%. Para o caso de deformações no intervalo de 4 a 5mm as taxas de recuperação para os provetes MBC foram de 22% e para os provetes MBO foram de 16%, consideravelmente inferiores às obtidas para os provetes do caso de deformações iguais ou inferiores a 3mm.

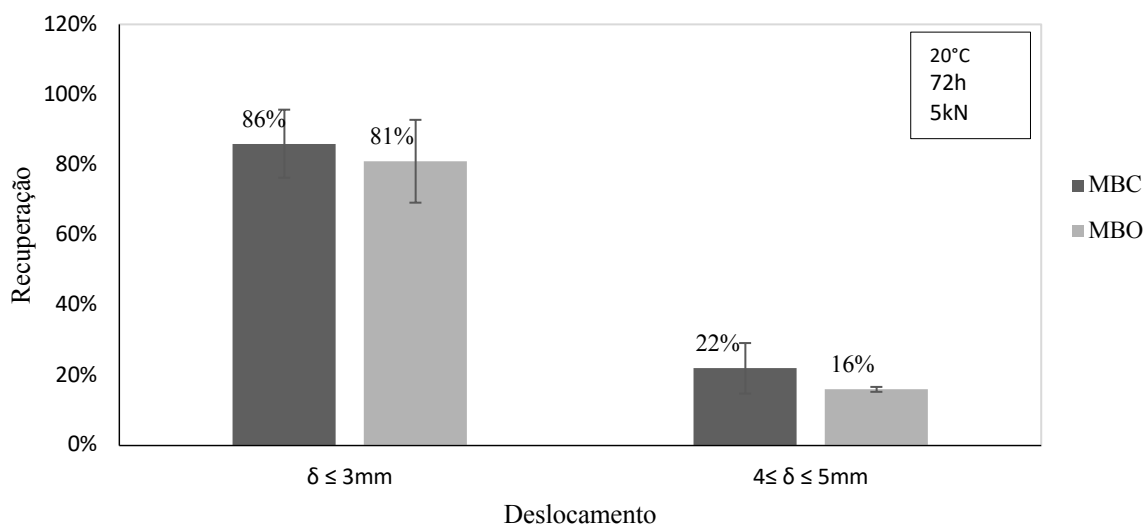


Figura 4.8- Ensaio ITS, deformação inicial, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 5kN, MBC e MBO (Método II)

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.8, foi possível verificar uma elevada taxa de recuperação para ambas as misturas para deformações iguais ou inferiores a 3mm. Por esta razão, optou-se por ajustar os ensaios que se seguem para deformações no intervalo de 4 a 5mm, de modo a potenciar a recuperação das misturas betuminosas em ensaio de ITS.

4.4.2.2. Tempo de repouso após o primeiro ensaio de tração indireta

O tempo de repouso aplicado aos provetes permite que a mistura betuminosa se regenere. No caso dos provetes com mistura betuminosa com incorporação de cápsulas, ao serem solicitados, o tempo de repouso aplicado permite que estas libertem os rejuvenescedores ao longo da zona fissurada. A viscosidade mais baixa do betume conduz ao escoamento do óleo.

Primeiramente foram realizados ensaios à tração indireta em provetes MBC e MBO à temperatura de 20°C. Posteriormente aplicou-se a carga axial de 5kN sobre os provetes, após o primeiro ensaio de tração indireta e, de seguida os provetes foram submetidos ao tempo de repouso. Tendo-se considerado 24h, 72h e 96h.

A Figura 4.9 apresenta os resultados do ensaio de tração indireta de provetes MBC em que a força média do grupo de provetes no instante inicial foi de 12,23kN e a taxa de recuperação após 24h de repouso foi de 12%. Na Figura 4.10 observam-se os resultados do ensaio de tração indireta de provetes MBO em que a força média do grupo de provetes no instante inicial foi de 15,61kN e a taxa de recuperação após 24h de repouso foi de 11%.

Realizaram-se ensaios de tração indireta para o tempo de repouso de 72h para provetes de misturas betuminosas, com cápsula ou óleo. Os provetes MBC, tal como pode observar-se na Figura 4.11, apresentaram uma força média de 11,51kN e uma taxa de recuperação de 22%. Os provetes MBO (Figura 4.12) atingiram uma força média de 16,4kN e uma taxa de recuperação de 16%. Observa-se assim que, para as mesmas condições de ensaio aplicadas aos dois tipos de provetes, MBC e MBO, os valores das taxas de recuperação são similares.

Foram usados provetes MB (Figura 4.13) no ensaio de tração indireta para o tempo de repouso de 72h em que o resultado da força média foi de 17,78kN e a taxa de recuperação foi de 12%.

Posteriormente, aumentou-se o tempo de repouso para 96h, mantendo as restantes condições de ensaio. Conforme apresentado na Figura 4.14, os provetes MBC tiveram uma força média de 15,2kN e uma taxa de recuperação de 12%. No caso dos provetes MBO (Figura 4.15), atingiu-se uma força média de 19,92kN e uma taxa de recuperação de 13%.

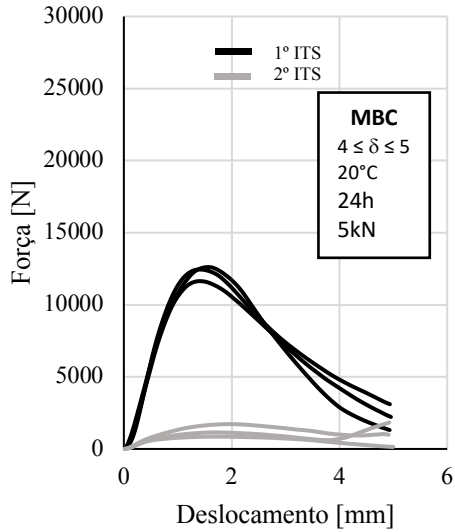


Figura 4.9- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, carga de 5kN, MBC (Método II)

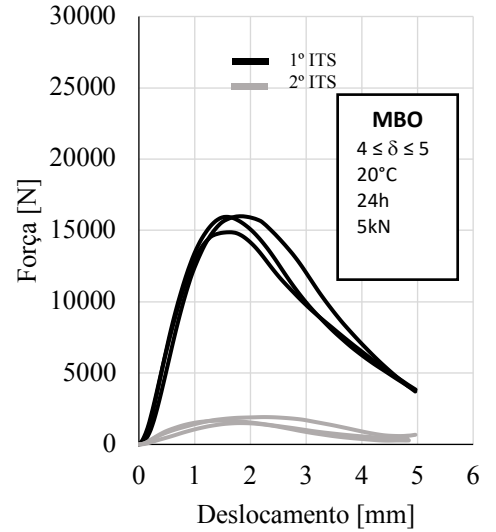


Figura 4.10- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 24h, carga de 5kN, MBO (Método II)

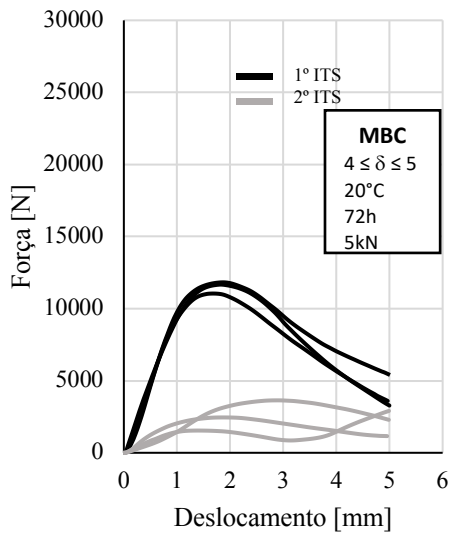


Figura 4.11- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 5kN, MBC (Método II)

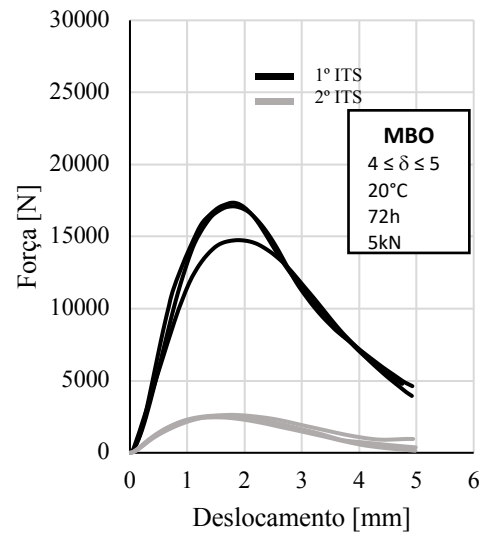


Figura 4.12- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 5kN, MBO (Método II)

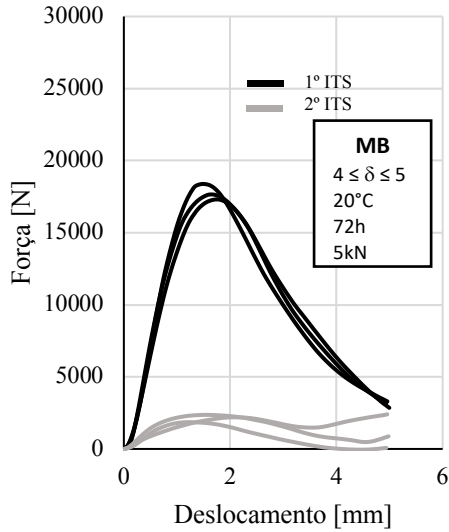


Figura 4.13- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 5kN, MB (Método II)

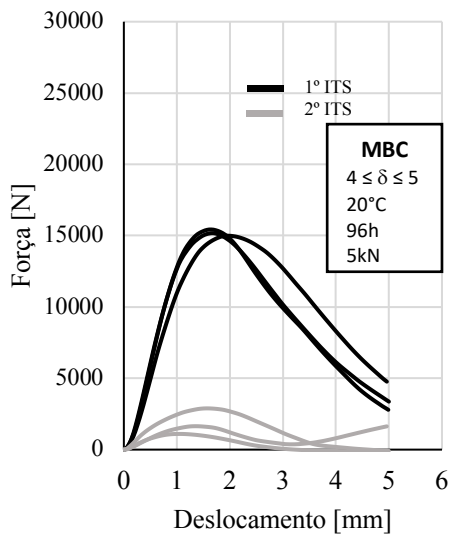


Figura 4.14- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 96h, carga de 5kN, MBC (Método II)

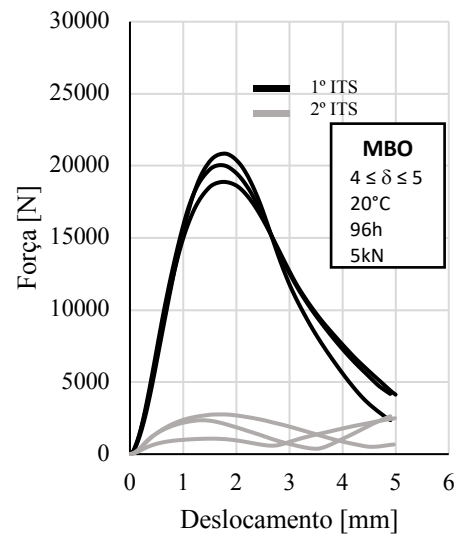


Figura 4.15- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 96h, carga de 5kN, MBO (Método II)

Apresentam-se, nas Figura 4.16 e Figura 4.17, os resultados dos três grupos de misturas betuminosas (MB, MBO e MBC) para os diferentes tempos de repouso a que foram submetidos. É possível observar o efeito da presença de óleo ou das cápsulas no comportamento das misturas betuminosas em termos de força média obtida em ensaio ITS.

