

PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS DE MISTURAS BETUMINOSAS (COM E SEM FIBRAS)

PEDRO MIGUEL LOPES FONSECA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

Co-Orientador: Engenheiro Adriano Manuel da Silva Teixeira

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

“O importante para uma pessoa não são os seus sucessos mas sim quanto os deseja”

Khalil Gibran

AGRADECIMENTOS

À minha família, com especial destaque para a minha mãe, à minha namorada e aos meus amigos pelo apoio, compreensão e incentivos no decorrer desta longa jornada.

Ao Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro e ao Engenheiro Adriano Teixeira, pela simpatia, ensinamentos e orientações, essências para a realização deste estudo.

À Engenheira Joana Santos e ao Eduardo pelo apoio e disponibilidade prestados na elaboração deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como âmbito o estudo das metodologias mais adequadas para determinar as propriedades volumétricas de misturas betuminosas do tipo ‘Stone Mastic Asphalt’. Em laboratório, foram preparadas diferentes misturas fazendo variar a percentagem em fibras e em betume e realizados os respetivos ensaios para a determinação da baridade, baridade máxima teórica, porosidade, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume, que são as propriedades volumétricas em análise.

Para a sua realização foram fundamentais os conhecimentos adquiridos nas unidades curriculares Pavimentos e Obras Rodoviárias, administradas no 5º ano da opção de Vias de Comunicação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Como consequência de ser um trabalho de fim de curso, procurou-se ainda organizar a informação contida nos manuais que abordam este tema e fornecer uma explicação para os critérios preconizados pelas Normas Europeias.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas Betuminosas, Betume, Deformação, Módulo de Deformabilidade.

ABSTRACT

The present work aims to study the most appropriate methodologies to determine the volumetric properties of bituminous mixtures type Stone Mastic Asphalt. In the laboratory, different mixtures were prepared by varying the percentage of fibers and bitumen and performed their tests to determine the bulk density, maximum density, porosity, percentage of voids in the mixture of aggregates and the percentage of voids filled with mixture of aggregates bitumen, which are the properties of volumetric analysis.

For its implementation were fundamental knowledge gained in units 'Pavimentos' and 'Obras Rodoviárias', administered in the 5th year of the option of 'Vias de Comunicação' in Civil Engineering at the Faculty of Engineering, University of Porto.

As a result of being a job on graduation, it was still organizing the information in the manuals that address this issue and provide an explanation of the criteria recommended by European Standards.

KEYWORDS: Bituminous Mixtures, Bitumen, Deformation, Deformability Modulus.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
----------------------------	----------

2. OS PAVIMENTOS	3
-------------------------------	----------

2.1. GENERALIDADES	3
---------------------------------	----------

2.2. TIPOS SE PAVIMENTOS	4
---------------------------------------	----------

2.2.1. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	5
-----------------------------------	---

2.2.2. PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS.....	7
-------------------------------------	---

2.2.3. PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	8
--------------------------------	---

2.3. EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO	9
--	----------

2.3.1. EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO FUNCIONAIS.....	9
---	---

2.3.2. EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO ESTRUTURAIS	9
---	---

2.4. SOLICITAÇÕES DE PAVIMENTOS.....	10
---	-----------

2.4.1. AÇÕES DIRETAS	10
----------------------------	----

2.4.2. AÇÕES INDIRETAS.....	11
-----------------------------	----

2.4.2.1. Retração	11
-------------------------	----

2.4.2.2. Dilatação térmica.....	11
---------------------------------	----

2.4.2.3. Empenamento	12
----------------------------	----

2.5. DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS	13
--	-----------

2.5.1. FENDILHAMENTO.....	15
---------------------------	----

2.5.1.1. Fendilhamento por fadiga.....	16
--	----

2.5.1.2. Fendilhamento induzido termicamente	16
--	----

2.5.1.3. Fendilhamento com origem na superfície	16
---	----

2.5.1.4. Reflexão de fendas em reforços de pavimentos.....	17
--	----

2.6. REFORÇO DE PAVIMENTOS	18
---	-----------

2.6.1. ELEMENTOS DE REFORÇO ESTRUTURAL	18
--	----

2.6.1.1. Geossintético.....	18
-----------------------------	----

2.6.1.2. Geocélula	18
--------------------------	----

2.6.1.3. Geogrelhas	19
2.6.1.4. Geotêxtil.....	20
2.6.1.5. Malhas de aço	20
2.6.2. REFORÇO COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRAS POLIMÉRICAS NA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS.....	21

3. SMA, O CRESCER DE UMA NECESSIDADE

3.1. ENQUADRAMENTO	27
3.2. CONTEXTUALIZAÇÃO	29
3.3. DEFINIÇÃO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	30
3.4. CARACTERÍSTICAS E DESEMPENHO DA MISTURA BETUMINOSA SMA	32
3.5. O SMA EM PORTUGAL	34

4. O SMA E A ANÁLISE DAS PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS.....

4.1. COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA DAS MISTURAS BETUMINOSAS	37
4.2. PREPARAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS SMA	40
4.2.1. TEMPERATURA DA MISTURA.....	40
4.2.2. PREPARAÇÃO DO AGREGADO, FILER E FIBRAS	40
4.2.3. PREPARAÇÃO DO BETUME	42
4.2.4. PROCESSO DE MISTURA	42
4.3. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS ENSAIADAS	43
4.4. BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA DAS MISTURAS BETUMINOSAS	44
4.4.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS (PROCEDIMENTOS A E B).....	44
4.4.2. MATERIAIS E REAGENTES	44
4.4.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	45
4.4.4. MODO DE PROCEDER	46
4.4.4.1. Procedimento A - Volumétrico.....	46
4.4.4.2. Procedimento B - Hidrostático.....	46
4.4.4.3. Procedimento C - Matemático	46
4.4.5. CÁLCULOS	47
4.4.5.1. Procedimento A - Volumétrico.....	48
4.4.5.2. Procedimento B - Hidrostático	48

4.4.5.3. Procedimento C - Matemático.....	49
4.4.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4.5. BARIDADE DOS PROVETES DE MISTURAS BETUMINOSAS	52
4.5.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS.....	52
4.5.2. MATERIAIS E REAGENTES.....	53
4.5.3. PREPARAÇÃO DOS PROVETES	53
4.5.3.1. Equipamento e Utensílios	53
4.5.3.2. Procedimento	53
4.5.3.3. Dimensões e Armazenamento	54
4.5.3.4. Provetes	54
4.5.4. DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS PROVETES	55
4.5.4.1. Equipamento e Utensílios	55
4.5.4.2. Medição da altura	55
4.5.4.3. Medição do diâmetro	55
4.5.5. MODO DE PROCEDER.....	55
4.5.5.1. Procedimento A – A Seco	55
4.5.5.2. Procedimento B – Provede Saturado com Superfície Seca (SSD)	56
4.5.5.3. Procedimento C – Provede Selado	56
4.5.5.4. Procedimento D – Provede Geométrico	56
4.5.6. CÁLCULOS.....	56
4.5.6.1. Procedimento A – A Seco	57
4.5.6.2. Procedimento B – Provede Saturado com Superfície Seca (SSD)	57
4.5.6.3. Procedimento C – Provede Selado	57
4.5.6.4. Procedimento D – Provede Geométrico	58
4.5.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
4.6. POROSIDADE, VMA E VFB DOS PROVETES DE MISTURAS BETUMINOSAS	67
4.6.1. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE (V_M)	67
4.6.2. DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM DE VAZIOS NA MISTURA DE AGREGADOS PREENCHIDOS COM BETUME (VFB)	67
4.6.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
5. CONCLUSÃO	73

BIBLIOGRAFIA	75
---------------------------	-----------

ANEXOS	I
---------------------	----------

A.1 – COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS ENSAIADAS	III
--	------------

A.2 – BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA	IX
--	-----------

A.3 – DIMENSÕES MÉDIAS DOS PROJETES	XVII
--	-------------

A.4 – BARIDADE	XXI
-----------------------------	------------

A.5 – POROSIDADE, VMA E VFB	XXIX
--	-------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Troço do IP3	3
Fig. 2.2 – Exemplo de um pavimento irregular	4
Fig. 2.3 – Estrutura de um pavimento	5
Fig. 2.4 – Estrutura de um pavimento flexível.....	5
Fig. 2.5 – Aplicação da camada de desgaste de 4cm	6
Fig. 2.6 – Estrutura de um pavimento semirrígido	8
Fig. 2.7 – Estrutura de um pavimento rígido	8
Fig. 2.8 – Avaliação do desempenho de um pavimento	9
Fig. 2.9 – Pavimento flexível com deformação ocorrida na superfície	10
Fig. 2.10 – Rodeiras por deformação permanente das misturas betuminosas	11
Fig. 2.11 – Empenamento no período diurno.....	12
Fig. 2.12 – Empenamento no período noturno	12
Fig. 2.13 – Pavimento em ruína	13
Fig. 2.14 – Abatimento da camada inferior	14
Fig. 2.15 – Compactação desadequada de uma mistura betuminosa.....	14
Fig. 2.16 – Aparecimento de fendas devido à baixa capacidade de carga de um pavimento flexível ..	15
Fig. 2.17 – Selagem de fendas na superfície de um pavimento.....	17
Fig. 2.18 – Reflexão de fendas transversais e longitudinais.....	17
Fig. 2.19 – Utilização da geogrelha.....	19
Fig. 2.20 – Reforço de misturas betuminosas com malhas de aço	20
Fig. 2.21 – Reforço de misturas betuminosas com malhas de aço	20
Fig. 2.22 – Polimerização	21
Fig. 2.23 – Diferentes tipos de copolímeros.....	21
Fig. 2.24 – Polimerização por adição em que resulta o polietileno.....	22
Fig. 2.25 – Aquecimento de polímeros termoplásticos e termorrígidos.....	23
Fig. 2.26 – Fibras poliméricas utilizadas nos ensaios.....	24
Fig. 2.27 – Fibras poliméricas sem ligante.....	25
Fig. 2.28 – Fibras poliméricas impregnadas com ligante.....	25
Fig. 3.1 – Exemplo de uma de muitas infraestruturas rodoviárias em Portugal	27
Fig. 3.2 – Aplicação de uma mistura betuminosa do tipo SMA	28
Fig. 3.3 – Esqueleto de uma mistura betuminosa SMA.....	30

