

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

**A UTILIZAÇÃO DE ESPUMAS DE BETUME
NA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Miguel Sérgio Miguéns Rufino da Conceição Teixeira

Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação,
realizada sob a supervisão do
Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro
e com co-orientação de Dr^a Eng.^a Maria Conceição Azevedo

Departamento de Engenharia Civil da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Janeiro de 2006

RESUMO

O aumento das necessidades de mobilidade da população tem contribuído para uma maior procura dos vários modos de transporte e em particular, do modo rodoviário.

Para fazer face a esta pressão sobre as infra-estruturas viárias, que se traduz muitas vezes num agravamento do congestionamento, tem-se optado ao longo dos últimos anos pelo aumento da extensão da infra-estrutura. No caso particular da rodovia em Portugal, ocorreu um crescimento intenso decorrente da construção, facto que gera agora a necessidade de intervir ao nível da manutenção, conservação e reabilitação.

Uma das intervenções possíveis para efectuar a conservação e reabilitação de pavimentos é a reciclagem a frio de pavimentos “*in-situ*” com espumas de betume, que se apresenta como uma solução menos poluente e economicamente viável.

As publicações existentes nesta área e a implementação prática de soluções constituem um indício animador na busca de alternativas que minorem os impactos associados à manutenção dos pavimentos.

O caso de estudo realizado em laboratório em Stellenbosch (África do Sul) permite um melhor conhecimento acerca dos procedimentos de identificação das características dos materiais que baseiam o dimensionamento de um pavimento usando a técnica de reciclagem de pavimentos com espumas de betume.

Este trabalho constitui um contributo adicional para a investigação nesta área e em particular, para uma melhor compreensão desta técnica, assim como dar suporte a estudos mais detalhados que explorem as potencialidades da reciclagem de pavimentos com espumas de betume.

ABSTRACT

The increasing in population mobility needs has contributed to a major demand on different modes of transport and particularly, on the road transport.

During the last decades, in order to face this pressure on transport infrastructures, measured most of the times through an increase on congestion, policy makers and planners had tried to increase the extension of infrastructures. In the specific case of road infrastructure in Portugal, there was a massive growth generated by construction. This fact is creating now the need to work at a different level: to maintain, to conserve and to rehabilitate the existing roads.

One of the possible options to conserve and rehabilitate road infrastructures is the cold in place recycling of pavements through the use of foamed bitumen, which is a less pollutant and economically feasible solution.

The existing literature on this topic and the implementation of practical experiences constitute an encouraging indicator in the research for alternative techniques and technologies to decrease impacts related to road infrastructure maintenance.

The case study presented on the thesis was carried out in a laboratory located in Stellenbosch (South Africa). Its main objective was to allow a better knowledge about the practical proceedings adopted to identify the characteristics of materials, which are the basis of the project of a road infrastructures recycling using foamed bitumen.

This thesis is an additional contribution to the research on this topic and in matter, to a better understanding about the technique of recycling road infrastructures with foamed bitumen. The thesis also intends to be helpful for further research that studies the use of foamed bitumen in road infrastructures recycling.

A UTILIZAÇÃO DE ESPUMAS DE BETUME NA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Palavras Chave:

Espumas de Betume

Misturas Betuminosas

Reciclagem

Pavimentos Flexíveis

THE USE OF FOAM BITUMEN IN FLEXIBLE PAVEMENT RECYCLING

Key-Words:

Foam Bitumen

Bituminous Mixtures

Recycling

Flexible Pavements

AGRADECIMENTOS

A realização da tese de mestrado foi um exercício de persistência e ponderação, que se tornou mais possível com o contributo fundamental daqueles a quem deixo aqui os meus agradecimentos.

Começo por agradecer à Sandra, pelo apoio, carinho, estímulo, compreensão e equilíbrio sempre revelados. E claro, pela inesgotável paciência que incessantemente demonstrou.

Aos meus pais por serem a minha referência de persistência e bom senso, por me terem ensinado que as dificuldades são apenas obstáculos que temos de ultrapassar e por me terem proporcionado ao longo da vida as ferramentas necessárias para finalizar mais esta etapa. À minha irmã, pela alegria contagiante com que me motivou.

Ao Prof. Doutor Álvaro Costa pela amizade e motivação com que me impulsionou ao longo desta tese.

Ao Prof. Doutor Jaime Ribeiro e à Doutora Engenheira Maria da Conceição Azevedo pela orientação e co-orientação desta tese, respectivamente.