Nota-se que os provetes MB atingiram uma força média maior, no primeiro ensaio de tração indireta, comparativamente aos provetes MBC e MBO, devido ao facto de serem mais rígidos. Consequentemente apresentaram uma taxa de recuperação inferior em relação aos provetes MBC e MBO.

Os provetes MBO apresentaram uma força média do ensaio de tração indireta superior aos provetes MBC, nos casos de tempo de repouso de 24h, 72h e 96h. Estes provetes tiveram uma força de recuperação superior aos provetes MBC, relativamente ao repouso as 96h embora ambos apresentarem uma variação de valores considerável. A diferença da taxa de recuperação foi de 1%, de modo que não se considerou muito relevante.

Os provetes MBC apresentaram resultados de taxa de recuperação melhores que os demais provetes, com exceção as 96h em que os provetes MBO foram melhores.

Os ensaios de tração indireta com diferentes tempos de repouso, ajudaram a refinar os ensaios que se seguiram. A partir destes, foi possível observar a grande diferença entre os provetes MBC, MBO e os provetes MB em termos de taxa de recuperação. Por esta razão, optou-se por não aplicar os provetes MB nos próximos ensaios visto que foram os que tiveram resultados inferiores em relação aos provetes MBC e MBO. Não se conseguiu estabelecer uma grande diferença da taxa de recuperação entre os provetes MBC e os provetes MBO.

De acordo com os resultados obtidos, considerou-se que deveriam ser alterados os tempos de repouso dos provetes, deixando assim de se fazer o ensaio para o tempo 24h e 96h de repouso.

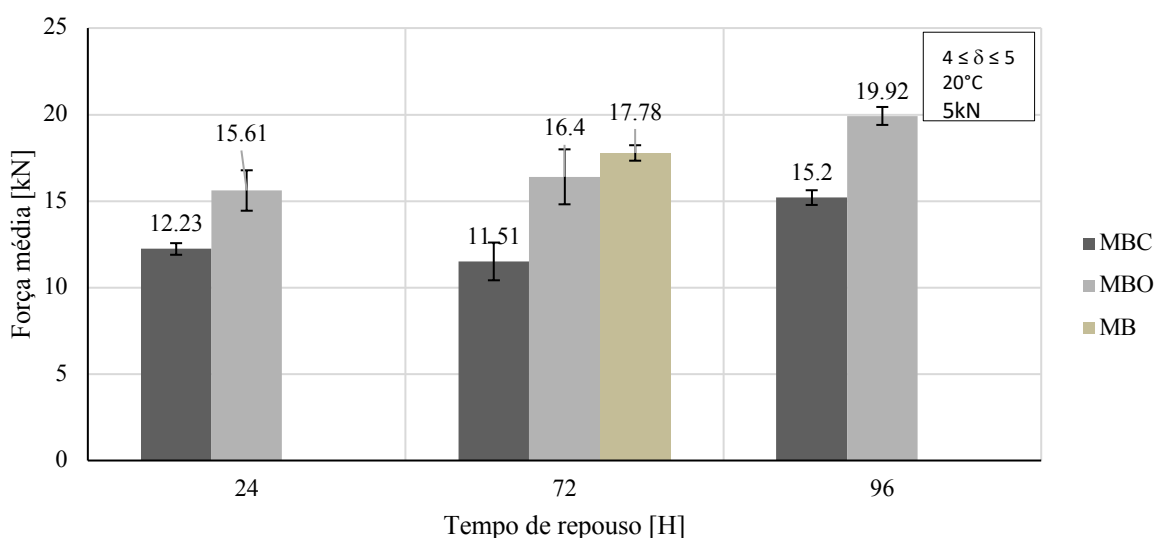


Figura 4.16- Tempo de repouso (24h, 72h, 96h): Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20° , carga de 5kN, MBC, MBO e MB (Método II)

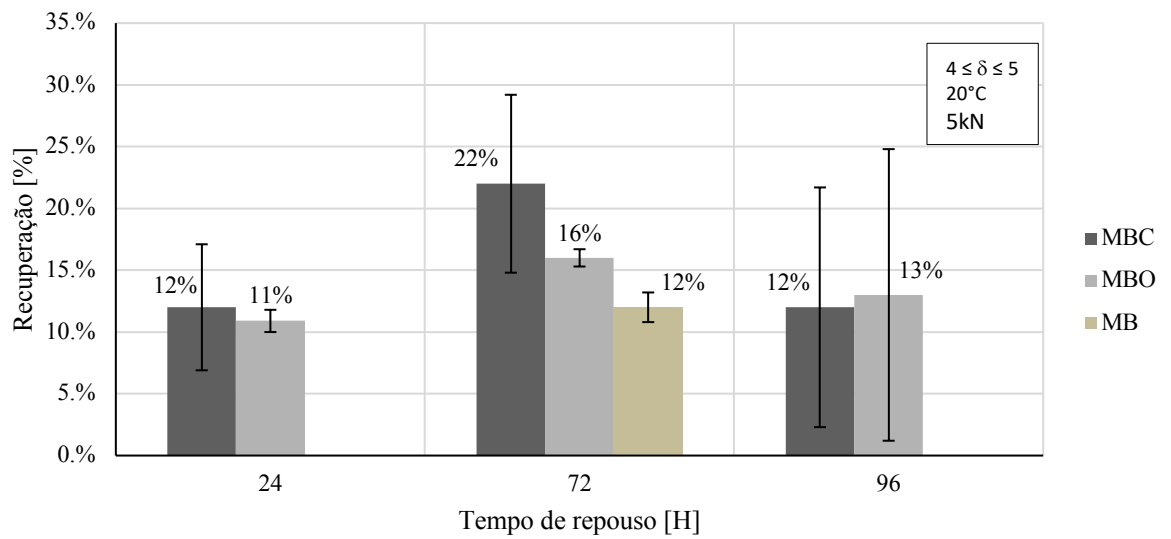


Figura 4.17- Tempo de repouso (24h, 72h, 96h): Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C, carga de 5kN, MBC, MBO e MB (Método II)

4.4.2.3. Carga axial aplicada após o primeiro ensaio de tração indireta

A carga axial aplicada sobre o provete confinado no molde pretende simular o efeito do tráfego sobre o pavimento fendilhado. Devido à variação das características dos veículos (nº de eixos, carga por eixo e tipo de pneu na circulação de tráfego) na circulação do tráfego, o contacto pneu-pavimento varia em geometria e valor de pressão. Desta forma, foi avaliado, no estudo apresentado, o efeito do nível de carga aplicada (0kN, 5,0kN, 7,5kN e 10,0kN).

Após o primeiro ensaio de tração indireta, foi aplicada a carga axial sobre os provetes MBC e MBO (Figura 4.18). Estes foram submetidos a 72h de repouso, após o primeiro ensaio de tração indireta (ITS).



Figura 4.18- Carga axial aplicada aos provetes

A Figura 4.19 apresenta os resultados do ensaio de tração indireta de provetes MBC, em que a força média do grupo de provetes no instante inicial foi de 14,55kN e a taxa de recuperação, após 72h de repouso, foi de 13%. Na Figura 4.20 observam-se os resultados do ensaio de tração indireta de provetes MBO, em que a força média do grupo de provetes no instante inicial foi de 13,53kN e a taxa de recuperação após 72h de repouso foi de 25%. Para ambas as condições de ensaio foi aplicada uma carga axial de 7,5kN, após o ensaio de tração indireta.

As Figura 4.21 e Figura 4.22 mostram outro caso em que se aplicou uma carga axial de 10kN aos provetes MBC e MBO, após o primeiro ensaio de tração indireta. Neste ensaio a força média, no caso dos provetes MBC, foi de 12,61kN e para os provetes MBO foi de 12,86kN. Os provetes MBC tiveram uma taxa de recuperação de 19% e os provetes MBO tiveram uma taxa de recuperação de 23%.

Um outro caso é apresentado nas Figura 4.23 e Figura 4.24, em que não foi aplicada uma carga axial sobre os provetes MBC e MBO, após o primeiro ensaio de tração indireta. Neste caso a força média do ensaio de tração indireta para os provetes MBC foi de 13,1kN e, para os provetes MBO, foi de 13,76kN. Os provetes MBC tiveram uma taxa de recuperação de 19% e os provetes MBO tiveram uma taxa de recuperação de 21%.

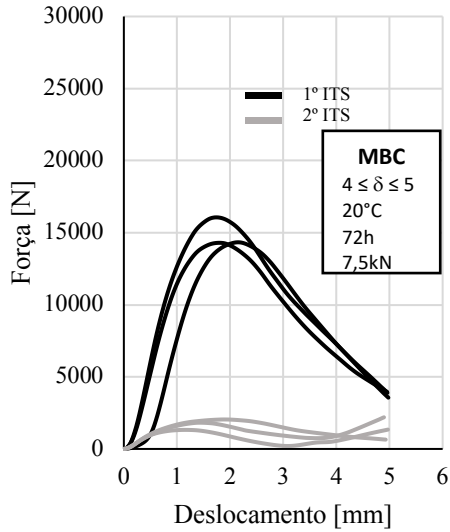


Figura 4.19- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 7,5kN, MBC (Método I)

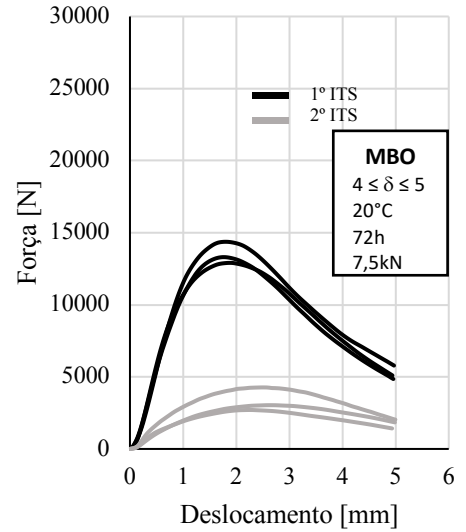


Figura 4.20- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 7,5kN, MBO (Método II)

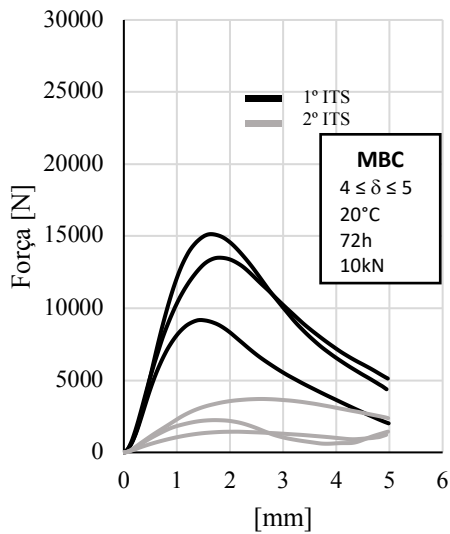


Figura 4.21- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 10kN, MBC (Método II)