Fig. 3.4 – Esqueleto de uma mistura betuminosa convencional	30
Fig. 3.5 – Amostra de uma mistura betuminosa SMA.....	31
Fig. 3.6 – Amostra de uma mistura betuminosa convencional.....	31
Fig. 3.7 – Exsudação do ligante betuminoso.....	32
Fig. 3.8 – Compactação de uma mistura SMA numa rotunda	33
Fig. 3.9 – Reta longa	34
Fig. 3.10 – Descida acentuada.....	34
Fig. 3.11 – Elevada frequência de camiões	35
Fig. 3.12 – Tráfego intenso.....	35
Fig. 3.13 – Aplicação de uma mistura betuminosa SMA com fibras na Avenida do Brasil.....	36
Fig. 3.14 – Aplicação de uma mistura betuminosa SMA com fibras na Avenida do Brasil.....	36
Fig. 4.1 – Composição volumétrica de uma amostra de mistura betuminosa compactada.....	37
Fig. 4.2 – Pó 0/4	40
Fig. 4.3 – Agregado 4/12	41
Fig. 4.4 – Agregado 12/16	41
Fig. 4.5 – Filer	41
Fig. 4.6 – Fibras.....	42
Fig. 4.7 – Betume	42
Fig. 4.8 – Estufa.....	44
Fig. 4.9 – Mesa vibratória, sistema de vácuo e picnómetro	45
Fig. 4.10 – Banho-maria	45
Fig. 4.11 – Picnómetro e balança.....	45
Fig. 4.12 – Comparação da Baridade Máxima Teórica pelos diferentes procedimentos, para as misturas sem fibras fazendo variar a percentagem de betume e para as misturas com 6 % de betume quando se aumenta a percentagem de fibras.....	50
Fig. 4.13 – Variação dos volumes (denominadores) nas expressões de cálculo da BMT pelos diferentes procedimentos	51
Fig. 4.14 – Balança e provete.....	52
Fig. 4.15 – Fio suspenso ligado à balança para pesar o provete imerso em água	53
Fig. 4.16 – Compactador de impacto com pedestal de madeira.....	54
Fig. 4.17 – Determinação das dimensões do provete com o auxílio de um paquímetro	55
Fig. 4.18 – Comparação da Baridade pelos diferentes procedimentos, para as misturas sem fibras fazendo variar a percentagem de betume e para as misturas com 6 % de betume quando se aumenta a percentagem de fibras	59

Fig. 4.19 – Variação dos volumes (denominadores) nas expressões de cálculo da baridade pelos diferentes procedimentos	60
Fig. 4.20 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento A e a BMT calculada pelo procedimento A	61
Fig. 4.21 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento B e a BMT calculada pelo procedimento A	61
Fig. 4.22 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento D e a BMT calculada pelo procedimento A	61
Fig. 4.23 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento A e a BMT calculada pelo procedimento B	62
Fig. 4.24 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento B e a BMT calculada pelo procedimento B	62
Fig. 4.25 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento D e a BMT calculada pelo procedimento B	62
Fig. 4.26 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento A e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas secas)	63
Fig. 4.27 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento B e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas secas)	63
Fig. 4.28 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento D e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas secas)	63
Fig. 4.29 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento A e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas saturadas)	64
Fig. 4.30 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento B e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas saturadas)	64
Fig. 4.31 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento D e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas saturadas)	64
Fig. 4.32 – Vazios de agregado na mistura betuminosa com água e solvente, respetivamente	65
Fig. 4.33 – Vazios entre grãos (a) a serem atingidos	66
Fig. 4.34 – Porosidade das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento A e a Baridade pelos procedimentos A, B e D	68
Fig. 4.35 – Porosidade das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento B e a Baridade pelos procedimentos A, B e D	69
Fig. 4.36 – Porosidade das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento C (partículas secas e saturadas) e a Baridade pelo procedimento D	69

Fig. 4.37 – VMA das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento A e a Baridade pelos procedimentos A, B e D.....	70
Fig. 4.38 – VMA das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento B e a Baridade pelos procedimentos A, B e D.....	70
Fig. 4.39 – VMA das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento C (partículas secas e saturadas) e a Baridade pelo procedimento D	70
Fig. 4.40 – VFB das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento A e a Baridade pelos procedimentos A, B e D.....	71
Fig. 4.41 – VFB das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento B e a Baridade pelos procedimentos A, B e D.....	71
Fig. 4.42 – VFB das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento C (partículas secas e saturadas) e a Baridade pelo procedimento D	71
Fig. A.1 – Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas, pelo procedimento A	XIV
Fig. A.2 – Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas, pelo procedimento B	XIV
Fig. A.3 – Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas, pelo procedimento C (partículas secas em estufa)	XV
Fig. A.4 – Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas, pelo procedimento C (partículas saturadas com superfície seca).....	XV
Fig. A.5 – Baridade das misturas betuminosas, pelo procedimento A.....	XXVI
Fig. A.6 – Baridade das misturas betuminosas, pelo procedimento B.....	XXVII
Fig. A.7 – Baridade das misturas betuminosas, pelo procedimento D	XXVII
Fig. A.8 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento A)	XXXVII
Fig. A.9 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento B)	XXXVII
Fig. A.10 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento D)	XXXVII
Fig. A.11 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento A)	XXXVIII

Fig. A.12 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento B) XXXVIII

Fig. A.13 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento D) XXXVIII

Fig. A.14 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas secas) e baridade pelo procedimento D] XXXIX

Fig. A.15 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas saturadas) e baridade pelo procedimento D] XXXIX

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 – Abreviaturas adotadas na Figura 4.1	38
Quadro 4.2 – Variáveis que afetam as propriedades das misturas betuminosas.....	39
Quadro 4.3 – Temperaturas de referência das misturas betuminosas	40
Quadro 4.4 – Fusos granulométricos para as misturas betuminosas tipo SMA 16 bin 35/50	43
Quadro 4.5 – Densidade da água	47

Quadro 4.6 – Temperaturas de Referência	53
Quadro A.1 – Mistura com 4,5% de betume e 0% de fibras	V
Quadro A.2 – Mistura com 5% de betume e 0% de fibras	V
Quadro A.3 – Mistura com 5,5% de betume e 0% de fibras	V
Quadro A.4 – Mistura com 6% de betume e 0% de fibras	VI
Quadro A.5 – Mistura com 6% de betume e 0,2% de fibras	VI
Quadro A.6 – Mistura com 6% de betume e 0,4% de fibras	VI
Quadro A.7 – Mistura com 6,5% de betume e 0% de fibras	VII
Quadro A.8 – Baridade máxima teórica das misturas, pelo procedimento A	XI
Quadro A.9 – Baridade máxima teórica das misturas, pelo procedimento B	XI
Quadro A.10 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 4,5% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C	XII
Quadro A.11 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 5% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C	XII
Quadro A.12 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 5,5% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C	XII
Quadro A.13 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 6% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C	XIII
Quadro A.14 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 6% de betume e 0,2% de fibras, pelo procedimento C	XIII
Quadro A.15 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 6% de betume e 0,4% de fibras, pelo procedimento C	XIII
Quadro A.16 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 6,5% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C	XIV
Quadro A.17 – Dimensões médias dos provetes com 4,5% de betume e 0% de fibras	XIX
Quadro A.18 – Dimensões médias dos provetes com 5% de betume e 0% de fibras	XIX
Quadro A.19 – Dimensões médias dos provetes com 5,5% de betume e 0% de fibras	XIX
Quadro A.20 – Dimensões médias dos provetes com 6% de betume e 0% de fibras	XIX
Quadro A.21 – Dimensões médias dos provetes com 6% de betume e 0,2% de fibras	XIX
Quadro A.22 – Dimensões médias dos provetes com 6% de betume e 0,4% de fibras	XX
Quadro A.23 – Dimensões médias dos provetes com 6,5% de betume e 0% de fibras	XX
Quadro A.24 – Baridade das misturas com 4,5% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D	XXIII
Quadro A.25 – Baridade das misturas com 5% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D	XXIII

Quadro A.26 – Baridade das misturas com 5,5% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D	XXIV
Quadro A.27 – Baridade das misturas com 6% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D	XXIV
Quadro A.28 – Baridade das misturas com 6% de betume e 0,2% de fibras, pelos procedimentos A, B e D	XXV
Quadro A.29 – Baridade das misturas com 6% de betume e 0,4% de fibras, pelos procedimentos A, B e D	XXV
Quadro A.30 – Baridade das misturas com 6,5% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D	XXVI
Quadro A.31 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento A).....	XXXI
Quadro A.32 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento B).....	XXXI
Quadro A.33 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento D)	XXXII
Quadro A.34 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento A).....	XXXII
Quadro A.35 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento B).....	XXXIII
Quadro A.36 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento D)	XXXIII
Quadro A.37 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas secas) e baridade pelo procedimento A]	XXXIV
Quadro A.38 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas secas) e baridade pelo procedimento B]	XXXIV
Quadro A.39 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas secas) e baridade pelo procedimento D].....	XXXV
Quadro A.40 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas saturadas) e baridade pelo procedimento A]	XXXV

Quadro A.41 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas saturadas) e baridade pelo procedimento B] XXXVI

Quadro A.42 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas saturadas) e baridade pelo procedimento D] XXXVI

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SMA – Stone Mastic Asphalt

EN – Norma Europeia

CEN – Comité Europeu de Normalização

UE – União Europeia

MBQ – Misturas Betuminosas a Quente

BMT – Baridade Máxima Teórica

V_m – Porosidade

VMA – Vazios da Mistura de Agregados

VFB – Vazios Preenchidos com Betume

tf – Toneladas Força

cm – Centímetros

mm – Milímetros

dB – Decibéis

°C – Graus Centígrados

kpa – Quilopascal

AC – Asphalt Concret

BBr – Betume Betuminoso Rugoso

EUA – Estados Unidos da América

1

INTRODUÇÃO

Em Portugal, registou-se ao longo dos últimos vinte anos um forte investimento na construção rodoviária. Estando concluída grande parte da rede rodoviária nacional planeada, tem-se vindo a observar um natural abrandamento na construção de novas estradas e um aumento das despesas de conservação e reabilitação das estradas em serviço. Logo, tendo em conta que os recursos financeiros para a construção e manutenção de pavimentos são cada vez mais limitados, é cada vez mais desejável que as obras de construção nova ou de reabilitação sejam pautadas pela economia de recursos. Dessa forma verifica-se a necessidade do estudo de novas técnicas para construção e reabilitação de pavimentos que contemplem revestimentos mais duráveis que necessitem de reduzida manutenção ao longo da sua vida útil e assegurem segurança e conforto aos seus utilizadores.

É nesse cenário que o SMA aparece como uma alternativa atraente proporcionando ao pavimento maior durabilidade de acordo com as pesquisas realizadas em Portugal e no estrangeiro. É uma mistura betuminosa bastante resistente às deformações permanentes e ao fendilhamento por fadiga e no contacto pneu/pavimento apresenta uma boa aderência e maior resistência ao rolamento. Além disso, diminui a ocorrência do *spray* provocado pela lâmina de água que permanece na superfície das camadas de misturas betuminosas convencionais em dias de chuva, contribuindo para um aumento considerável da segurança dos condutores.