Ao Prof. Doutor Kim Jenkins pelo acompanhamento, formação e disponibilidade demonstrada durante a elaboração do caso de estudo na Universidade de Stellenbosch.

Ao Prof. Doutor Frederick Hugo pelo interesse demonstrado no trabalho e pelas suas sugestões técnicas.

Ao colega Riaan Burger pela colaboração durante a realização dos ensaios descritos no capítulo 6 desta tese.

Ao Dr. Sapinho e à Moviter por me terem proporcionado a oportunidade e o apoio necessários à minha deslocação a África do Sul.

ÍNDICE GERAL

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | |
| 1.1 Contexto | 2 |
| 1.2 Objectivos | 4 |
| 1.3 Metodologia | 4 |
| 1.4 Estrutura Formal | 5 |
| 2. ENQUADRAMENTO TECNICO | |
| 2.1 O Aparecimento das Espumas de Betume | 8 |
| 2.2 O Processo de Produção das Espumas de Betume | 9 |
| 2.3 Utilização das Espumas de Betume nos Pavimentos Rodoviários | 11 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA | |
| 3.1 Introdução | 16 |
| 3.2 Betume | 17 |
| 3.3 Agregados | 18 |
| 3.4 Espuma de Betume | 20 |
| 3.5 Mistura de Espuma | 21 |
| 4. ESPUMAS DE BETUME | |
| 4.1 Introdução | 28 |
| 4.2 Formação da Espuma de Betume | 29 |
| 4.3 Caracterização das Espumas de Betume | 30 |
| 4.4 "Queda" das Espumas de Betume | 32 |
| 4.5 O Índice de Espuma, "Foam Index" | 36 |
| 4.6 Algumas Considerações gerais sobre a Produção de Espumas | 41 |
| 5. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ESPUMAS DE BETUME | |
| 5.1 Introdução | 46 |
| 5.2 Tipos de Reciclagem de Pavimentos | 49 |
| 5.3 Reciclagem de Pavimentos a Frio " <i>In-Situ</i> " | 50 |
| 5.4 Utilização das Espumas de Betume na Reciclagem a Frio | 52 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.4.1 | Características do Pavimento | 52 |
| 5.4.2 | Estudo das Misturas de Espumas em Laboratório | 53 |
| 5.4.3 | Projecto e Intervenção | 58 |
| 5.5 | Breve Exposição de Algumas Intervenções Efectuadas | 59 |
| 5.5.1 | A Experiência do QMRD-Austrália | 60 |
| 5.5.1.1 | A Experiência de Gladfield | 60 |
| 5.5.1.2 | A Experiência de Rainbow Beach | 61 |
| 5.5.1.3 | A Experiência de Inglewood | 62 |
| 5.5.1.4 | A Intervenção de New England | 63 |
| 5.5.2 | A Experiência em Portugal | 64 |
| 5.5.3 | A Experiência em Portugal | 66 |
| 5.5.3.1 | A RODOVIA PR-151 | 66 |
| 5.5.3.2 | A RODOVIA SP-330 | 67 |
| 5.5.3.3 | A RODOVIA BR-277 | 68 |
| 5.5.3.4 | A RODOVIA BR-354 | 68 |
| 6. | CASO DE ESTUDO | |
| 6.1 | Introdução | 71 |
| 6.2 | Caracterização do Pavimento | 72 |
| 6.3 | Composição das Misturas com Espuma de Betume | 75 |
| 6.4 | Ensaio Triaxiais Realizados | 79 |
| 6.4.1 | MONOTÓNICOS (ENVOLVENTE DE MOHR-COULOMB) | 79 |
| 6.4.2 | ENSAIOS CICLÍCOS (MÓDULO ELÁSTICO) | 92 |
| 7. | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | |
| 7 | Conclusões e Recomendações | 98 |
| | BIBLIOGRAFIA | |
| | Referências Bibliográficas | 102 |
| | Bibliografia | 105 |
| | ANEXOS | |

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Injector idealizado por Csanyi

FIGURA 2.2 - Produção de Espuma de Betume numa Câmara de Expansão

FIGURA 2.3 - Características Comportamentais de Materiais Utilizados em Pavimentos Flexíveis

FIGURA 3.1 - Factores Influentes nas Propriedades da Mistura durante a sua Produção