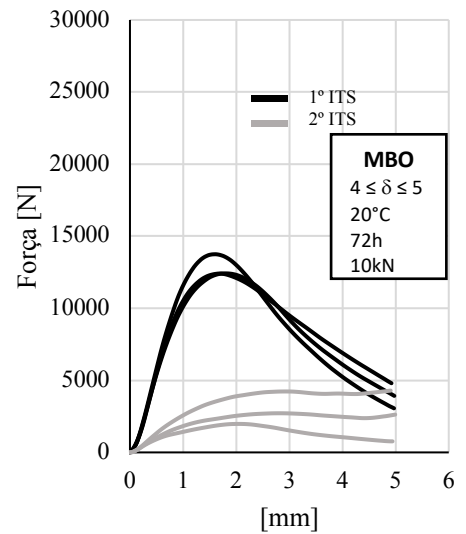


Figura 4.22- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, carga de 10kN, MBO (Método II)

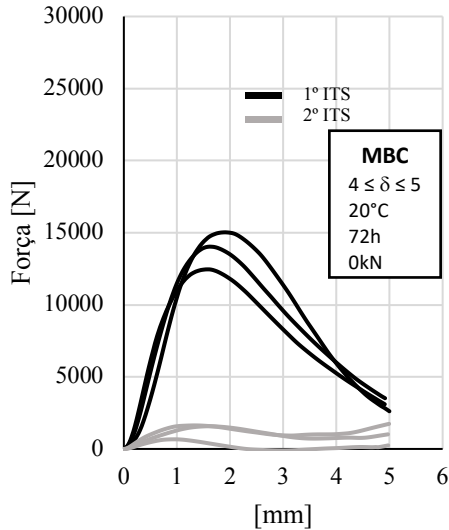


Figura 4.23- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, sem aplicação de carga axial, MBC (Método II)

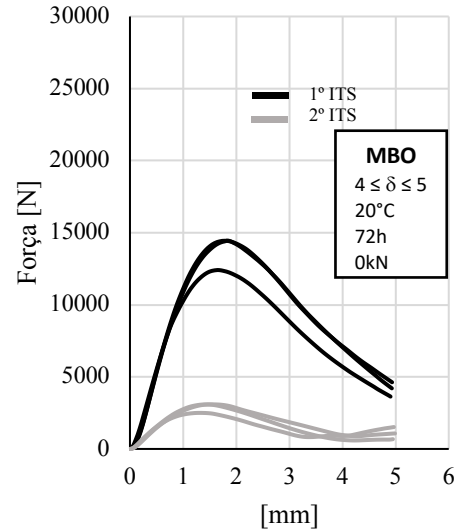


Figura 4.24- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, sem aplicação de carga axial, MBO (Método II)

Apresenta-se na Figura 4.25 que os provetes MBC e MBO tiveram resultados de força média muito similares com exceção do caso e da carga axial de 5kN. O caso da aplicação da carga axial de 7,5kN foi o único em que os provetes MBC apresentaram uma força média relativamente superior aos provetes MBO.

Observou-se também alguma falta de consistência nos resultados do ensaio relativamente a taxa de recuperação das misturas betuminosas, tal como se pode observar na Figura 4.26. Nesta figura constata-se alguma predominância da taxa de recuperação da mistura betuminosa com óleo (MBO) com exceção do caso da carga axial de 5kN. Possivelmente, esta situação resultou de se ter danificado menos os provetes, favorecendo assim uma melhor regeneração quando comparado com as outras condições de ensaio.

O mesmo acontece com o caso da aplicação da carga axial de 7,5kN, em que se solicitou mais os provetes com cápsula (MBC) comparativamente aos provetes sem cápsula. Consequentemente e como seria de esperar, os provetes MBC apresentaram uma taxa de recuperação inferior aos provetes MBO.

Nesta secção foi possível constatar que não existe uma dependência dos resultados a nível da carga axial aplicada sobre os provetes.

Pode assim concluir-se que os resultados obtidos, em termos de taxa de recuperação dos provetes ensaiados, são independentes do nível de carga axial aplicada.

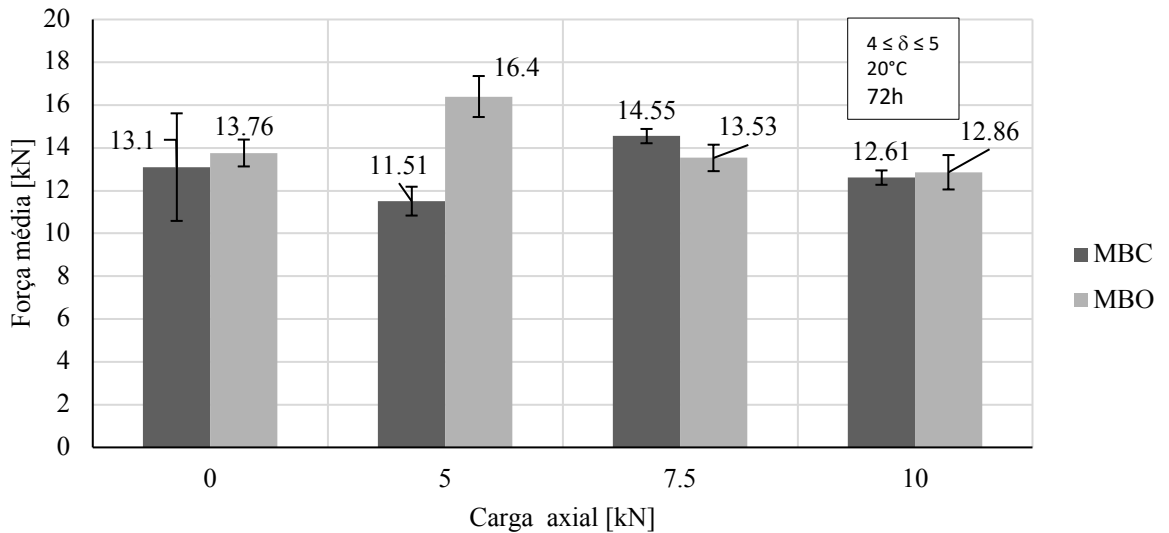


Figura 4.25- Carga axial (0kN, 5kN, 7,5kN e 10kN) e Força média: Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)

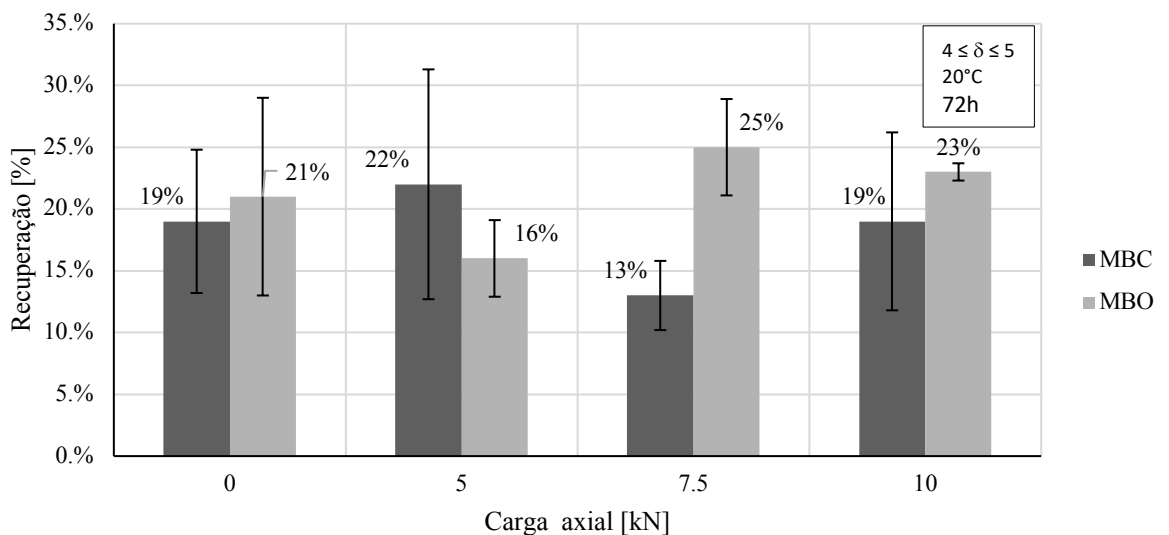


Figura 4.26- Carga axial (0kN, 5kN, 7,5kN e 10kN) e Recuperação: Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)

Apresenta-se na Figura 4.27 a relação entre a força média do ensaio de tração indireta e a taxa de recuperação atingida (apresentados nas Figura 4.25 Figura 4.26). Da análise da Figura 4.27, é possível confirmar a não existência da influência da carga axial sobre os provetes. Para ambas as misturas betuminosas ensaiadas (MBC e MBO) verifica-se a mesma tendência relativamente ao dano e à recuperação, ou seja, os provetes com maior dano apresentaram taxas de recuperação inferiores.

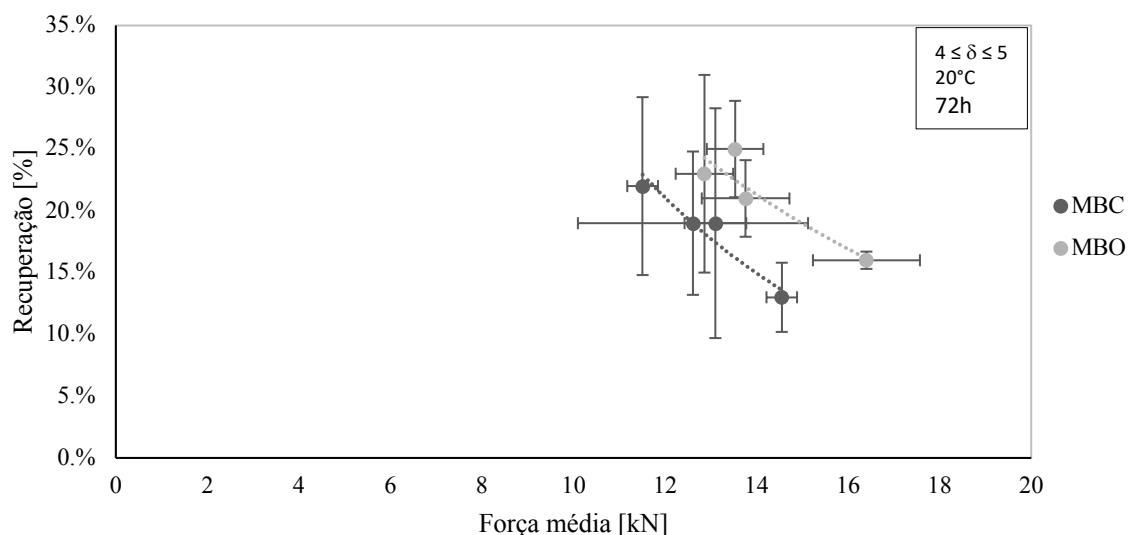


Figura 4.27- Força média e Recuperação (0kN, 5kN, 7,5kN e 10kN): Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 20°C e tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)

4.4.2.4. Temperatura de ensaio

Com o objetivo de avaliar a influência que a temperatura de condicionamento dos provetes betuminosos tem no comportamento em ensaio de tração, estes foram condicionados às temperaturas de -14°C, 10°C e 20°C. Os ensaios de tração indireta foram realizados sobre provetes MBC e MBO.