Tratando-se de misturas ainda pouco conhecidas e aplicadas em Portugal, é também desejável a investigação do seu desempenho, recorrendo à instrumentação e observação do seu comportamento em laboratório. Ora, o objetivo primordial deste trabalho passa por estudar as propriedades volumétricas e seus processos de cálculo tendo sido utilizadas misturas betuminosas tipo SMA. Para a realização dos ensaios foram preparados sete tipos diferentes de misturas betuminosas. Nas misturas betuminosas fez-se variar as percentagens de betume e as percentagens de fibra. Foram preparadas sete misturas betuminosas:

- 0 % de fibras e 4,5 %, 5 %, 5,5 %, 6 % e 6,5 % de betume;
- 0,2 % de fibras e 6 % betume;
- 0,4 % de fibras e 6 % de betume.

A adição de fibras à mistura tem como objetivo a fixação do betume evitando o seu escorrimento durante o processo de fabrico, transporte e colocação bem como a sua exsudação após a execução da camada.

Em todo este trabalho foram consideradas como normas de referência as normas europeias em vigor publicadas pelo CEN.

De forma resumida o atual trabalho desenvolve-se em três capítulos fundamentais:

- Um primeiro capítulo que descreve os vários tipos de pavimentos, as várias exigências dos pavimentos que, devido aos diferentes tipos de solicitações a que estão sujeitos, pode provocar a degradação dos mesmos e os vários elementos de reforço, tanto a nível estrutural no próprio pavimento assim como na mistura betuminosa com a adição de fibras poliméricas.
- Um segundo capítulo, no qual é desenvolvido o conceito da mistura betuminosa SMA, que procura explicar o princípio de funcionamento deste tipo de mistura assim como as suas características de desempenho, que fazem dela uma das técnicas mais promissoras em função do desempenho, durabilidade, segurança e baixo custo de manutenção.
- No terceiro capítulo, pretende-se explanar os conceitos de baridade, baridade máxima teórica e porosidade, VMA e VFB. São estas as propriedades volumétricas a estudar nas misturas betuminosas SMA preparadas em laboratório. É feita a análise destas propriedades aos sete diferentes tipos de misturas. Este capítulo evolui como uma proposta dos diferentes processos de cálculo e respetivos resultados.

2

OS PAVIMENTOS

2.1. GENERALIDADES

A grande extensão e a deficiente qualidade da rede rodoviária nacional constituíram, durante muitos anos, um fator desfavorável ao desenvolvimento sócio-económico de Portugal, não restando dúvidas de que a implementação do Plano Rodoviário Nacional de 1985 contribuiu em grande medida para o desenvolvimento observado em Portugal desde a adesão à União Europeia.

As estradas desempenham assim um papel fundamental no desenvolvimento de qualquer país na medida em que é a rede rodoviária que assegura, em grande parte, o transporte de pessoas e mercadorias de e para qualquer parte do território. Por essa razão, as estradas, desde as grandes vias estruturantes, da rede rodoviária nacional, até às estradas de nível municipal, devem encontrar-se em bom estado de conservação.



Fig. 2.1 – Troço do IP3 (Diário de Notícias, 2009)

Com o preço do petróleo cada vez mais elevado e a necessidade de pavimentos mais duradouros e resistentes, diferentes dos pavimentos tradicionais, capazes de assegurar os acréscimos de tráfego e de carga dos veículos, torna-se necessário utilizar métodos de dimensionamento baseados em análises estruturais capazes de fornecer resultados mais adequados ao dimensionamento racional de novos materiais e técnicas de pavimentação, conseguindo-se obter projetos económicos e tecnicamente adequados às novas exigências.

Os utilizadores das infraestruturas rodoviárias têm sobretudo como preocupação a funcionalidade e o nível de serviço, que está relacionada com o desempenho do pavimento aquando da sua utilização. A qualidade de utilização dos pavimentos é medida pelo conforto do pavimento (a existência ou não de irregularidades), economia e segurança (usualmente relacionada com a rugosidade da superfície).

Estes fatores determinam os custos inerentes à utilização por parte do utilizador. Quanto mais irregular estiver o pavimento e menos rugoso se apresentar, maiores serão os custos de utilização deste tipo de infraestruturas que aumentam naturalmente devido a acidentes e aos próprios custos relacionados com a utilização dos veículos.



Fig. 2.2 – Exemplo de um pavimento irregular (Inovação Tecnológica, 2010)

2.2. TIPOS DE PAVIMENTOS

É designada por pavimento a estrutura laminar, estratificada e em apoio contínuo sobre a fundação construída para suportar as cargas provenientes do tráfego e proporcionar as condições satisfatórias de conforto, economia e segurança a quem a utiliza.

Como requisitos principais, os pavimentos devem proporcionar condições de condução segura e confortável aos condutores (requisitos funcionais) e degradar os esforços verticais e horizontais devidos ao tráfego para valores compatíveis com a fundação (requisitos estruturais), ao longo do período de vida útil.

Em relação aos tipos de pavimentos existentes classificam-se os pavimentos em flexíveis, rígidos e semirrígidos. Os pavimentos são classificados de acordo com os seus materiais constituintes, os quais estão diretamente relacionados com o seu comportamento estrutural.

O tipo de pavimento a adotar depende entre outras coisas dos seguintes pontos:

- da categoria da estrada;
- das condições climáticas prevalecentes no local;
- do tráfego previsto;
- das condições do terreno de fundação.

No que diz respeito aos materiais constituintes da fundação do pavimento, o leito do pavimento é, em geral, constituído por solos ou materiais granulares.

Em relação às sub-bases, utilizam-se materiais mais nobres, de melhor qualidade, recorrendo-se para tal a solos selecionados, agregados britados de granulometria extensa ou a solos ou agregados com adição de ligantes hidráulicos. A camada de base é constituída por agregados britados de granulometria extensa, sendo que é possível recorrer ao seu tratamento através de ligantes hidráulicos ou betuminosos.



Fig. 2.3 – Estrutura de um pavimento (Engenhariacivil, 2010)

2.2.1. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O recurso a betume como ligante no revestimento de pavimentos começou por ser utilizado nos Estados Unidos. Esta utilização ocorreu no ano de 1896, quando foi verificada a deterioração precoce de um pavimento rígido e foi decidido cobrir este pavimento com uma camada de revestimento betuminoso.



Fig. 2.4 – Estrutura de um pavimento flexível (Pavimentos Rodoviários, 2009)

A constituição da estrutura de um pavimento flexível baseia-se em duas componentes: camadas estabilizadas com ligantes, na parte superior, e camadas granulares estabilizadas mecanicamente, em regra, na parte inferior. A existência de duas famílias de materiais distintas deve-se ao facto de apresentarem um comportamento mecânico diferente. A parte superior das camadas tem como função resistir aos esforços de tração, enquanto que a parte inferior das camadas tem a função de resistir a esforços de compressão.

As camadas são colocadas por ordem decrescente de capacidade estrutural. A camada superficial deverá ter a capacidade de proporcionar uma superfície de rodagem desempenada e com aderência

suficiente, logo deve ser composta por materiais de melhor qualidade e mais caros, ao passo que nas camadas inferiores sucede o contrário. Assim, geralmente, os pavimentos são constituídos por:

- Camada de desgaste

Esta é a camada superior do pavimento e que contacta diretamente com o tráfego. Deve apresentar uma superfície lisa, regular, não derrapante, resistente ao desgaste contínuo do tráfego, garantir um valor de ruído diminuto e assegurar uma rápida eliminação da água do pavimento em tempo de chuva, conferindo as condições de segurança, conforto e economia para os utilizadores.

A camada de desgaste, a nível estrutural, deve contribuir para a capacidade global do pavimento, distribuindo as tensões induzidas pelas cargas rolantes e deve ser impermeável de modo a que as camadas subjacentes fiquem protegidas de eventuais infiltrações.



Fig. 2.5 – Aplicação da camada de desgaste de 4cm (Voegelé, 2008)

- Camada de regularização

Nos pavimentos mais pesados, a camada de regularização encontra-se imediatamente sob a camada de desgaste. Trata-se de uma camada cujo objetivo é obter uma superfície desempenada, para que a camada de desgaste seja posteriormente colocada sem problemas. Tem ainda como função receber as cargas derivadas do tráfego, uniformizar as tensões e posteriormente transmiti-las para a camada de base. Esta camada encontra-se atualmente em desuso com a utilização nas camadas de base de misturas betuminosas com granulometria mais fina.

- Camada de base

É a camada estrutural mais importante. Tem como função receber as cargas transmitidas pela camada de regularização, uniformizar as tensões e posteriormente transmiti-las para a camada de sub-base ou

para o solo de fundação (ou leito do pavimento). Desta camada é esperado que suporte e degrade as cargas aplicadas de forma que a capacidade de suporte das camadas subjacentes não seja excedida. Os materiais utilizados na execução desta camada tanto podem ser misturas betuminosas como materiais granulares ligados com ligantes betuminosos ou estabilizadores. É importante que estes sejam de boa qualidade, devido a tratar-se de uma camada com espessuras elevadas.

- Camada de sub-base

A camada de sub-base, utilizada para reduzir a espessura da camada de base, tem como funções receber os esforços provenientes da camada de base e redistribuir os esforços para o leito do pavimento, drenar as infiltrações que poderão ocorrer nas camadas superiores, possibilitar a compactação da base em boas condições, garantir a traficabilidade do equipamento de obra e impedir a ascensão da água capilar evitando que esta atinja as camadas nobres do pavimento. A sua correta execução depende de uma boa compactação o que só é possível com teores de humidade corretos.

O pavimento é executado sobre a última camada da terraplenagem designada por “Leito do Pavimento”.

- Leito do pavimento

Esta camada evita a deformação do solo e serve de base construtiva, possibilitando a compactação da base e da sub-base. Tem ainda como objetivo, eliminar ou diminuir os problemas subsequentes da heterogeneidade dos materiais de fundação. É constituída por materiais granulares tratados e não tratados, por solos com ou sem ligantes hidráulicos (cal e/ou cimento). Por vezes opta-se pela utilização conjunta de geotêxteis. Estes ajudam a evitar a contaminação de outras camadas pelos finos e têm ainda função drenante.

Entre as vantagens da utilização deste tipo de pavimento, destaca-se a facilidade e rapidez de reparação e a adaptação a eventuais deformações das camadas inferiores.

As camadas betuminosas ficam ligadas entre si através de regas de colagem e a interligação das camadas betuminosas com as camadas granulares realiza-se através de regas de impregnação geralmente com emulsões betuminosas.