FIGURA 3.2 - Fusos Granulométricos definidos por Akeroyd and Hicks

FIGURA 3.3 - ER e $\tau_{1/2}$ em Função da percentagem da Água

FIGURA 4.1 - Esquema de uma Câmara de Expansão

FIGURA 4.2 - Relação das Propriedades de uma Espuma com a Percentagem de Água

FIGURA 4.3 - Exemplo de uma Curva de Queda de uma Espuma

FIGURA 4.4 - Ciclo de Vida de uma Espuma Betuminosa

FIGURA 4.5 - Representação da Expansão Real

FIGURA 4.6 - Curvas de Relação entre a Expansão Real e a Expansão Medida

FIGURA 4.7 - Curva de "Queda"

FIGURA 4.8 - Foam Index em Função da Percentagem de Água

FIGURA 5.1 - Evolução do "Pensar" do Processo de Reabilitação de Pavimentos

FIGURA 5.2 - “Comboios” de Reciclagem

FIGURA 5.3 - Câmara de Reciclagem

FIGURA 5.4 - Intervalos de Valores do FI

FIGURA 6.1 - Perfil Transversal do Pavimento

FIGURA 6.2 - Fendas

FIGURA 6.3 - Reparações Localizadas

FIGURA 6.4 - Estrutura 1

FIGURA 6.5 - Estrutura 2

FIGURA 6.6 - Estrutura 3

FIGURA 6.7 - Estruturas do Pavimento

FIGURA 6.8 - Fusos Granulométricos das Camadas das Misturas

FIGURA 6.9 - Provetes antes dos Ensaios

FIGURA 6.10 - Aparelho de Ensaio

FIGURA 6.11 - Célula Triaxial

FIGURA 6.12 - Envolvente de Rotura de Mohr_Coulomb

FIGURA 6.13 - Colocação da Membrana de Látex

FIGURA 6.14 - Selagem da Membrana de Látex

FIGURA 6.15 - Carga aplicada em Função da Extensão Axial para a Mistura A

FIGURA 6.16 - Carga aplicada em Função da Extensão Axial para a Mistura B

FIGURA 6.17 - Carga aplicada em Função da Extensão Axial para a Mistura C

FIGURA 6.18 - Carga aplicada em Função da Extensão Axial para a Mistura D

FIGURA 6.19 - Carga aplicada em Função da Extensão Axial para a Mistura E

FIGURA 6.20 - Carga aplicada em Função da Extensão Axial para a Mistura F

FIGURA 6.21 - Carga aplicada em Função da Extensão Axial para a Mistura G

FIGURA 6.22 - Envolvente de Mohr-Coulomb da Mistura A

FIGURA 6.23 - Envolvente de Mohr-Coulomb da Mistura B

FIGURA 6.24 - Envolvente de Mohr-Coulomb da Mistura C

FIGURA 6.25 - Envolvente de Mohr-Coulomb da Mistura D

FIGURA 6.26 - Envolvente de Mohr-Coulomb da Mistura E

FIGURA 6.27 - Envolvente de Mohr-Coulomb da Mistura F

FIGURA 6.28 - Envolvente de Mohr-Coulomb da Mistura G

FIGURA 6.29 - Representação gráfica do Módulo Elástico em Função do Total das Tensões Principais

FIGURA 6.30 - Colocação da Membrana

FIGURA 6.31 - Selagem da Membrana

FIGURA 6.32 - Módulo Elástico em função do Total das Tensões Principais

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 - Relação entre Soloss e Espumas

TABELA 3.2 - Percentagem de betume a utilizar na mistura em função do Agregado Fino

TABELA 6.1 - Percentagens de cada Camada Reciclada na Mistura

TABELA 6.2 - Valores obtidos nos Ensaio

TABELA 6.3 - Tensões de Rotura

TABELA 6.4 - Acréscimo na Tensão de Rotura relativamente á Mistura A

TABELA 6.5 - Acréscimo na Tensão de Rotura relativamente às misturas B e E

TABELA 6.6 - Combinação de Tensões para Ensaio

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|--|
| CBR | <i>California Bearing Ratio</i> |
| C_x | Calor específico |
| E_x | Energia |
| ER | Expansão |
| ERa | Expansão máxima real |
| ERm | Expansão máxima medida |
| $ER(t)$ | Expansão função do tempo após descarga |
| FI | Índice de Espuma (Foam Index) |
| MMC | Percentagem óptima de humidade de moldagem |
| m_x | Massa |
| n | Número de moles |
| OMC | Percentagem óptima de de humidade de compactação |
| p | Pressão |
| t | Tempo |
| t_f | Temperatura final |
| t_i | Temperatura inicial |
| ts | Tempo de spray |
| V | Volume |
| $\tau_{1/2}$ | Semi - Vida |