Os resultados dos ensaios de tração indireta à temperatura de 10°C, podem ser observados nas Figura 4.28 e Figura 4.29. Na Figura 4.28 apresentam-se os resultados para os provetes MBC em que a força média foi de 26,62kN e a taxa de recuperação foi de 7%. Na Figura 4.29 apresentam-se os resultados dos provetes MBO, cuja a força média foi de 31,64kN, com uma taxa de recuperação de 4%. Ambos os grupos foram submetidos a uma carga axial de 10kN, após o primeiro ensaio de tração indireta e, com um tempo de repouso de 72h.

Outra condição de ensaio foi aplicada aos provetes com a temperatura de -14°C, tal como mostram as Figura 4.30 e Figura 4.31. Os provetes MBC (Figura 4.30) apresentaram resultados de força média de 26,99kN e uma taxa de recuperação de 7%. Os provetes MBO (Figura 4.31) atingiram resultados de força média de 34,29kN e uma taxa de recuperação de 8%.

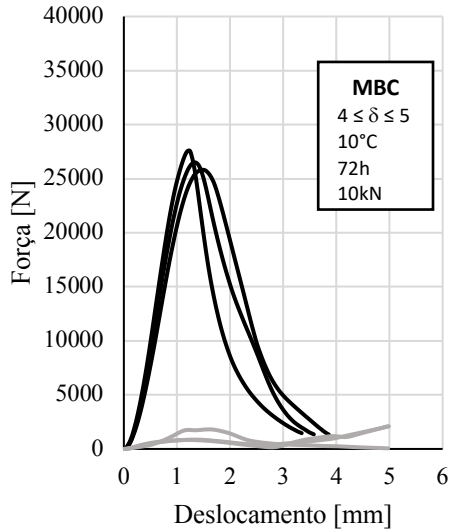


Figura 4.28- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 10°C e tempo de repouso de 72h, carga axial de 10kN, MBC (Método II)

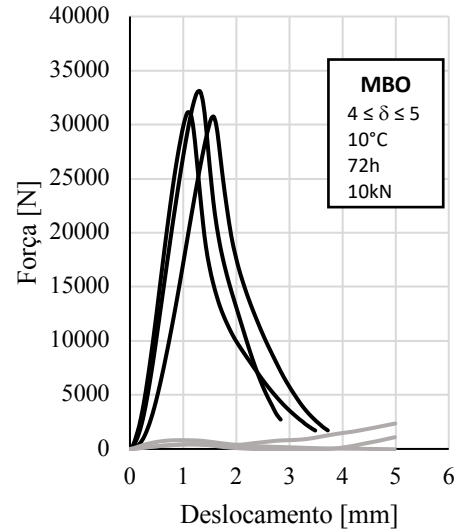


Figura 4.29- Ensaio ITS, $4 \leq \delta \leq 5$ mm, temperatura de 10°C e tempo de repouso de 72h, carga axial de 10kN, MBO (Método II)

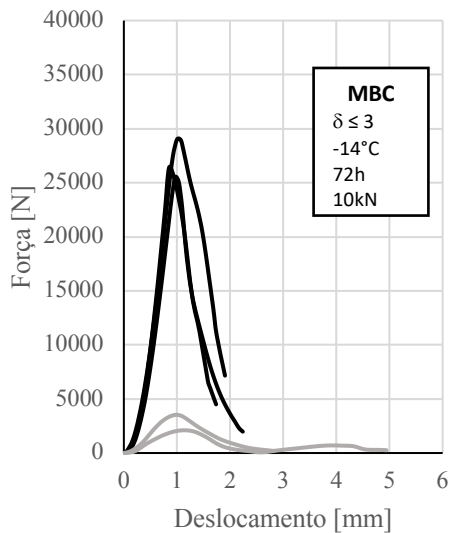


Figura 4.30- Ensaio ITS, $\delta \leq 3$ mm, temperatura de -14°C e tempo de repouso de 72h, carga axial de 10kN, MBC (Método II)

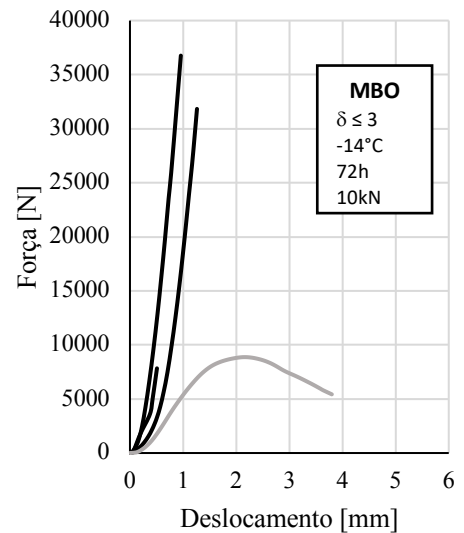


Figura 4.31- Ensaio ITS, $\delta \leq 3$ mm, temperatura de -14°C e tempo de repouso de 72h, carga axial de 10kN, MBO (Método II)

Nas Figura 4.32 e Figura 4.33 são apresentados os resultados da força média e da taxa de recuperação para as diferentes temperaturas.

As temperaturas mais baixas (-14°C e 10°C) tornam o provete mais frágil. O provete torna-se mais rígido, apresentando assim uma força no ensaio de tração indireta relativamente elevada. Sendo

assim, os provetes MBC e MBO apresentaram resultados de força média no ensaio de tração indireta mais elevados à temperatura de -14°C comparativamente com a temperatura de 10°C e 20°C . Os provetes MBC apresentaram valores mais baixos comparativamente com os provetes MBO. Isto deve-se a presença das cápsulas na mistura betuminosa.

As taxas de recuperação obtidas foram inversamente proporcionais a força média dos provetes. Sendo assim, os provetes MBO apresentaram melhores taxas de recuperação comparativamente aos provetes MBC.

O comportamento das misturas betuminosas é condicionado pela temperatura e pelo tempo de carga que estiverem sujeitos.

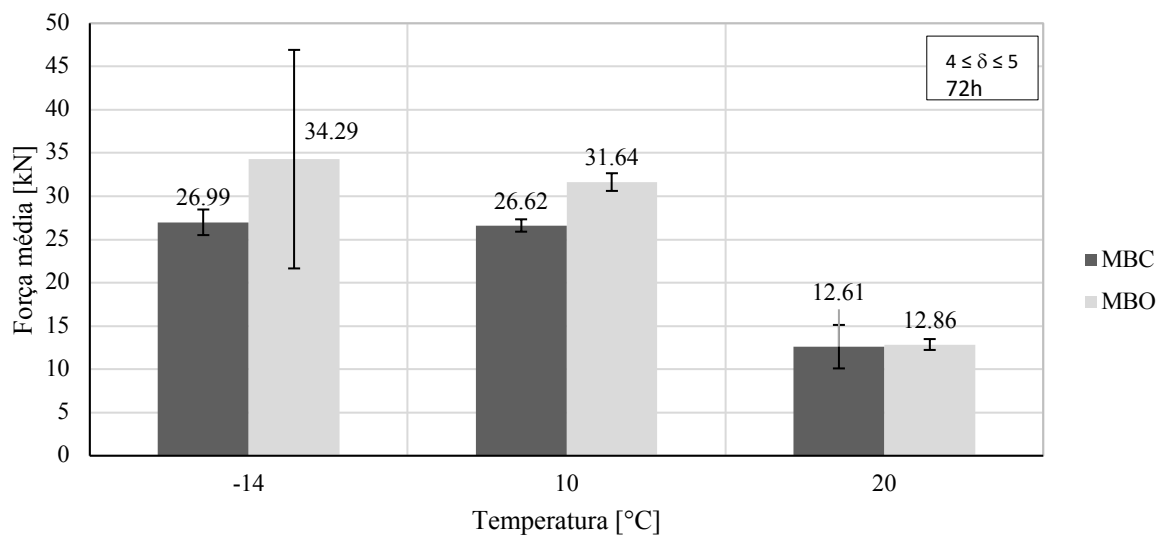


Figura 4.32- Temperatura (-14°C , 10°C e 20°C) e Força média: Ensaio ITS, tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)

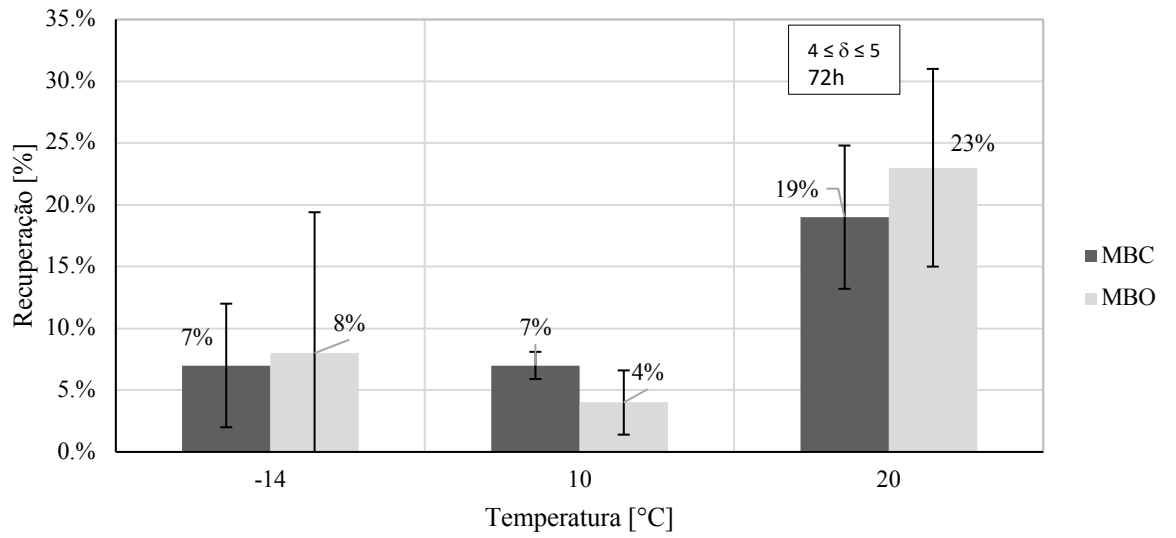


Figura 4.33- Temperatura (-14°C, 10°C e 20°C) e Recuperação: Ensaio ITS, tempo de repouso de 72h, MBC, MBO (Método II)

5. Conclusão e Desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusão

Este estudo teve como propósito a avaliação do efeito da incorporação de cápsulas de alginato de cálcio, contendo óleo de girassol, na capacidade de auto-regeneração de misturas betuminosas. Para este efeito foram fabricadas e avaliadas em laboratório três tipos de misturas betuminosas, nomeadamente misturas betuminosas (MB), com incorporação de cápsulas de alginato de cálcio (MBC) e óleo de girassol (MBO). Os três tipos de misturas betuminosas tiveram na sua composição o betume de penetração, classe 35/50. O óleo adicionado à mistura betuminosa pretende simular o óleo libertado pelas cápsulas durante o processo de fabrico e compactação. De forma a avaliar o desempenho mecânico das misturas, foram fabricados provetes cilíndricos através do compactador giratório.

O trabalho experimental desenvolvido em laboratório, compreendeu na avaliação da adesividade betume - agregado, com incorporação de cápsulas ou óleo e da resistência à tração indireta dos provetes sob diferentes condições de ensaio.

Na avaliação da adesividade constatou-se uma grande semelhança nos resultados apresentados pela mistura betuminosa com incorporação de cápsulas (MBC) e com óleo (MBO). As percentagens de superfície do agregado coberta com betume em ambas as misturas foram semelhantes.