Para o seu dimensionamento torna-se necessário conhecer o volume de tráfego (a sua velocidade e o seu peso) presente e futuro, pois as características do tráfego influenciam a degradação do pavimento. As condições climáticas e de fundação são também dados essenciais ao dimensionamento dos pavimentos flexíveis.

2.2.2. PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS

Os pavimentos semirrígidos caracterizam-se por serem constituídos por camada de desgaste em mistura betuminosa, bases tratadas com cimento de significativa rigidez em que, devido ao aumento desta e consequente módulo de elasticidade, resistem aos esforços de tração, e sub-bases de materiais granulares. Apresentam na constituição da camada base betão pobre ou agregado de granulometria extensa com cimento.

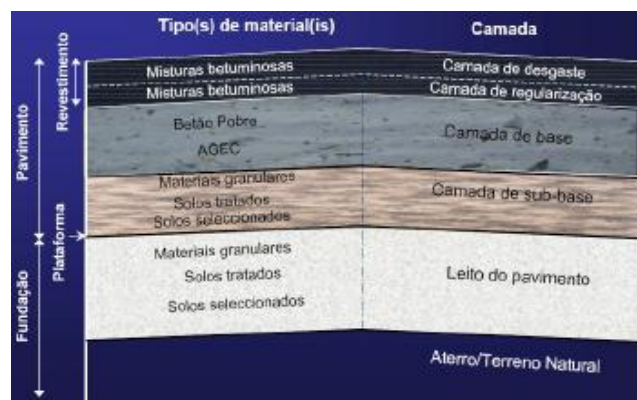


Fig. 2.6 – Estrutura de um pavimento semirrígido (Pavimentos Rodoviários, 2009)

2.2.3. PAVIMENTOS RÍGIDOS

Os pavimentos rígidos caracterizam-se pela camada de desgaste ser constituída por uma laje de betão de elevada rigidez. Os principais dinamizadores dos pavimentos rígidos foram os ingleses com a primeira construção em 1865, seguindo-se os Estados Unidos da América em 1891. Antes da segunda guerra mundial a preferência para os pavimentos das auto-estradas dos Americanos e Alemães resumia-se sobretudo aos pavimentos rígidos.

A sua utilização torna-se vantajosa essencialmente em zonas de velocidade baixa e temperaturas elevadas, maus solos de fundação, em zonas de derrame de óleos e gasóleos, de esforços tangenciais elevados. Têm um custo inicial superior aos pavimentos flexíveis mas durante a sua vida útil os encargos para manutenção são inferiores e as preocupações com os requisitos da fundação não são relevantes.

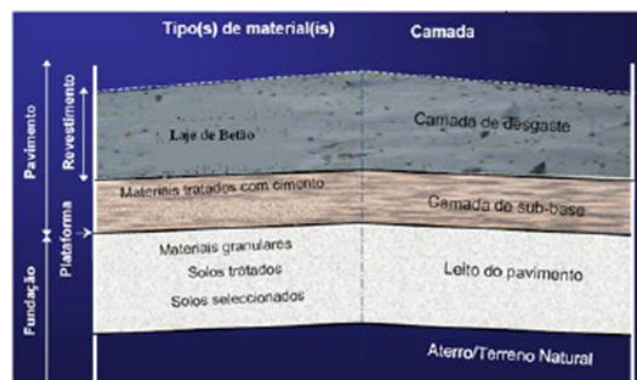


Fig. 2.7 – Estrutura de um pavimento rígido (Pavimentos Rodoviários, 2009)

Nos pavimentos rígidos a rigidez estrutural é conferida pela laje. Esta situação verifica-se porque o módulo de elasticidade do betão é consideravelmente superior ao dos materiais das restantes camadas. Sendo assim, a importância que as camadas de base e sub-base tomam nestes pavimentos é inferior exigindo-se, no entanto, uma boa uniformidade para que não ocorram assentamentos diferenciais que poderão conduzir à rotura da laje. Estas camadas devem ser bem compactadas para, durante a construção, permitir a execução da laje com facilidade.

2.3. EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO

As exigências de desempenho dos pavimentos podem ser classificadas em funcionais ou estruturais.



Fig. 2.8 – Avaliação do desempenho de um pavimento (Engenhariacivil, 2010)

2.3.1. EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO FUNCIONAIS

Ao nível do desempenho funcional, têm que ser verificadas as seguintes exigências:

- Aderência;
- Capacidade de drenagem superficial;
- Resistência à ação da água;
- Determinadas condições de permeabilidade;
- Resistência à deformação permanente;
- Redução do ruído de rolamento.

2.3.2. EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO ESTRUTURAIS

Ao nível do desempenho estrutural, têm que ser verificadas as seguintes exigências:

- Resistência à deformação permanente;
- Resistência à fadiga;
- Resistência à reflexão das fendas;
- Resistência ao fendilhamento superficial;
- Resistência ao fendilhamento induzido por ações térmicas;
- Resistência ao envelhecimento.

2.4. SOLICITAÇÕES DE PAVIMENTOS

Os pavimentos na sua generalidade estão sujeitos a ações diretas e indiretas. Entende-se por ações diretas os esforços absorvidos diretamente pelo pavimento, resultantes de forças ou pressões aplicadas à estrutura. As ações indiretas estão relacionadas com as deformações impostas ao pavimento, sendo que estas ações podem ser devidas à retração, dilatação térmica e empenamento.

Nas ações diretas estão presentes os esforços inerentes ao tráfego de veículos.

2.4.1. AÇÕES DIRETAS

As ações resultantes do tráfego de veículos são ações cinemáticas/dinâmicas e podem ser ações verticais ou transversais (travagem, rolamento).

Quando estamos na presença de ações móveis, é importante não só o valor da força devida a essa ação como também o número de repetições, a velocidade de circulação do tráfego e a sua posição no pavimento. As solicitações devidas ao tráfego que atuam em pavimentos são ações de curta duração. O facto de estas atuarem de forma repetida pode originar o fenómeno de fadiga, podendo causar a deterioração do pavimento. Em alguns materiais não ocorre a fadiga apesar de haver repetição das solicitações (elásticos).

As deformações permanentes evoluem no tempo com a passagem do tráfego e contribuem para o aumento da profundidade das rodeiras. Entende-se por rodeiras a deformação localizada ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos pesados.



Fig. 2.9 – Pavimento flexível com deformação ocorrida na superfície (Pavimentos Rodoviários, 2009)



Fig. 2.10 – Rodeiras por deformação permanente das misturas betuminosas (Pavimentos Rodoviários, 2009)

2.4.2. AÇÕES INDIRETAS

2.4.2.1. Retração

A retração é um fenómeno associado a estruturas de betão em que a estrutura, devido à perda de água por secagem do betão, diminui de volume. A retração é quantificada como uma extensão e usualmente assimilável a uma variação de temperatura. Nos pavimentos rígidos poderá ocorrer a retração por secagem do betão, pois neste tipo de estrutura a grande maioria da superfície está exposta ao ar. Um dos fatores que tem influência na retração é o clima: a retração aumenta com a redução da humidade do ar, com o aumento da temperatura e com maior incidência de ventos.

A retração nas estruturas de betão origina o aparecimento de fendas. O aparecimento de fendas está também dependente da classe de resistência do betão, da sua deformabilidade e restrição à fissuração. É possível minimizar os efeitos inerentes a este movimento se as placas de betão forem limitadas na sua extensão, pois dessa maneira permite um movimento menor. Apesar de se poder utilizar a rega, outra maneira consiste em evitar que a cura se dê nas horas de maior calor, pois assim a perda de água é menor e dá-se mais lentamente.

Devido à superfície inferior da laje de betão estar em contacto com a camada de base, a retração do betão não é livre, originando esforços devido às forças de atrito geradas, causando tração na laje de betão.

2.4.2.2. Dilatação térmica

Entende-se por dilatação térmica o fenómeno de variações de volume associado a variações de temperatura. No caso de um aumento da temperatura, a placa de betão tende a aumentar de volume, aumentar a sua extensão e, por conseguinte, irão surgir esforços de compressão devido ao atrito na parte inferior da laje e o contacto com as outras placas no caso de existirem. Se a variação de temperatura for negativa, o fenómeno que ocorre na placa de betão é o mesmo que na retração: a placa diminui de volume e surgem esforços de tração resultantes da força de atrito existente.

2.4.2.3. Empenamento

O empenamento surge devido às diferenças de temperatura nas duas faces da placa de betão.

Estas diferenças surgem pois durante o dia o sol aquece a face superior a uma velocidade superior à da face inferior. Desta forma, a face superior dilata mais que a face inferior. Numa situação contrária, aquando do período noturno, a face superior da placa diminui a temperatura a uma velocidade superior à face inferior, pelo que desse modo a face superior sofre contração.

Durante o dia, as deformações associadas ao empenamento provocam tensões de tração na fibra superior e de compressão na inferior. No período noturno, devido ao abaixamento da temperatura ambiente, ocorre o fenómeno contrário, ou seja, dá-se compressão na face superior e tração na face inferior.



Fig. 2.11 – Empenamento no período diurno (Pavimentos rodoviários, 2009)



Fig. 2.12 – Empenamento no período noturno (Pavimentos rodoviários, 2009)

2.5. DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A deterioração dos pavimentos flexíveis está associada à degradação da qualidade dos materiais constituintes das camadas que fazem parte da constituição de um pavimento. A degradação pode ser provocada pela atuação das ações já referidas, de um inadequado projeto e/ou deficiências e problemas no processo construtivo. A evolução das degradações dos pavimentos e consequente modificação do seu comportamento é um processo algo complexo, pois cada ação provoca alterações específicas em cada material constituinte de um pavimento.

A atuação das ações resulta na alteração das propriedades dos materiais constituintes de um pavimento fazendo que uma mesma ação repetida duas vezes provoque deslocamentos e degradações diferentes no pavimento.



Fig. 2.13 – Pavimento em ruína (Engenhariacivil, 2010)

Com a evolução da degradação de um pavimento e ao atingir um estado de deterioração em que as condições de utilização já não são aceitáveis, torna-se necessário intervir, dependendo do estado em que se encontre e do nível de qualidade que se pretende atingir. De modo a ser efetuada a escolha do tipo de intervenção a realizar e para estabelecer um planeamento adequado para a manutenção, torna-se necessário ter conhecimento do estado atualizado da degradação do pavimento.

As deformações permanentes nas misturas betuminosas estão associadas à redução de vazios devido à compactação induzida pelo tráfego; daí a importância de deixar vazios na mistura betuminosa. São ainda causa de degradação os fenómenos de corte ou rotura plástica das misturas e a fluência das camadas. As degradações mais evidentes ao nível das deformações permanentes são os cavados de rodagem, que consistem na deformação na zona de passagem dos rodados dos pesados.