É de salientar que os resultados do ensaio de adesividade realizado neste estudo foram semelhantes aos aplicados em misturas betuminosas com aditivos (Lameirão Correia, 2016).

O ensaio mecânico de resistência à tração indireta foi dividido em dois métodos distintos (método I e método II). No método I realizou-se o ensaio de tração indireta sobre provetes com incorporação de óleo (MBC) e testou-se diferentes níveis de deformação. Esta análise prévia pretendeu apoiar a seleção das condições de ensaio dos provetes com e sem cápsulas. No método II realizaram-se os ensaios de tração indireta em provetes MBC, MBO e MB, com diferentes condições, mas limitando o nível de deformação destes.

As condições de ensaio do método I são:

- (1) Provetes condicionados à temperatura de ensaio.
- (2) Primeiro ensaio ITS (1º ITS).
- (3) Aplicação do “anel” ao provete por 5min.
- (4) Aplicação de uma carga axial ao provete durante 5min.
- (5) Repouso dos provetes em condições determinadas (temperatura e tempo).
- (6) Segundo ensaio ITS (2º ITS).

O método I teve como propósito avaliar o nível de regeneração da mistura betuminosa através do ensaio de tração indireta. Este, conseguiu refinar os ensaios de tração indireta no que concerne ao nível de deformação a aplicar sobre os provetes. Constatou-se que deformações excessivas sobre os provetes, superiores a 5mm, diminuíam a probabilidade destes se regenerarem. Em contrapartida, quando eram aplicadas deformações consideravelmente inferiores sobre os provetes, abaixo dos 3mm, as taxas de recuperação eram elevadas. Este método permitiu assim estabelecer limites para as condições de ensaio a adotar, estabelecendo um intervalo de deformação a aplicar sobre os provetes. Deste modo avaliou-se o comportamento das misturas betuminosas com rotura do provete, mas sem deformação excessiva (deformação vertical até 5mm).

As condições de ensaio apresentas pelo método II são:

- (1) Provetes condicionados à temperatura de ensaio.
- (2) 1º ITS.
- (3) Aplicar uma carga axial ao provete durante 5min.
- (4) Repouso dos provetes em condições determinadas (temperatura e tempo).
- (5) 2º ITS

No método II os ensaios de tração indireta foram realizados em diferentes condições de ensaio como temperatura, carga axial e tempo de repouso aplicada aos provetes.

Neste método, ajustaram-se os ensaios para deformações iniciais no intervalo de 4 a 5mm, de modo a potenciar a recuperação das misturas betuminosas em ensaio de ITS.

O tempo de repouso aplicado aos provetes, permite que os rejuvenescedores se difundam ao longo da zona fissurada. Consideraram-se tempos de repouso dos provetes MBC, MBO e MB de 24h, 72h e 96h.

Notou-se que os provetes MB atingiram uma força média maior, no primeiro ensaio de tração indireta, comparativamente aos provetes MBC e MBO, devido ao facto de serem mais rígidos. Consequentemente apresentaram uma taxa de recuperação inferior em relação aos provetes MBC e MBO.

Os provetes MBO apresentaram uma força média do ensaio de tração indireta superior aos provetes MBC, em todos os casos de tempo de repouso do trabalho experimental. Por outro lado, os provetes MBC apresentaram resultados de taxas de recuperação relativamente mais elevadas em relação aos provetes MBO. Não se verificaram diferenças significativas na taxa de recuperação dos provetes MBC e dos provetes MBO.

Com o intuito de simular o efeito do tráfego sobre os pavimentos fendilhados, foi avaliado, no estudo apresentado, o efeito do nível de carga aplicada (0kN, 5,0kN, 7,5kN e 10,0kN) sobre provetes MBC e MBO.

Observou-se alguma falta de consistência nos resultados do ensaio relativamente a força média e a taxa de recuperação das misturas betuminosas do ensaio de ITS. Possivelmente, esta situação resultou de se ter danificado menos ou mais os provetes, favorecendo assim uma melhor regeneração quando comparado com as outras condições de ensaio. Foi possível constatar que não existe uma dependência dos resultados a nível da carga axial aplicada sobre os provetes.

Pode assim concluir-se que os resultados obtidos, em termos de taxa de recuperação dos provetes ensaiados, são independentes do nível de carga axial aplicada.

Como a temperatura tem um efeito muito elevado no comportamento das misturas betuminosas foi avaliada a realização dos ensaios ITS a diferentes temperaturas: -14°C , 10°C e 20°C .

As temperaturas mais baixas (-14°C e 10°C) tornam o provete mais frágil. Isto proporcionou forças médias do ensaio de tração indireta elevadas. O dano nos provetes varia com a temperatura de ensaio. Os provetes MBC apresentaram valores mais baixos comparativamente com os provetes MBO. Os provetes, MBC e MBO, apresentaram taxas de recuperação relativamente semelhante.

Os resultados dos ensaios de tração indireta permitiram verificar algumas semelhanças nos resultados dos ensaios das misturas betuminosas com a incorporação de cápsulas de alginato de cálcio e o óleo de girassol. Considerou-se assim ser necessário identificar outros métodos de ensaio capazes de avaliar com mais eficácia o efeito da regeneração da mistura betuminosa com incorporação de cápsulas de alginato de cálcio.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Considera-se que os resultados alcançados contribuem para melhor apreciação da incorporação de cápsulas de alginato de cálcio em misturas betuminosas. Sendo assim, considera-se útil o desenvolvimento de alguns ensaios e estudos para melhor conhecer a capacidade e auto-regeneração das cápsulas na mistura. De seguida apresentam-se algumas sugestões de desenvolvimentos futuros:

- Estudo experimental com cargas cíclicas, mais representativas das condições reais em estrada.
- Diferentes tipos de cápsulas e de rejuvenescedores
- Modelação numérica do comportamento mecânico de misturas betuminosas com agentes encapsulados.

Referências bibliográficas

AL-MANSOORI, T. *et al.* - Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 155:2017) 1091–1100. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.137.

APEAGYEI, Alex K.; GRENFELL, James R. A.; AIREY, Gordon D. - Observation of reversible moisture damage in asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 60:2014) 73–80. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.033.

ASLI, Hallizza *et al.* - Investigation on physical properties of waste cooking oil - Rejuvenated bitumen binder. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 37:2012) 398–405. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042.

AURSTAD, Joralf *et al.* - The influence of asphalt workmanship on pavement service life. Em SUCHÝ, KAREL *et al.* (Eds.) - **6th Eurasphalt & Eurobitume Congress**. Prague : Czech Technical University in Prague, 2016

BAZIN, P.; SAUNIER, J. - Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes. Em . Michigan : [s.n.]

BHAIRAMPALLY, Rajesh; LYTTON, Robert; LITTLE, Dallas - Numerical and Graphical Method to Assess Permanent Deformation Potential for Repeated Compressive Loading of Asphalt Mixtures. **Transportation Research Record**. . ISSN 0361-1981. 1723:1 (2000) 150–158. doi: 10.3141/1723-19.

BRANCO, Fernando; FERREIRA, Paulo; PICADO-SANTOS, Luís - **Pavimentos Rodoviários**. 4^o ed. Coimbra : Almedina, 2011

COST, 333 - **COST 333: Development of New Bituminous Pavement Design Method: Final report of the Action**. ISBN 928286796X.

COSTA, Patrícia Lourenço - **Estudo da Compactabilidade em Laboratório de Misturas Betuminosas com Resíduos Plásticos**. Lisboa : Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015

DAI, Qingli; WANG, Zigeng; MOHD HASAN, Mohd Rosli - Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 49:2013) 729–737. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.089.

E.P. - **Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários**. Lisboa : Gabinete de Gestão da Rede, Estradas de Portugal S.A., Mar. 2008

E.P. - **Caderno de Encargos Tipo Obras. 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais**. Portugal : Estradas de Portugal, 2014

FÁTIMA ALEXANDRA BARATA ANTUNES BATISTA - **Novas técnicas de reabilitação de pavimentos (misturas betuminosas densas a frio).pdf**. Porto : Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, 2004

FHWA - Superpave gyratory compactors. 2010).

GARCÍA, Alvaro - Self-healing of open cracks in asphalt mastic. **Fuel**. . ISSN 00162361. 93:2012) 264–272. doi: 10.1016/j.fuel.2011.09.009.

GARCÍA, Alvaro *et al.* - Induction healing of dense asphalt concrete. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 49:2013) 1–7. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.105.

GARCÍA, Álvaro'. *et al.* - Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**. . ISSN 13595997. 44:2 (2011) 499–508. doi: 10.1617/s11527-010-9644-2.

GARCIA, Alvaro; AUSTIN, Christopher John; JELFS, Jonathan - Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules. **Journal of Cleaner Production**. . ISSN 09596526. 118:2016) 124–132. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.072.

GARCIA, Alvaro; JELFS, Jonathan; AUSTIN, Christopher John - Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 101:2015) 309–316. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.062.

GARCÍA, Álvaro; SCHLANGEN, Erik; VEN, Martin VAN DE - Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. **Fuel**. . ISSN 00162361. 90:2 (2011) 583–591. doi: 10.1016/j.fuel.2010.09.033.

JIMÉNEZ, Félix Edmundo Pérez; SÁNCHEZ, José Antonio Soto - **Manual de pavimentação**. Lisboa : [s.n.]

KARLSSON, Robert; ISACSSON, Ulf - Material-Related Aspects of Asphalt Recycling—State-of-the-Art. **Journal of Materials in Civil Engineering**. . ISSN 0899-1561. 18:February (2006) 81–92. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81).

KHAN, Ziauddin A *et al.* - Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 12:6–7 (1998) 373–384. doi: 10.1016/S0950-0618(98)00015-4.

LAMEIRÃO CORREIA, José Carlos - **Estudo do desempenho de misturas betuminosas para pavimentação com incorporação de betão britado reciclado**. [S.l.] : Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2016

LEDO DOS SANTOS, Mário Jorge - **Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis**. Aveiro : Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2009

LIMA DA SILVA, Fábio Alexandre - **Reabilitação de Pavimentos Rodoviários em Ambiente Urbano**. Aveiro : Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2013

LIU, Quantao *et al.* - Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 25:9 (2011) 3746–3752. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.016.

LIU, Quantao *et al.* - Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 29:2012) 403–409. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.058.

LIU, Quantao *et al.* - Unravelling porous asphalt concrete with induction heating. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 71:2014) 152–157. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.048.

LIU, Quantao *et al.* - A comparative study of the induction healing behaviors of hot and warm mix asphalt. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 144:2017) 663–670. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.195.

LIU, Quantao; SCHLANGEN, Erik; VEN, Martin VAN DE - Characterization of the material from the induction healing porous asphalt concrete trial section. **Materials and Structures**. 46:5 (2013) 831–839.

LU, Xiaohu; ISACSSON, Ulf - Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 16:1 (2002) 15–22. doi: 10.1016/S0950-0618(01)00033-2.

MAIA, Iva - **Caraterização De Patologias Em Pavimentos Rodoviários**. Porto : Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2012

MICAELO, R.; AL-MANSOORI, T.; GARCIA, A. - Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules. **Construction and Building Materials**. . ISSN 0950-0618. 123:2016) 734–744. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.095.

MICAELO, Rui - **Compactação de misturas betuminosas**. Porto : Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, 2008

MINHOTO, Manuel - **Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis**. [S.l.] : Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2005

MOOKHOEK, Steven D.; FISCHER, Hartmut R.; ZWAAG, Sybrand VAN DER - Alginate fibres containing discrete liquid filled vacuoles for controlled delivery of healing agents in fibre reinforced composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. . ISSN 1359835X. 43:12 (2012) 2176–2182. doi: 10.1016/j.compositesa.2012.08.006.

PAULI, Adam Troy - **Chemomechanics of Damage Accumulation and Damage-Recovery Healing in Bituminous Asphalt Binders**. [S.l.] : Tese de doutoramento, Universidade de Tecnologia de Delft, 2014

PEREIRA, P.; MIRANDA, C. - **Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários**. Braga : Universidade do Minho, 1999

PETERSON, ROBERT L.; MAHBOUB, KAMYAR C.; ANDERSON, R. MICHAEL; MASAD, EYAD; TASHMAN, Laith - Comparing Superpave Gyrotory Compactor Data to Field Core. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 16:1 (2004) 78–83.

QIU, J. - **Self Healing of Asphalt Mixtures: Towards a Better Understanding of the Mechanism**. [S.l.] : Tese de Doutoramento, Universidade de Tecnologia de Delft, 2012

SHEN, Junan; AMIRKHANIAN, Serji; AUNE MILLER, Jennifer - Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. **Journal of Materials in Civil Engineering**. . ISSN 0899-1561. 19:5 (2007) 376–384. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(376).

SOBRAL CAMPOS JACINTO, Manuel António - **Caracterização estrutural de pavimentos**. Porto : Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2003

SU, Jun Feng *et al.* - Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method. **Materials and Structures**. 48:12 (2015) 4067–4076.

SU, Jun Feng *et al.* - Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 106:2016) 317–329. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.120.

SU, Jun Feng; SCHLANGEN, Erik; WANG, Ying Yuan - Investigation the self-healing mechanism of aged bitumen using microcapsules containing rejuvenator. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 85:2015) 49–56. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.088.

TABAKOVIĆ, Amir *et al.* - The reinforcement and healing of asphalt mastic mixtures by rejuvenator encapsulation in alginate compartmented fibres. **Smart Materials and Structures**. 25:2016).

TABAKOVIĆ, Amir *et al.* - The compartmented alginate fibres optimisation for bitumen rejuvenator encapsulation. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**. . ISSN 20957564. 4:4 (2017) 347–359. doi: 10.1016/j.jtte.2017.01.004.

TERREL, Ronald L.; AL-SWAILMI, S. - **Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes : Test Selection**

TROXLER ELECTRONIC LABORATORIES, Inc - Manual of operation and maintenance - Model 4140 Gyratory Compactor. 2006).


VREEKER, Rob *et al.* - Drying and rehydration of calcium alginate gels. **Food Biophysics**. . ISSN 15571858. 3:4 (2008) 361–369. doi: 10.1007/s11483-008-9087-2.

ZARGAR, Majid *et al.* - Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. **Journal of Hazardous Materials**. . ISSN 03043894. 233–234:2012) 254–258. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.021.

Documentos normativos

| | |
|---------------------|--|
| EN 1426 | Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration |
| NP EN 12591 - 2011 | Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentos |
| EN 12592 | Bitumen and bituminous binders - Determination of solubility |
| EN 12593 | Bitumen and bituminous binders - Determination of the Fraass breaking point |
| EN 12595 | Bitumen and bituminous binders - Determination of kinematic viscosity |
| EN 12606-2 | Bitumen and bituminous binders – Determination of the paraffin wax content - Parte 2: Method by extraction |
| EN 12607-1 | Bitumen and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air – Part 1: RTFOT method |
| EN 12697-2 | Bituminous mixtures - Test method for hot mix asphalt - Part 2: Determination of particle size distribution |
| EN 12697-6 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens |
| EN 12697-11 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen |
| EN12697-23 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens |
| EN12697-31 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor |
| NP EN 13043-2004 | Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação |
| NP EN 13108-1: 2011 | Misturas betuminosas Especificações dos materiais parte 1: Betão betuminoso |

Anexo A - Ficha técnica do betume 35/50

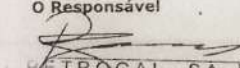
|  | | Certificado de Qualidade | | |
|---|--|--|------------|--|
| | | Nº de Série (Serial Number): 113/2017 | | Data de Emissão (Issue date): 13-03-2017 |
| PRODUTO (Product): Betume de Pavimentação 35/50 | | | | |
| LOTE (Batch nr.): 5650/029/17 | | | | |
| Documentos de referência: 2017008456/01/0 | | Emitido pelo laboratório acreditado N 90/L44 segundo a NP EN ISO/IEC 17025 | | |
| Relatórios de Ensaios N.º | | | | |
| MÉTODO | PROPRIEDADE | | RESULTADOS | Valores limite |
| EN 1426 (EN 12591:2009) | Penetração a 25°C, 100g, 5s (Consistência a temperaturas intermédias de serviço) | 0,1 mm | 46 | 35-50 |
| EN 1427 (EN 12591:2009) | Temperatura de Amolecimento (Consistência a temperaturas elevadas de serviço) | °C | 51 | 50-58 |
| EN 12595 | Viscosidade Cinemática a 135 °C | mm ² /s | 554 t) | ≥ 370 |
| EN 12592 | Solubilidade | % (m/m) | 100,0 t) | ≥ 99,0 |
| EN ISO 2592 | Ponto de Inflamação (Vaso Aberto) | °C | 343 t) | ≥ 240 |
| EN 12591-Anexo A (EN 12591:2009) | Índice de Penetração (Dependência da consistência em função da temperatura) | - | -1,1 | -1,5 - +0,7 |
| EN 12593 (EN 12591:2009) | Ponto de Fragilidade Fraass (Fragilidade a temperaturas baixas de serviço) | °C | -6 t) | ≤ -5 |
| EN 12606-2 | Teor em Parafinas ^b | % (m/m) | < 3,0 t) | ≤ 4,5 |
| Endurecimento | | | | |
| EN 12607-1 | Varição de Massa | % (m/m) | 0,0 t) | -0,5 - +0,5 |
| EN 1426 (EN 12591:2009) | Penetração a 25°C-100g-5s, (após EN 12607-1) (Durab. da consist. a temp. intermédias e elevadas de serv.) | % | 81 t) | ≥ 53 |
| Cálculo (EN 12591:2009) | Aumento da Temperatura de Amolecimento (Durab. da consist. a temp. intermédias e elevadas de serv.) | °C | 2,8 t) | ≤ 11 |
| Ensaios Adicionais | | | | |
| ASTM D341mod (EN 12591:2009) | Temperatura para viscosidade a 170 mm ² /s ^a | °C | 160 t) | A reportar |
| | Temperatura para viscosidade a 280 mm ² /s ^a | °C | 149 t) | A reportar |
| | Substancias perigosas regulamentadas ^a | | NPD | NPD |

ESTE DOCUMENTO SÓ PODE SER REPRODUZIDO NA ÍNTEGRA, SALVO AUTORIZAÇÃO EXPRESSA DA R&D-O-LOGÍSTICA. THIS DOCUMENT MAY ONLY BE REPRODUCED IN FULL, EXCEPT WITH APPROVAL OF R&D-O-LOGÍSTICA.


Documento inteiramente processado informaticamente. Full computer processed document.

OBSERVAÇÕES (notes):
^{t)} valores típicos (typical values)
^a NPD - Desempenho não determinado (no performance determined)
^b NR - Não requerido pela norma (no requirement)

O Responsável




PETROGAL, SA
 Parque da Boa Nova - AE
 Rua Dr. Marcos da Cruz
 Leça da Palmeira
 Telf - 229.992.726


 0866

Petróleos de Portugal - Petrolgal, S.A.
 Rua Tomás de Fátima, Torre C
 1900-209 LISBOA
 10
 N°002RPC2013-07-01

EN 12591:2009
 Betume de Pavimentação 35/50
 Utilização em pavimentação

Penetração a 25 °C: 35 - 50 x 0,1mm
 Temperatura de amolecimento: 50 - 55°C
 Temperatura Fragilidade de Fraass: ≤ -5°C
 Índice de penetração: -1,5 a +0,7
 Penetração média 25 °C: ± 10%
 Aumento da temperatura de amolecimento: ± 11 °C

|  LOGÍSTICA | | Certificado de Qualidade | | |
|--|---|---|----------------|-------------------|
| | | Nº de Série (Serial Number): 250/2017 | | |
| | | Data de Emissão (Issue date): 02-06-2017 | | |
| PRODUTO (Product): | | Betume de Pavimentação 35/50 | | |
| LOTE (Batch nr.): | | 5649/062/17 | | |
| Documentos de referência: Relatórios de Ensaios N.º | | Emitido pelo laboratório acreditado N.90/L44 segundo a NP EN ISO/IEC 17025 | | |
| | | 2017019056/01/0 | | |
| MÉTODO | PROPRIEDADE | RESULTADOS | Valores limite | |
| EN 1426 (EN 12591:2009) | Penetração a 25°C, 100g, 5s / (Consistencia a temperaturas intermédias de serviço) | 0.1 mm | 41 | 35-50 |
| EN 1427 (EN 12591:2009) | Temperatura de Amolecimento (Consistencia a temperaturas elevadas de serviço) | °C | 51 | 50-58 |
| EN 12595 | Viscosidade Cinemática a 135 °C | mm ² /s | 554 t) | ≥ 370 |
| EN 12592 | Solubilidade | % (m/m) | 100.0 t) | ≥ 99.0 |
| EN ISO 2592 | Ponto de Inflamação (Vaso Aberto) | °C | 343 t) | ≥ 240 |
| EN 12591-Anexo A (EN 12591:2009) | Índice de Penetração (Dependencia da consistencia em função da temperatura) | - | -1.3 | -1.5 - +0.7 |
| EN 12593 (EN 12591:2009) | Ponto de Fragilidade Fraass (Fragilidade a temperaturas baixas de serviço) | °C | -6 t) | ≤ -5 |
| EN 12606-2 | Teor em Parafinas ^b | % (m/m) | < 3.0 t) | ≤ 4.5 |
| Endurecimento | | | | |
| EN 12607-1 | Variação de Massa | % (m/m) | 0.0 t) | -0.5 - +0.5 |
| EN 1426 (EN 12591:2009) | Penetração a 25°C-100g-5s, (após EN 12607-1) (Durab. da consist. a temp. intermedias e elevadas de serv.) | % | 81 t) | ≥ 53 ^a |
| Cálculo (EN 12591:2009) | Aumento da Temperatura de Amolecimento (Durab. da consist. a temp. intermedias e elevadas de serv.) | °C | 2.8 t) | ≤ 11 |
| Ensaio Adicionais | | | | |
| ASTM D341mod | Temperatura para viscosidade a 170 mm ² /s ^b | °C | 160 t) | A reportar |
| ASTM D341mod (EN 12591:2009) | Temperatura para viscosidade a 280 mm ² /s ^b Substancias perigosas regulamentadas ^a | °C | 149 t) NPD | A reportar NPD |

ESTE DOCUMENTO SÓ PODE SER REPRODUZIDO NA ÍNTEGRA, SALVO AUTORIZAÇÃO EXPRESSA DA R&D-O-LOGÍSTICA. THIS DOCUMENT MAY ONLY BE REPRODUCED IN FULL, EXCEPT WITH APPROVAL OF R&D-O-LOGÍSTICA.