Outra causa de deformação dos pavimentos flexíveis é a exsudação de betume, que consiste na subida até à superfície de betume e finos, que pode surgir nas camadas betuminosas. Pode ficar a dever-se à má qualidade dos materiais, deficiente composição da mistura betuminosa e materiais de fundação impermeáveis e sem drenagem eficaz.

A desagregação da camada de desgaste é uma degradação que ocorre à superfície na mistura betuminosa e está associada à má qualidade dos materiais, deficiente composição da mistura e má construção.

Uma das principais causas do envelhecimento dos pavimentos é o envelhecimento do betume. Este envelhecimento provoca no betume um aumento da sua viscosidade para uma dada temperatura, que se traduz no aumento do módulo de rigidez e na consequente fragilização e perda de elasticidade da mistura betuminosa. Ocorre o endurecimento físico da mistura betuminosa assim como perda de voláteis e oxidação. Devido a esta situação, ao longo do seu período de vida um pavimento torna-se mais rígido e por conseguinte mais suscetível à ocorrência de fendilhamento, principalmente o de origem térmica.



Fig. 2.14 – Abatimento da camada inferior (Semae, 2011)

Outras degradações possíveis de ocorrerem são abatimentos devido a deslocamentos nas camadas inferiores, ou irregularidades devido à variação de volume nas camadas inferiores e a ondulação na superfície dos pavimentos resultante da baixa estabilidade da mistura betuminosa. A falta de estabilidade origina rodeiras (deformações) já referidas.

Algumas fendas resultam do deficiente processo de construção devido a problemas de espalhamento e compactação das misturas betuminosas. O fendilhamento, quando relacionado com o processo construtivo, deve-se à elevada diferença de rigidez entre os rolos dos cilindros de compactação e a mistura betuminosa.



Fig. 2.15 – Compactação desadequada de uma mistura betuminosa (El Vie, 2008)

2.5.1. FENDILHAMENTO

O fendilhamento apresenta-se como sendo uma das principais causas de degradação dos pavimentos. O fendilhamento pode ser por fadiga devido ao tráfego, por retração térmica, com origem na superfície e defeitos de construção e por reflexão de fendas em pavimentos reforçados ou em pavimentos semi-rígidos ou até evolução do fendilhamento já existente.

Em relação à caracterização das fendas, esta pode ser feita através da sua forma, orientação e a sua abertura. As formas apresentadas pelas fendas podem ser variadas e dependem da estrutura do pavimento, da sua origem e da degradação.



Fig. 2.16 – Aparecimento de fendas devido à baixa capacidade de carga de um pavimento flexível (Engenhariacivil, 2010)

Quanto à orientação, as fendas podem ser longitudinais (paralelas à direção de circulação do tráfego) ou transversais (perpendiculares à direção de circulação do tráfego). Quanto à forma, podem ser retilíneas, curvilíneas ou mistas. As fendas podem ser isoladas, ramificadas, entrelaçadas ou formar um padrão do tipo “pele de crocodilo”.

As fendas isoladas não exibem qualquer ligação com outras fendas adjacentes. As fendas ramificadas encontram-se ligadas às fendas adjacentes formando uma malha regular ou irregular de polígonos ou blocos, originando o fendilhamento do tipo “pele de crocodilo”.

Como consequências, a rutura prematura do pavimento leva a uma diminuição da capacidade de carga, o que acarreta também um aumento de custos para os utilizadores desse pavimento.

Nos países suscetíveis da ocorrência de Invernos rigorosos, é necessário ter um cuidado especial com o aparecimento de fendas térmicas. Estas proporcionam a entrada de água no interior dos pavimentos por infiltração que, com as temperaturas baixas, pode congelar, aumentando de volume. Tal tem como consequência o aumento das dimensões das fendas, acelerando o processo de degradação.

2.5.1.1. Fendilhamento por fadiga

A ação repetida da passagem do tráfego nos pavimentos origina uma degradação de caráter progressivo que consiste no fendilhamento por fadiga. O pavimento é dimensionado para um determinado número de passagens do tráfego. Quando o número de passagens é superior, o material começa a fissurar, conduzindo à rotura do pavimento por fadiga. O aparecimento de fendas por fadiga começa nas camadas inferiores e pode atingir a camada de desgaste.

2.5.1.2. Fendilhamento induzido termicamente

Nos pavimentos flexíveis quando sujeitos a climas frios, ou quando situados em zonas com grandes amplitudes térmicas, verifica-se a ocorrência de fendilhamento com origem na superfície do pavimento e progredindo para a base das camadas. Este fenómeno dá-se devido à fragilidade do material a baixas temperaturas.

O fendilhamento térmico ocorre quando é excedida a capacidade do pavimento para dissipar tensões provocadas pela contração térmica. O fendilhamento por indução térmica pode ser de dois tipos:

- fendilhamento por fadiga térmica;
- fendilhamento devido apenas a um ciclo de arrefecimento a baixa temperatura.

O fendilhamento por fadiga térmica resulta do efeito dos ciclos térmicos em zonas de grandes gradientes. As tensões provenientes dos ciclos térmicos normalmente não induzem o fendilhamento do pavimento, mas é a sua evolução ao longo dos ciclos que origina o fendilhamento devido aos pequenos danos resultantes da ocorrência de tensões térmicas diárias acumuladas.

O fendilhamento devido apenas a um ciclo de arrefecimento a baixa temperatura é um tipo de fendilhamento que ocorre em condições de temperaturas extremamente baixas. Nesta situação, as tensões de tração de origem térmica tornam-se muito elevadas, maiores que as tensões de tração admissíveis pelo pavimento, desenvolvendo-se fendas pequenas. Com o passar do tempo, a dimensão destas fendas aumenta e as fendas propagam-se. Este mecanismo é caracterizado pela existência de um lençol de água que devido às baixas temperaturas solidifica, formando gelo..

2.5.1.3. Fendilhamento com origem na superfície

As causas que levam à origem deste tipo de fendilhamento são o envelhecimento da mistura betuminosa, o tráfego, as condições climatéricas, a qualidade de construção e o projeto.

Como principal causa deste tipo de fendilhamento tem sido apontada o desenvolvimento de grandes tensões de tração geradas na superfície do pavimento, junto aos bordos dos pneus.

As fendas originadas por este fenómeno podem desaparecer com a união dos seus bordos a temperaturas altas, ou então, com a persistência da ocorrência de temperaturas cada vez mais baixas, as fendas progridem em profundidade, aumentando as suas dimensões.



Fig. 2.17 – Selagem de fendas na superfície de um pavimento (Engenhariacivil, 2010)

2.5.1.4. Reflexão de fendas em reforços de pavimentos

Um tipo de fendilhamento, também corrente, é o fendilhamento em reforço de pavimentos. Este fendilhamento ocorre devido à propagação das fendas existente nas camadas antigas para as camadas novas de reforço. Estas fendas progridem do interior do pavimento para a nova camada de desgaste.

Este tipo de fendilhamento é a principal causa de redução do tempo de vida útil dos pavimentos reforçados. Esta situação acontece porque as intervenções de reabilitação de pavimentos muitas vezes passam por colocar simplesmente novas camadas à superfície. No entanto, as fendas que existem nas camadas antigas progridem para as novas camadas.

A reflexão de fendas pode ser um grande problema por encurtar o tempo de vida útil da nova camada.



Fig. 2.18 – Reflexão de fendas transversais e longitudinais (Pavimentos Rodoviários, 2009)

2.6. REFORÇO DE PAVIMENTOS

A degradação prematura de pavimentos flexíveis está usualmente associada ao aumento de tráfego, aumento das cargas dos veículos, etc. Os recursos financeiros para os trabalhos de manutenção são normalmente limitados e insuficientes para manter as estradas no nível de qualidade mínimo. Desta maneira, o recurso ao reforço para aplicação em novos pavimentos ou reabilitação de pavimentos existentes deve ser concebido com o intuito de aumentar o tempo de vida útil dos pavimentos com economia.

2.6.1. ELEMENTOS DE REFORÇO ESTRUTURAL

2.6.1.1. Geossintético

Os geossintéticos abrangem uma variedade de materiais poliméricos especialmente fabricados para serem utilizados em aplicações geotécnicas, ambientais e de infraestruturas de drenagem e de transportes. É conveniente identificar a função primária do geossintético, onde se destacam as seguintes: separação, filtragem, drenagem, reforço, contenção de fluidos/gases, ou controle de processos erosivos. Em alguns casos, o geossintético poderá desempenhar múltiplas funções.

Dentro da utilização de geossintéticos no reforço de pavimentos destacam-se as seguintes vantagens:

- Reduzir ou evitar a reflexão de fendas;
- Trabalhar como barreira, evitando a bombagem de finos;
- Reduzir a espessura da camada betuminosa;
- Reduzir a espessura do pavimento.

Outro dos benefícios inerentes à utilização do geossintético é o aumento do tempo de vida útil do pavimento considerando as profundidades das rodeiras. O número de repetições de carga dum pavimento com geossintético para a mesma profundidade de rodeira é sensivelmente o triplo da situação sem geossintético.

2.6.1.2. Geocélula

A geocélula foi concebida com o objetivo de reforçar a areia como material de construção de pavimentos. As suas primeiras utilizações aconteceram em estradas de acesso a praias e no deserto. Pode ser utilizada como suporte de cargas na estabilização de pavimentos rodoviários e ferroviários.

A geocélula é constituída por tiras de polietileno de alta densidade (PEAD), soldadas entre si, que quando abertas formam células contíguas tridimensionais. Podem ser preenchidas com areia, brita, betão ou solo conforme a sua finalidade.

O princípio de funcionamento da geocélula baseia-se na resistência criada pelo confinamento lateral que gera e pelo atrito das paredes das células com o material de enchimento.

Algumas das vantagens da utilização da geocélula são:

- Redução de 50% ou mais da espessura da camada de suporte estrutural, em estabilização de solos;
- Utilização, como enchimento, de agregados (areia e brita) de baixa qualidade na construção de estradas, mesmo sobre solos muito moles;
- Redução das rodeiras;

- Utilização de técnicas de construção simples, facilitando a sua instalação em lugares distantes ou de difícil acesso;
- Aumenta a capacidade de carga do pavimento.

Refira-se que este elemento de reforço estrutural aumenta a capacidade de carga ao nível da fundação.

2.6.1.3. Geogrelhas

Usualmente as geogrelhas são utilizadas para reforçar pavimentos novos mas podem também ser utilizadas na reabilitação de pavimentos degradados. A geogrelha quando inserida num pavimento aumenta a sua resistência à tração complementando as propriedades da mistura betuminosa.