Documento inteiramente processado informaticamente. Full computer processed document

OBSERVAÇÕES (notes):

t) valores típicos (typical values)

^a NPD - Desempenho não determinado (no performance determined)

^b NR - Não requerido pela norma (no requirement)

O Responsável

PETROGAL, SA
 Parque da Boa Nova - AE
 Rua Dr. Marcos da Cruz
 Torre da Palmeira
 Teif - 229 992 726

Negócio de Betumes certificado de acordo com a ISO 9001:2008

CE

0866

No

Petróleos de Portugal - Petrogal, S.A.
 Rua Tomás de Fonseca, Torre C
 1800-209 LISBOA

10

Nº002RPC2013-07-01

EN 12591:2009

Betume de Pavimentação 35/50

Utilização em pavimentação

Penetração a 25 °C 35 - 50 ± 0.1mm
 Temperatura de amolecimento 50 - 58°C
 Temperatura Fragilidade de Fraass -2 - 2°C
 Índice de penetração -1.5 a +0.7
 Penetração retida 25 °C ≥ 53%
 Aumento da temperatura de amolecimento ≤ 11 °C

Anexo B – Resultados da afinidade entre o agregado e o betume

Tabela B.1- Resultados da afinidade entre o agregado e betume

| Superfície de agregado coberta com betume | | |
|---|------|----------|
| Tempo | Óleo | Cápsulas |
| Valor médio após 6 horas de rolamento | 88% | 86% |
| Valor médio após 24 horas de rolamento | 75% | 62% |
| Valor médio após 48 horas de rolamento | 58% | 56% |
| Valor médio após 72 horas de rolamento | 48% | 50% |

Anexo C – Propriedades volumétricas dos provetes

Tabela C.1- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 5 – 9)

| Identificação do provete | | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|--|----------------------|---------|--------|---------|---------|---------|
| t | Temperatura da água | (°C) | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| m ₁ | Massa do provete seco | (g) | 964,9 | 955,2 | 956,4 | 963,0 | 960,3 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio | (Mg/m ³) | 0,9981 | 0,9981 | 0,9981 | 0,9981 | 0,9981 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água | (g) | 574,9 | 569,0 | 568,7 | 573,9 | 571,6 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca | (g) | 965,3 | 955,8 | 956,9 | 963,3 | 961,3 |
| v | Volume do provete | (ml) | 391,1 | 387,6 | 388,9 | 390,1 | 390,4 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete | (Mg/m ³) | 2,467 | 2,465 | 2,459 | 2,468 | 2,460 |
| | | (Kg/m ³) | 2466,95 | 2464,6 | 2458,83 | 2468,41 | 2459,79 |
| | Porosidade | % | 3,26% | 3,35% | 3,58% | 3,20% | 3,54% |

Tabela C.2- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 10 – 14)

| Identificação do provete | | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|--|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| t | Temperatura da água | (°C) | 21 | 21 | 21 | 21 | 18 |
| m ₁ | Massa do provete seco | (g) | 960,4 | 961,2 | 956,3 | 958,7 | 954,2 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio | (Mg/m ³) | 0,9981 | 0,9981 | 0,9981 | 0,9981 | 0,9987 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água | (g) | 571,6 | 572,5 | 569,3 | 570,4 | 566,2 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca | (g) | 961,1 | 961,7 | 957,0 | 959,3 | 954,5 |
| v | Volume do provete | (ml) | 390,2 | 389,9 | 388,5 | 389,7 | 388,9 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete | (Mg/m ³) | 2,461 | 2,465 | 2,462 | 2,460 | 2,454 |
| | | (Kg/m ³) | 2461,22 | 2464,99 | 2461,57 | 2460,21 | 2453,74 |
| | Porosidade | % | 3,48% | 3,33% | 3,47% | 3,52% | 3,77% |

Tabela C.3- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 15 – 19)

| Identificação do provete | | | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|---|--|----------------------|--------|---------|--------|---------|---------|
| t | Temperatura da água | (°C) | 18 | 18 | 22 | 22 | 22 |
| m ₁ | Massa do provete seco | (g) | 963,3 | 960,8 | 946,8 | 961,4 | 960,9 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio | (Mg/m ³) | 0,9987 | 0,9987 | 0,9978 | 0,9978 | 0,9978 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água | (g) | 572,1 | 570,5 | 564,9 | 573,6 | 569,2 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca | (g) | 963,8 | 961,6 | 947,1 | 961,6 | 961,2 |
| v | Volume do provete | (ml) | 392,2 | 391,6 | 383,1 | 388,9 | 392,8 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete | (Mg/m ³) | 2,456 | 2,454 | 2,472 | 2,472 | 2,446 |
| | | (Kg/m ³) | 2455,7 | 2453,66 | 2471,5 | 2472,05 | 2445,99 |
| | Porosidade | % | 3,70% | 3,78% | 3,08% | 3,06% | 4,08% |

Tabela C.4- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 20 – 22, 21A, 23A)

| Identificação do provete | | 20 | 21 | 22 | 21A | 23A |
|---|---|---------|---------|---------|---------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 964,2 | 962,7 | 961,0 | 957,8 | 958,6 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9978 | 0,9978 | 0,9978 | 0,9978 | 0,9978 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 575,4 | 563,7 | 570,9 | 571,8 | 569,3 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 964,4 | 963,5 | 961,6 | 958,1 | 959,2 |
| v | Volume do provete (ml) | 389,9 | 400,6 | 391,6 | 387,2 | 390,8 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,473 | 2,403 | 2,454 | 2,474 | 2,453 |
| | (Kg/m ³) | 2472,94 | 2403,19 | 2454,15 | 2473,91 | 2452,9 |
| | Porosidade (%) | 3,02% | 5,76% | 3,76% | 2,98% | 3,81% |

Tabela C.5- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 25A, 26, 30 – 32)

| Identificação do provete | | 25A | 26 | 30 | 31 | 32 |
|---|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| t | Temperatura da água (°C) | 22 | 22 | 24 | 24 | 24 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 958,6 | 959,7 | 959,9 | 952,5 | 961,6 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9978 | 0,9978 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 568,7 | 561,6 | 572,0 | 567,7 | 573,9 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 959,1 | 960,7 | 960,4 | 953,4 | 961,9 |
| v | Volume do provete (ml) | 391,3 | 400,0 | 389,4 | 386,7 | 389,0 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,450 | 2,399 | 2,465 | 2,463 | 2,472 |
| | (Kg/m ³) | 2449,51 | 2399,21 | 2464,86 | 2463,38 | 2471,77 |
| | Porosidade (%) | 3,94% | 5,91% | 3,34% | 3,40% | 3,07% |

Tabela C.6- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 33 – 37)

| Identificação do provete | | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 |
|---|---|--------|---------|---------|---------|---------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 960,0 | 961,2 | 947,6 | 954,1 | 964,5 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 573,4 | 570,2 | 566,2 | 569,8 | 575,7 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 960,4 | 961,8 | 947,9 | 954,5 | 964,6 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,1 | 392,7 | 382,7 | 385,6 | 389,9 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,474 | 2,448 | 2,476 | 2,474 | 2,474 |
| | (Kg/m ³) | 2473,9 | 2447,81 | 2476,11 | 2474,05 | 2473,52 |
| | Porosidade (%) | 2,98% | 4,01% | 2,90% | 2,98% | 3,00% |

Tabela C.7- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 38 – 42)

| Identificação do provete | | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
|---|---|---------|---------|--------|---------|---------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 25 | 25 | 25 | 24 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 959,0 | 965,2 | 959,0 | 955,3 | 961,4 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9971 | 0,9971 | 0,9971 | 0,9974 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 573,0 | 576,5 | 573,1 | 568,6 | 573,3 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 959,2 | 965,6 | 959,2 | 955,9 | 961,9 |
| v | Volume do provete (ml) | 387,2 | 390,2 | 387,2 | 388,4 | 389,6 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,477 | 2,473 | 2,477 | 2,460 | 2,468 |
| | (Kg/m ³) | 2476,91 | 2473,36 | 2476,6 | 2459,65 | 2467,64 |
| | Porosidade (%) | 2,87% | 3,01% | 2,88% | 3,54% | 3,23% |

Tabela C.8- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 43 – 47)

| Identificação do provete | | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 |
|---|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 961,2 | 961,1 | 962,6 | 953,1 | 963,8 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 574,1 | 573,3 | 574,3 | 569,0 | 574,5 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 961,5 | 961,7 | 963,2 | 953,9 | 964,8 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,4 | 389,4 | 389,9 | 386,0 | 391,3 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,475 | 2,468 | 2,469 | 2,469 | 2,463 |
| | (Kg/m ³) | 2474,86 | 2467,94 | 2468,97 | 2469,38 | 2462,94 |
| | Porosidade (%) | 2,95% | 3,22% | 3,18% | 3,16% | 3,41% |

Tabela C.9- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 48 – 52)

| Identificação do provete | | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 |
|---|---|---------|---------|---------|---------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 970,4 | 960,8 | 964,1 | 960,4 | 961,3 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 578,5 | 573,8 | 575,5 | 572,3 | 573,9 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 970,6 | 961,0 | 964,6 | 961,1 | 961,5 |
| v | Volume do provete (ml) | 393,1 | 388,2 | 390,1 | 389,8 | 388,6 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,468 | 2,475 | 2,472 | 2,464 | 2,474 |
| | (Kg/m ³) | 2468,47 | 2475,27 | 2471,57 | 2463,51 | 2473,8 |
| | Porosidade (%) | 3,20% | 2,93% | 3,08% | 3,39% | 2,99% |

Tabela C.10- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 53 – 57)

| Identificação do provete | | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 954,4 | 969,2 | 962,8 | 962,1 | 962,8 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 569,1 | 578,1 | 574,6 | 573,5 | 573,4 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 955,1 | 969,6 | 963,3 | 962,5 | 963,5 |
| v | Volume do provete (ml) | 387,0 | 392,5 | 389,7 | 390,0 | 391,1 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,466 | 2,470 | 2,471 | 2,467 | 2,461 |
| | Porosidade (%) | 3,30% | 3,16% | 3,10% | 3,27% | 3,48% |

Tabela C.11- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 58 – 62)

| Identificação do provete | | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 955,5 | 964,1 | 965,4 | 962,4 | 965,3 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9976 | 0,9976 | 0,9976 | 0,9976 | 0,9976 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 569,2 | 575,1 | 574,6 | 573,8 | 575,7 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 956,3 | 964,4 | 966,0 | 962,9 | 965,7 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,1 | 390,2 | 392,3 | 390,0 | 390,9 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,462 | 2,471 | 2,461 | 2,468 | 2,469 |
| | Porosidade (%) | 3,44% | 3,10% | 3,51% | 3,22% | 3,18% |

Tabela C.12- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 63 – 67)

| Identificação do provete | | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 23 | 24 | 24 | 21 | 21 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 965,2 | 958,6 | 963,5 | 934,3 | 964,7 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9976 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9981 | 0,9981 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 575,3 | 570,9 | 574,6 | 556,0 | 575,6 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 965,9 | 959,9 | 964,5 | 935,6 | 965,9 |
| v | Volume do provete (ml) | 391,6 | 390,0 | 390,9 | 380,3 | 391,0 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,465 | 2,458 | 2,464 | 2,456 | 2,467 |
| | Porosidade (%) | 3,34% | 3,60% | 3,36% | 3,67% | 3,24% |

Tabela C.13- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 68 – 72)

| Identificação do provete | | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 21 | 19 | 19 | 19 | 16 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 963,7 | 961,8 | 962,3 | 963,1 | 956,5 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9981 | 0,9985 | 0,9985 | 0,9985 | 0,9990 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 575,0 | 573,3 | 572,8 | 574,0 | 567,9 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 964,9 | 963,2 | 963,9 | 964,5 | 958,1 |
| v | Volume do provete (ml) | 390,6 | 390,4 | 391,7 | 391,1 | 390,7 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,467 | 2,463 | 2,457 | 2,463 | 2,448 |
| | Porosidade (%) | 3,24% | 3,40% | 3,65% | 3,42% | 3,99% |

Tabela C.14- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 73 – 77)

| Identificação do provete | | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 16 | 16 | 16 | 17 | 17 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 957,7 | 962,6 | 964,9 | 955,4 | 962,1 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9990 | 0,9990 | 0,9990 | 0,9988 | 0,9988 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 569,8 | 573,2 | 574,0 | 569,0 | 574,3 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 958,8 | 963,9 | 966,0 | 956,8 | 963,0 |
| v | Volume do provete (ml) | 389,5 | 391,2 | 392,4 | 388,2 | 389,2 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,459 | 2,461 | 2,459 | 2,461 | 2,472 |
| | Porosidade (%) | 3,57% | 3,50% | 3,57% | 3,49% | 3,05% |

Tabela C.15- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 78 – 83)

| Identificação do provete | | 78 | 80 | 81 | 82 | 83 |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 961,3 | 960,5 | 968,8 | 962,1 | 958,1 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 572,5 | 573,1 | 577,1 | 571,6 | 571,5 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 962,2 | 961,5 | 969,8 | 963,3 | 959,3 |
| v | Volume do provete (ml) | 390,1 | 388,8 | 393,1 | 392,1 | 388,3 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,464 | 2,470 | 2,464 | 2,453 | 2,467 |
| | Porosidade (%) | 3,37% | 3,12% | 3,36% | 3,79% | 3,24% |

Tabela C.16- Propriedades volumétricas dos provetes (MBO 84 – 88)

| Identificação do provete | | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 |
|---|---|---------|---------|--------|---------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 960,9 | 964,0 | 962,6 | 958,5 | 956,4 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 573,5 | 574,6 | 574,1 | 571,5 | 570,2 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 961,5 | 965,6 | 963,7 | 959,1 | 958,1 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,5 | 391,5 | 390,1 | 388,1 | 388,4 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Mg/m ³) | 2,473 | 2,462 | 2,468 | 2,470 | 2,462 |
| | (Kg/m ³) | 2473,41 | 2462,29 | 2467,7 | 2469,57 | 2462,5 |
| | Porosidade (%) | 3,00% | 3,44% | 3,23% | 3,15% | 3,43% |

Tabela C.17- Propriedades volumétricas dos provetes (MB 1 – 3)

| Identificação do provete | | 1 | 2 | 3 | | |
|---|---|--------|---------|---------|--|--|
| t | Temperatura da água (°C) | 21 | 21 | 21 | | |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 954,0 | 964,2 | 965,2 | | |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9981 | 0,9981 | 0,9981 | | |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 569,4 | 574,2 | 575,3 | | |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 955,4 | 965,4 | 966,8 | | |
| v | Volume do provete (ml) | 386,8 | 391,9 | 392,2 | | |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Mg/m ³) | 2,466 | 2,460 | 2,461 | | |
| | (Kg/m ³) | 2466,1 | 2460,04 | 2460,82 | | |
| | Porosidade (%) | 3,29% | 3,53% | 3,50% | | |

Tabela C.18- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 1C – 5C)

| Identificação do provete | | 1 C | 2 C | 3 C | 4 C | 5 C |
|---|---|---------|--------|---------|---------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 939,9 | 954,0 | 945,6 | 953,0 | 946,1 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 554,6 | 567,4 | 562,8 | 567,1 | 563,1 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 940,6 | 954,8 | 946,5 | 953,7 | 946,8 |
| v | Volume do provete (ml) | 387,1 | 388,4 | 384,7 | 387,6 | 384,7 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Mg/m ³) | 2,428 | 2,456 | 2,458 | 2,459 | 2,459 |
| | (Kg/m ³) | 2427,95 | 2456 | 2457,72 | 2458,61 | 2459,2 |
| | Porosidade (%) | 4,79% | 3,69% | 3,62% | 3,58% | 3,56% |

Tabela C.19- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 6C – 10C)

| Identificação do provete | | 6 C | 7 C | 8 C | 9 C | 10 C |
|---|---|---------|---------|---------|---------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 954,6 | 956,2 | 954,1 | 955,1 | 946,1 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 568,1 | 569,1 | 567,7 | 568,1 | 564,0 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 955,2 | 956,7 | 955,0 | 956,0 | 946,8 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,1 | 388,6 | 388,3 | 388,9 | 383,8 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,459 | 2,460 | 2,457 | 2,456 | 2,465 |
| | (Kg/m ³) | 2459,41 | 2460,47 | 2457,33 | 2455,74 | 2464,9 |
| | Porosidade (%) | 3,55% | 3,51% | 3,63% | 3,70% | 3,34% |

Tabela C.20- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 11C – 15C)

| Identificação do provete | | 11 C | 12 C | 13 C | 14 C | 15 C |
|---|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 955,5 | 954,9 | 956,4 | 946,9 | 954,0 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 568,8 | 568,4 | 569,4 | 564,4 | 568,4 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 956,0 | 955,9 | 957,5 | 947,9 | 954,9 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,1 | 388,4 | 389,1 | 384,5 | 387,5 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,462 | 2,458 | 2,458 | 2,463 | 2,462 |
| | (Kg/m ³) | 2461,76 | 2458,33 | 2457,77 | 2462,72 | 2461,56 |
| | Porosidade (%) | 3,46% | 3,59% | 3,62% | 3,42% | 3,47% |

Tabela C.21- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 16C – 20C)

| Identificação do provete | | 16 C | 17 C | 18 C | 19 C | 20 C |
|---|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m ₁ | Massa do provete seco (g) | 954,2 | 954,0 | 955,4 | 957,2 | 950,0 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m ₂ | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 566,8 | 568,0 | 568,5 | 569,6 | 564,8 |
| m ₃ | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 955,3 | 955,0 | 956,6 | 958,2 | 951,3 |
| v | Volume do provete (ml) | 389,5 | 388,1 | 389,1 | 389,6 | 387,5 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | (Mg/m ³) | 2,450 | 2,458 | 2,456 | 2,457 | 2,452 |
| | (Kg/m ³) | 2449,98 | 2458,36 | 2455,64 | 2457,04 | 2451,65 |
| | Porosidade (%) | 3,92% | 3,59% | 3,70% | 3,65% | 3,86% |

Tabela C.22- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 21C – 25C)

| Identificação do provete | | 21 C | 22 C | 23 C | 24 C | 25 C |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 954,7 | 946,9 | 957,3 | 955,7 | 956,8 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 568,4 | 561,1 | 569,9 | 568,2 | 569,5 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 955,5 | 948,5 | 958,3 | 956,7 | 957,7 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,0 | 388,5 | 389,4 | 389,5 | 389,1 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,460 | 2,437 | 2,458 | 2,454 | 2,459 |
| | Porosidade (%) | 3,52% | 4,42% | 3,60% | 3,78% | 3,58% |

Tabela C.23- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 26C – 33C)

| Identificação do provete | | 26 C | 27 C | 28 C | 32 C | 33 C |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 24 | 24 | 24 | 19 | 19 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 954,8 | 951,6 | 959,1 | 956,7 | 954,6 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9974 | 0,9974 | 0,9974 | 0,9985 | 0,9985 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 568,5 | 566,2 | 571,0 | 568,6 | 567,2 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 955,6 | 952,4 | 960,2 | 957,7 | 955,5 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,1 | 387,2 | 390,3 | 389,7 | 388,9 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,460 | 2,457 | 2,458 | 2,455 | 2,455 |
| | Porosidade (%) | 3,52% | 3,63% | 3,62% | 3,73% | 3,74% |

Tabela C.24- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 34C – 38C)

| Identificação do provete | | 34 C | 35 C | 36 C | 37 C | 38 C |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 19 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 950,2 | 954,6 | 953,5 | 955,5 | 954,9 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9985 | 0,9990 | 0,9990 | 0,9990 | 0,9990 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 564,2 | 566,6 | 566,6 | 566,4 | 566,2 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 951,6 | 955,7 | 954,5 | 956,8 | 956,2 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,0 | 389,4 | 388,3 | 390,7 | 390,4 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,449 | 2,451 | 2,456 | 2,445 | 2,446 |
| | Porosidade (%) | 3,95% | 3,87% | 3,71% | 4,10% | 4,09% |

Tabela C.25- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 39C – 43C)

| Identificação do provete | | 39 C | 40 C | 41 C | 42 C | 43 C |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 955,7 | 953,0 | 954,8 | 953,1 | 945,6 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 568,8 | 566,9 | 566,1 | 566,8 | 561,5 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 956,7 | 954,0 | 956,7 | 953,9 | 947,3 |
| v | Volume do provete (ml) | 388,3 | 387,6 | 391,0 | 387,6 | 386,2 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,461 | 2,459 | 2,442 | 2,459 | 2,448 |
| | Porosidade (%) | 3,48% | 3,57% | 4,25% | 3,57% | 3,98% |

Tabela C.26- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 44C – 48C)

| Identificação do provete | | 44 C | 45 C | 46 C | 47 C | 48 C |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| t | Temperatura da água (°C) | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 954,9 | 958,2 | 957,7 | 959,0 | 957,3 |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 | 0,9988 |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 568,2 | 569,4 | 568,8 | 568,6 | 568,0 |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 955,6 | 957,5 | 956,8 | 958,1 | 956,5 |
| v | Volume do provete (ml) | 387,9 | 388,6 | 388,5 | 390,0 | 388,9 |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,462 | 2,466 | 2,465 | 2,459 | 2,461 |
| | Porosidade (%) | 3,47% | 3,31% | 3,33% | 3,57% | 3,48% |

Tabela C.27- Propriedades volumétricas dos provetes (MBC 49C, 50C)

| Identificação do provete | | 49 C | 50 C | | |
|---|---|--------|--------|--|--|
| t | Temperatura da água (°C) | 17 | 17 | | |
| m_1 | Massa do provete seco (g) | 958,2 | 960,4 | | |
| $\rho_w=1,00025205+(7,5 \cdot 9 \cdot t-5,32 \cdot t^2)/10^6$ | Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m ³) | 0,9988 | 0,9988 | | |
| m_2 | Massa do provete saturado dentro de água (g) | 568,9 | 570,5 | | |
| m_3 | Massa do provete saturado com superfície seca (g) | 957,3 | 959,8 | | |
| v | Volume do provete (ml) | 388,9 | 389,7 | | |
| $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$ | Baridade do provete (Kg/m ³) | 2,464 | 2,464 | | |
| | Porosidade (%) | 3,37% | 3,35% | | |