Das principais características da geogrelha de estrutura aberta, destaca-se o seu elevado módulo de elasticidade, quando comparado com o geotêxtil impregnado com betume e com o próprio betão betuminoso. A consequência da introdução da geogrelha é a diminuição das deformações porque as tensões induzidas pelo tráfego serão absorvidas pela geogrelha.



Fig. 2.19 – Utilização da geogrelha (Revista Técnica, 2003)

Alguns dos benefícios proporcionados aquando da utilização deste tipo de reforço são:

- Em pavimentos novos permite reduzir a espessura das camadas e aumenta o tempo de vida útil;
- Aumenta a rigidez do pavimento e pode homogeneizar a estrutura quando o comportamento não é homogêneo;
- Quando um pavimento apresenta fendas de grande abertura e extensão, a introdução da geogrelha modifica o padrão das fendas, passando estas a ser micro fendas;
- Nos pavimentos rígidos, a geogrelha pode ter um efeito similar ao aço, ou seja, manter as fendas fechadas.

A utilização deste tipo de reforço é mais corrente na Europa Ocidental e Estados Unidos.

2.6.1.4. Geotêxtil

A utilização do geotêxtil está normalmente associada à sua utilização na área da geotecnia. No entanto, vem sendo largamente utilizada um pouco em outras áreas para evitar a propagação de fissuras. Começou inicialmente por ser utilizada por volta dos anos 70 nos Estados Unidos, mas rapidamente a sua utilização chegou à Europa.

O geotêxtil pode ser utilizado como reforço ou elemento de reabilitação de pavimentos. Como medida de reabilitação, normalmente é colocada uma nova camada de desgaste em associação com o geotêxtil na base da camada. Esta solução leva ao redirecionamento da fenda quando existe a repetição das cargas, atenuando a concentração de tensões. O elemento de reforço é colocado antes da camada de desgaste de modo a atenuar a concentração de tensões evitando assim o aparecimento de fendas.

2.6.1.5. Malhas de aço

A utilização da malha de aço como reforço de pavimentos flexíveis tem como objetivo dotar as estradas de pavimentos mais ligeiros e consequentemente mais económicos, aumentando o seu tempo de vida útil e de maneira a que haja um gasto de recursos naturais menor pois a estrutura dos pavimentos será menos espessa.

Trabalhos de investigação levados a cabo na Finlândia e na Suécia têm demonstrado que o reforço de pavimentos flexíveis com malhas de aço é uma técnica construtiva económica para prevenir o aparecimento de fendas longitudinais no pavimento causado pelas temperaturas muito baixas. O trabalho levado a cabo, apoiado em estudos experimentais realizados em estradas e laboratório, mostrou também que a aplicação de malhas de aço nos pavimentos flexíveis durante a sua construção e reabilitação conferia às estradas as seguintes propriedades:

- Aumento da capacidade de carga;
- Aumento da resistência à formação de rodeiras;
- Aumento da resistência ao aparecimento de fendas;
- Aumento da resistência aos assentamentos laterais;
- Diminuição do risco de aparecimento de fendas nas camadas de reforço por reflexão dos pavimentos existentes;
- Aumento da resistência à fendilhação devido ao gelo.



Fig. 2.20 e 2.21 – Reforço de misturas betuminosas com malhas de aço (Engenhariacivil, 2010)

Desde meados dos anos 80 que a Suécia tem adotado nas suas estradas as malhas de aço. Na grande maioria dos casos os danos observados nas estradas eram fendas devidas às infiltrações de água nas micro fendas dos pavimentos, que com as baixas temperaturas solidificava aumentando de volume e por conseguinte a dimensão das fendas.

O problema da utilização das malhas de aço passa pelas juntas. Tem sido observado ao longo dos anos nas experiências realizadas em estradas existentes e em laboratório, que o sítio mais sensível destes pavimentos é precisamente nas juntas. Nestas zonas dá-se o aparecimento de fendas, quer sejam longitudinais ou transversais. Note-se que os estudos levados a cabo em estradas não compreendem o dimensionamento da malha para evitar as fendas transversais mas sim as fendas longitudinais.

2.6.2. REFORÇO COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRAS POLIMÉRICAS NA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

A palavra polímero tem origem no vocábulo grego *polumeres*, composto por *polu* que pode ser traduzido como ‘muitas’ e *meres* que significa ‘partes’. Polímeros são, portanto, substâncias químicas formadas por muitas partes. A estrutura molecular de um polímero consiste na repetição de pequenas unidades, ligadas por covalência, originando uma molécula bastante longa, de alta massa molecular, ou seja, uma macromolécula. Estas pequenas unidades são chamadas de monómeros (do grego, ‘uma parte’). A reação que promove a união dos monómeros para formar um polímero é chamada de polimerização.

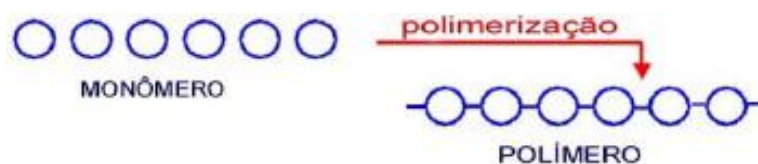


Fig. 2.22 – Polimerização (Inovação Tecnológica, 2006)

A alta massa molecular dos polímeros e a diversidade de estruturas (arquiteturas moleculares) que podem ser formadas pelo encadeamento dos monómeros conferem a estes materiais propriedades químicas e físicas especiais, como por exemplo, alta viscosidade, elasticidade ou dureza, resistência ao calor, à humidade e à abrasão etc. Os polímeros podem ser lineares, ramificados ou assumir uma estrutura em rede tridimensional. Quando o polímero é formado por apenas um tipo de monómero usa-se a expressão homopolímero. Quando há mais de um tipo de monómero na molécula, ela é designada como um copolímero.

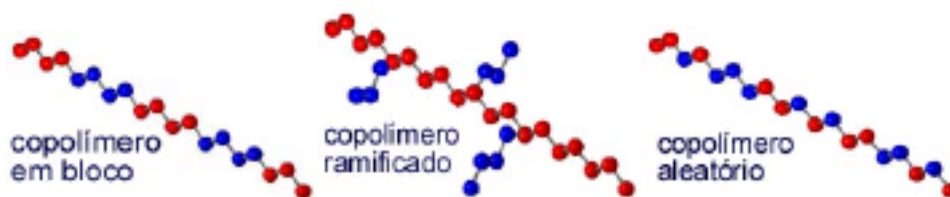


Fig. 2.23 – Diferentes tipos de copolímeros (Inovação Tecnológica, 2006)

Os polímeros podem ser inorgânicos ou orgânicos, naturais ou sintéticos. Um exemplo de polímero inorgânico é a sílica gel. A borracha da seringueira, polissacarídeos, proteínas e os ácidos nucleicos, constituem exemplos de macromoléculas naturais orgânicas.

De entre os polissacarídeos, os mais conhecidos são o amido e a celulose. A gelatina, albumina, queratina e o colágeno são alguns exemplos de proteínas.

Os polímeros sintéticos orgânicos são, basicamente, formados por hidrocarbonetos insaturados, derivados do petróleo, como o etileno e o propileno. O ano de 2007 comemora o centenário dos polímeros sintéticos. O primeiro produzido foi a Bakelite (polifenol), em 1907, por Leo Baekeland nos Estados Unidos da América. A partir da Bakelite, diversas macromoléculas foram sintetizadas em todo o mundo, tornando os polímeros um material onipresente em nossa vida diária.

Na verdade, a principal conquista industrial da química orgânica no século XX foi o fabrico em grande escala de polímeros sintéticos, como os plásticos, as borrachas e fibras sintéticas.

A reação de polimerização que dá origem a esses materiais, em geral, é classificada em dois tipos: condensação e adição. Na reação por condensação, cada etapa do processo é acompanhada pela formação da molécula de uma substância simples, geralmente a água. Na polimerização por adição, os monômeros reagem para produzir um polímero, sem formar subprodutos. As polimerizações por adição são normalmente conduzidas na presença de catalisadores, que em certos casos, exercem controlo sobre a estrutura da molécula, com efeitos importantes nas propriedades do polímero. A Bakelite, as poliamidas, como o Nylon, os poliuretanos e os poliésteres são alguns polímeros obtidos por condensação. Como exemplos da polimerização por adição temos o polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS), entre outros.

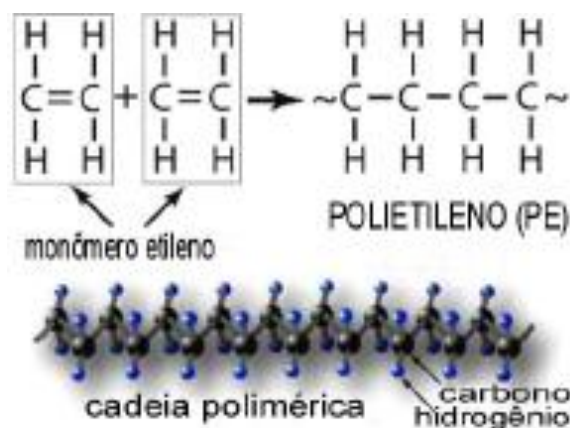


Fig. 2.24 – Polimerização por adição em que resulta o polietileno (Inovação Tecnológica, 2006)

Os três grandes grupos de polímeros sintéticos são os plásticos, as borrachas e as fibras. Diferenciam-se pelas suas propriedades mecânicas, ou seja, o modo como o material responde quando é submetido a uma força ou tensão, assim como outras características típicas de cada grupo.

- Plásticos

Os plásticos (palavra de origem grega que significa ‘adequado à moldagem’) são materiais que se fundem quando aquecidos e podem ser transformados em artefactos com finalidades específicas, como copos descartáveis, embalagens de alimentos, garrafas de refrigerantes, canetas, etc. Portanto, os plásticos, embora sejam sólidos no estado final, em algum estágio do seu processamento tornam-se fluidos e moldáveis, pela ação isolada ou conjunta de calor e pressão. Esta propriedade reversível, de fundir sob aquecimento e solidificar por arrefecimento, caracteriza os chamados polímeros termoplásticos, e permite que esses materiais possam ser reciclados com maior facilidade. Os polímeros que por aquecimento ou outra forma de tratamento, assumem uma estrutura reticulada (rede tridimensional), através de ligações covalentes fortes ou ligações Hidrogénio intermoleculares, tornam-se infusíveis e são designados como termorrígidos. O aumento da massa molar destes materiais, pela formação das ligações cruzadas, muitas vezes, também os torna insolúveis.

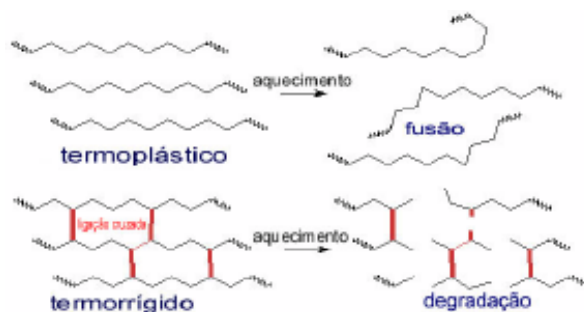


Fig. 2.25 – Aquecimento de polímeros termoplásticos e termorrígidos (Inovação Tecnológica, 2006)

- Borrachas

As borrachas são macromoléculas que exibem elasticidade de longa faixa, à temperatura ambiente. O processamento de borrachas para produção de artefactos, como pneus ou solas de sapatos, envolve a formação de ligações entre as cadeias poliméricas, através de uma reação química com enxofre, denominada de vulcanização. A borracha vulcanizada é um material termorrígido, com a característica única de permitir um grande alongamento, seguido instantaneamente de uma retração quase completa.

- Fibras

As fibras são caracterizadas como um material de corpo cilíndrico, flexível, com pequena secção transversal e elevada razão entre comprimento e diâmetro. Em geral, são macromoléculas lineares, que se podem orientar longitudinalmente, e apresentam grande resistência à tração mecânica e a variações de temperatura, entre -50 e 150 °C. As poliamidas (Nylon), poliésteres (PET) e o polipropileno (PP) são alguns dos plásticos mais utilizados para produção de fibras, tanto têxteis como de reforço. Para confecção de peças de vestuário, essas fibras podem ser transformadas em fios por processos de moldagem como a fiação por fusão, fiação seca ou húmida.

As fibras poliméricas têm sido utilizadas com sucesso para o aumento da resistência das misturas betuminosas. Atuam como reforço, aumentando tanto a resistência mecânica como a energia total de fendilhamento.

A adição de fibras poliméricas em misturas betuminosas faz com que parte da força atuante sobre o pavimento seja transferida para elas. Isso diminui o nível de tensão sobre as partes mais solicitadas do pavimento, reduzindo o comprometimento gerado por eventuais defeitos microestruturais e aumentando a resistência mecânica do material.

Além disso, devido a essa redistribuição de tensão, a energia elástica armazenada não será dissipada através de uma única frente de propagação, mas possivelmente por várias microfendas. O comprimento de cada uma destas microfendas geradas, assim como a perda de resistência gerada, será inferior ao causado por uma única fenda, mesmo que sua área superficial total seja a mesma. A energia necessária para o fendilhamento completo do pavimento será assim aumentada.



Fig. 2.26 – Fibras poliméricas utilizadas nos ensaios (LGMC, 2011)

As fibras poliméricas são quimicamente inertes, de forma a que não modificam o ligante. Porém, existe uma tendência das mesmas aumentarem a viscosidade do ligante evitando que este esorra do agregado antes da compactação. As fibras quando não impregnadas com ligante não se conseguem dispersar na mistura, devido ao facto de serem fortemente unidas. Quando as fibras estão impregnadas com ligante apresentam, além da facilidade de dispersão, as seguintes vantagens:

- inodoras;
- livres de pó;
- insensibilidade contra a humidade;
- facilidade de dosagem;
- produção de mistura mais homogênea.

As fibras atuam de forma a evitar a segregação das misturas, quando essas são impostas às elevadas temperaturas de aplicação e compactação, além de possibilitar que a mistura seja submetida a baixas temperaturas sem sofrer degradação.



Fig. 2.27 – Fibras poliméricas sem ligante (SciELO, 2009)

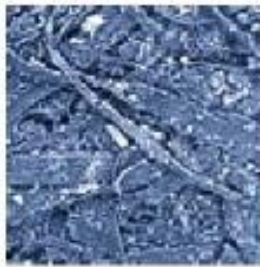


Fig. 2.28 – Fibras poliméricas impregnadas com ligante (SciELO, 2009)

3

SMA, O CRESCER DE UMA NECESSIDADE

3.1. ENQUADRAMENTO

Os pavimentos rodoviários, por constituírem a estrutura de suporte do tráfego rodoviário, devem satisfazer, ao longo da sua vida útil, determinados níveis mínimos de qualidade estrutural e funcional. Porém, o aumento do tráfego pesado e da carga transportada (total e por eixo), observado desde a década de 90 em Portugal e nos restantes países da UE, levou a indesejados níveis de deterioração dos pavimentos rodoviários e, em consequência, ao incumprimento dos referidos patamares de exigência estrutural e funcional.

Na década de 90, registou-se no nosso país um forte incremento do investimento na construção rodoviária. Um bom indicador desse crescimento é a evolução do consumo anual de betume asfáltico ao longo desse período. Seguindo o critério da Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, admite-se que o fabrico de misturas betuminosas a quente absorva cerca de 70 % a 75 % do total de betumes consumidos, isto para uma percentagem média de betume nas misturas betuminosas da ordem dos 5,0 %.



Fig. 3.1 – Exemplo de uma de muitas infraestruturas rodoviárias em Portugal (Segurança Rodoviária, 2008)

Um dos grandes problemas da sociedade atual é a necessidade de reduzir a dependência de matérias-primas que cada vez mais existem em quantidades limitadas disponíveis para a construção. As misturas betuminosas e os correspondentes materiais constituintes como o betume, derivado do petróleo, são materiais cujo consumo interessa diminuir do ponto de vista não só ambiental mas também económico.

As estradas e aeroportos são infraestruturas expostas a um aumento não só do volume de tráfego mas também das correspondentes cargas. Tendo Portugal uma rede viária maioritariamente constituída por pavimentos flexíveis e sendo os orçamentos disponíveis para as novas construções e manutenção destas infraestruturas cada vez mais limitados, torna-se necessário construir com o cuidado de garantir um desempenho adequado durante o ciclo de vida, em termos quer funcionais (segurança e conforto) quer estruturais. Nesta perspetiva tem sido desenvolvida investigação no sentido de implementar possíveis métodos de reforço dos pavimentos que sejam eficazes e económicos.



Fig. 3.2 – Aplicação de uma mistura betuminosa do tipo SMA (Highways Maintenance, 2006)

O SMA é um revestimento aplicado em espessuras, geralmente entre 1,5 a 6 cm, e caracterizado, basicamente, por uma elevada percentagem de agregados graúdos que formam uma estrutura de granulometria descontínua de elevado atrito interno. Os vazios do esqueleto mineral são preenchidos com betume modificado com polímeros e filler mineral garantindo a sua impermeabilidade.

Quando avaliada pelo critério do custo-benefício, a mistura betuminosa SMA é uma das técnicas mais promissoras em função da durabilidade, segurança e baixo custo de manutenção. O seu desempenho em pavimentos de tráfego pesado e aeroportos pode ser comprovado pela sua popularidade, ao longo dos últimos 20 anos, principalmente nos países europeus e E.U.A.

De entre as suas principais vantagens, o SMA oferece uma melhoria das condições mecânicas do pavimento, tais como a resistência à deformação, fissuração e desgaste bem como a melhoria das características funcionais, tais como a resistência à derrapagem, redução do “spray” projectado, da reflexão da luz em condição de pista húmida e a diminuição do ruído do tráfego.

3.2. CONTEXTUALIZAÇÃO

A mistura betuminosa SMA (“Stone Mastic Asphalt”) teve origem na Alemanha no final da década de 60, sob a denominação de “Splittmastixasphalt”, com o principal objetivo de reduzir o desgaste superficial causado pelo atrito pneu/revestimento e também as deformações permanentes nos pavimentos betuminosos. Entre 1960 e 1968, o Ministério dos Transportes da Alemanha procurava uma solução para o problema de deterioração do pavimento devido ao uso de pneus com pregos durante o inverno. A primeira solução foi um tratamento com mastique composto por 40 a 50 % de areia de granulometria 0 a 2 mm, 30 a 35 % de material de enchimento (filer) e 25 % de betume. O mastique era produzido em instalações misturadoras de misturas betuminosas, aquecido a 250°C e entregue na obra em caminhões especiais. O mastique quente era derramado manualmente sobre o pavimento danificado. Este tratamento com mastique fornecia ao pavimento uma alta resistência ao desgaste. Porém, apresentava a desvantagem de necessitar de trabalho manual, o que limitava a capacidade de uso por ser muito demorado e em certas ocasiões produzia uma camada heterogênea. Devido às desvantagens do tratamento com mastique, procurou-se um método diferente para produzir um tipo de mistura alternativa. O resultado foi uma mistura de 75 % de agregados graúdos de 5 a 8 mm, 15 % de areia de 0 a 2 mm, 10 % de material de enchimento (filer) e 7 % do peso total da mistura de ligante betuminoso. O problema desta mistura era que a uma temperatura de mistura de 180 °C o ligante escorria. Para evitar o escorrimento começaram a utilizar-se fibras como aditivo estabilizante. Assim nasceu o SMA, em julho de 1968. O primeiro recobrimento de SMA, uma camada de 2 cm de espessura, foi aplicado na rua Freiligrath de Wilhelmshaven na Alemanha.

O SMA é hoje muito popular em vários países do mundo. Têm-se feito muitos estudos com o intuito de melhorar ainda mais o processo de mistura e aplicação de SMA devido às grandes variações que apresentam os materiais encontrados em lugares distintos.

No final da década de 70, houve mudanças conceptuais na dosagem de misturas betuminosas com o objetivo de se utilizar misturas mais resistentes quanto a deformações permanentes. Com base nisso, algumas medidas foram tomadas para a obtenção de tais misturas:

- Dosagem com percentagens mais baixas de betume;
- Utilização de betumes mais resistentes (menor penetração);
- Redução do teor de filer;
- Emprego preferencialmente de areia natural;
- Utilização de uma percentagem mais elevada de agregados graúdos.

O resultado destas alterações na dosagem foi a construção de camadas betuminosas com maiores índices de vazios, quando comparadas com camadas executadas anteriormente, e com a necessidade de maior energia de compactação. Essa necessidade de maior energia de compactação resulta num esmagamento dos agregados. A solução foi fixar limites máximos para o índice de vazios das misturas, levando a uma redução da consolidação da mistura depois de compactada, ou seja, após a abertura para o tráfego. Com a fixação de limites máximos para o índice de vazios da mistura de SMA, na ordem de 7 %, houve também contribuição para redução da oxidação prematura do ligante betuminoso.

3.3. DEFINIÇÃO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Segundo a norma EN 13108-5, a mistura betuminosa SMA é definida como uma "mistura betuminosa descontínua com betume como ligante, composta por um esqueleto de agregado britado grosso ("stone") aglutinado por um mastique".

A mistura betuminosa SMA é caracterizada pela elevada percentagem de agregado que forma o esqueleto mineral. Os vazios no esqueleto mineral são preenchidos por um mastique betuminoso de elevada viscosidade. A elevada percentagem de agregado graúdo, pelo menos 70 %, assegura um contacto garantido pelo esqueleto mineral depois da compactação e a rigidez necessária para o mastique é alcançada por meio da adição da areia britada.

O SMA é uma mistura flexível, estável, resistente à formação de rodeiras, que tem no esqueleto mineral o responsável pela sua resistência e no mastique a durabilidade da mistura. Devido à sua constituição granulométrica, a mistura betuminosa SMA é considerada uma mistura rica em ligante betuminoso apresentando um consumo de ligante por volta dos 5 a 7 %, gerando uma película maior de ligante, e cerca de 3 a 7 % de volume de vazios logo após compactação quando aplicado.



Fig. 3.3 – Esqueleto de uma mistura betuminosa SMA (Asphalt, 2006)



Fig. 3.4 – Esqueleto de uma mistura betuminosa convencional (Asphalt, 2006)

Devido à sua percentagem na mistura, o ligante betuminoso consegue manter uma elevada viscosidade. Se a percentagem fosse superior aos 7 %, o escorrimento indesejável do ligante durante o armazenamento, transporte e aplicação da mistura seria muito provável. De realçar ainda que o facto de o SMA apresentar uma percentagem de betume superior às misturas tradicionais, possibilita que se forme uma película mais espessa de ligante em volta dos agregados, o que diminui a oxidação e uma possível penetração de humidade.

O mastique betuminoso é o principal responsável pela elevada coesão da mistura. A sua elevada percentagem faz com que a mistura apresente um baixo índice de vazios, retardando o processo de oxidação e aumentando a resistência da mistura pelo envolvimento e imbricamento dos agregados minerais.

O SMA é utilizado como camada de desgaste e numa espessura que varia entre 1,5 a 4,0 cm, em função do diâmetro máximo do agregado mineral utilizado na composição da mistura. Não é recomendada a utilização do SMA em espessuras muito superiores a 4,0 cm, devido a possível ocorrência do escorrimento do ligante e consequentemente maior probabilidade de formação de rodeiras.

No decorrer dos anos, o SMA vem sendo utilizado como alternativa para o rejuvenescimento de superfícies deterioradas. Para pavimentos que apresentem uma elevada capacidade estrutural, o SMA é empregue tendo em vista apenas uma melhoria do desempenho funcional nomeadamente no conforto e segurança dos condutores.

Ao escolher-se uma granulometria descontínua para a mistura SMA em relação às misturas betuminosas tradicionais, pretende-se que a maior percentagem de agregados graúdos forme uma estrutura compacta e imbricada que contribua para dissipar o carregamento. Este é um dos motivos pelo qual o SMA é tão resistente ao desgaste e à deformação permanente.

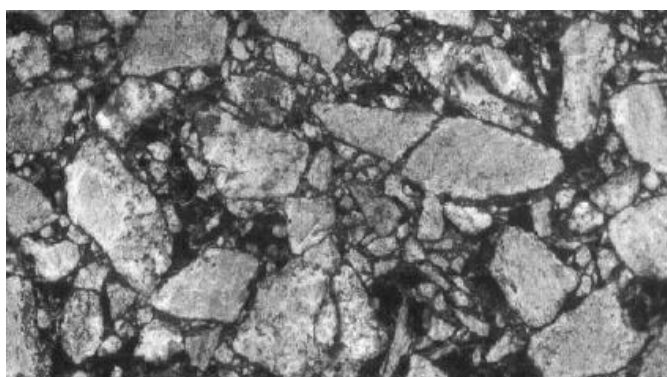


Fig. 3.5 – Amostra de uma mistura betuminosa SMA (Asphalt, 2006)

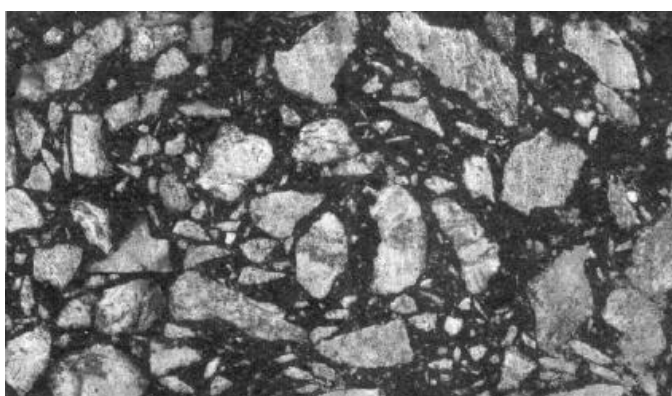


Fig. 3.6 – Amostra de uma mistura betuminosa convencional (Asphalt, 2006)

Com base em dados experimentais, a mistura betuminosa SMA tem-se mostrado uma mistura de alto desempenho estrutural e funcional. Insucessos que ocorreram em alguns casos estão relacionados em geral com falhas na execução, ligadas à segregação e à exsudação, que podem ser contornadas se houver um bom controlo dos agregados, uma dosagem apropriada da percentagem de ligante e de fibras, e o controlo de temperatura de preparação e compactação.



Fig. 3.7 – Exsudação do ligante betuminoso (Uemen, 2010)

Em misturas betuminosas a exsudação do ligante betuminoso ocorre sob a forma de manchas isoladas ou em grande extensão (espelhamento) e a excessiva presença de betume na superfície é identificada pelo aparecimento de marcas causadas pelos pneus em dias quentes. Em geral, a exsudação do ligante está associada à migração do betume para a superfície motivada por:

- segregação da mistura em alguns momentos da sua execução;
- compactação excessiva da mistura;
- excesso de ligante na mistura;
- emprego de ligante com viscosidade baixa em local com clima quente;
- falta de aderência do ligante betuminoso.

A exsudação do ligante também pode aparecer em misturas SMA devido:

- falta ou distribuição não homogênea das fibras;
- alimentação inadequada de filer na mistura;
- excesso de humidade no filer;
- perda excessiva de temperatura da massa betuminosa para aplicação.

3.4. CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DA MISTURA BETUMINOSA SMA

A mistura SMA reúne as seguintes características:

- Boa estabilidade a elevadas temperaturas – Ajudada pelo esqueleto mineral formado com agregados de elevada qualidade que aumenta o atrito interno;
- Boa flexibilidade a baixas temperaturas – Devido ao mastique rico em ligante que proporciona propriedades superiores às misturas convencionais de granulometria fechada;
- Elevada resistência ao desgaste – A mistura SMA tem baixo índice de vazios o que a faz ser impermeável e apresentar uma boa resistência ao envelhecimento, baixa sensibilidade à humidade e alta durabilidade;
- Elevada aderência entre os agregados minerais e o ligante;
- Boa resistência à derrapagem devido à macro textura da superfície de rolamento;

- Redução do “spray” ou borrifado de água – Por causa da textura da mistura, há diminuição do “spray” de água em dias chuvoso e existe também uma diminuição no reflexo ofuscante noturno na superfície de rolamento, melhorando a visibilidade das sinalizações horizontais do pavimento;
- Redução do nível de ruído – A granulometria descontínua da mistura SMA reduz consideravelmente a emissão de ruído, sendo o ruído do tráfego absorvido pela sua macro textura.

A mistura betuminosa SMA tem provado ser uma excelente opção, para além das vias de tráfego pesado, para:

- Vias com alta frequência de camiões;
- Interseções;
- Áreas de carregamento e descarregamento de cargas;
- Rampas;
- Pontes;
- Faixa “bus”;
- Pistas de aeroporto;
- Autódromos;
- Estacionamentos;
- Portos;
- Rotundas excêntricas.



Fig. 3.8 – Compactação de uma mistura SMA numa rotunda (Highways Maintenance, 2006)

3.5. O SMA EM PORTUGAL

O Autódromo Internacional do Algarve abriu as portas ao público dia 2 de novembro de 2008 com a última prova do Campeonato do Mundo de Superbikes e Supersport. O novo circuito português é caracterizado pela configuração da pista com curvas rápidas e cegas, descidas acentuadas e uma reta longa. Para que não se registem irregularidades na pista, a última camada foi colocada de forma ininterrupta, com as aprovações da Federação Internacional de Automobilismo e Federação Internacional de Motociclismo.

Para que o pilotos possam sentir segurança e aderência foi selecionado para a camada de desgaste do pavimento uma mistura tipo SMA, que além dos benefícios mencionados apresenta outros, tais como, bom desempenho a altas e baixas temperaturas, elevada resistência ao envelhecimento, maior segurança e redução do ruído provocado pela circulação dos veículos.



Fig. 3.9 – Reta longa (Construir, 2008)



Fig. 3.10 – Descida acentuada (AutoFans, 2009)

Outra obra onde foi escolhida a mistura betuminosa SMA foi para a substituição da camada de desgaste degradada no Nó de Francos na Via de Cintura Interna no Porto. Esta zona da VCI caracteriza-se pelo intenso tráfego e alta frequência de camiões, bem como pelos elevados esforços tangenciais devidos à curvatura dos ramos de acesso do nó. A aplicação da mistura SMA permitiu aumentar a coesão do pavimento para resistir ao tráfego pesado e aos esforços tangenciais.



Fig. 3.11 – Elevada frequência de camiões (Estradas, 2009)



Fig. 3.12 – Tráfego intenso (Estradas, 2009)

Na obra de repavimentação da Avenida do Brasil em Lisboa também foi usada uma mistura do tipo SMA com uma espessura de 4cm. O pavimento existente é um pavimento flexível, que apresentava degradações importantes. Trata-se de um perfil transversal tipo com duas vias em cada sentido.



Fig. 3.13 e 3.14 – Aplicação de uma mistura betuminosa SMA com fibras na Avenida do Brasil (JAOP, 2010)

4

O SMA E A ANÁLISE DAS PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS

4.1. COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA DAS MISTURAS BETUMINOSAS

A compreensão da relação massa-volume de misturas betuminosas compactadas é importante tanto do ponto de vista do projeto de uma mistura betuminosa quanto do ponto de vista de sua aplicação em obra. Assim, é essencial compreender também que o projeto de uma mistura é um processo volumétrico cujo propósito é determinar o volume de betume e agregado requerido para produzir uma mistura com as propriedades desejadas. No entanto, medidas de volume de agregados e betume em laboratório ou em campo são muito difíceis de serem realizadas.

As misturas betuminosas possuem três componentes, agregados, betume e ar e é possível estabelecer relações entre as massas e os volumes destes, como apresenta a Figura 4.1. O Quadro 4.1 apresenta as abreviaturas adotadas na Figura 4.1.

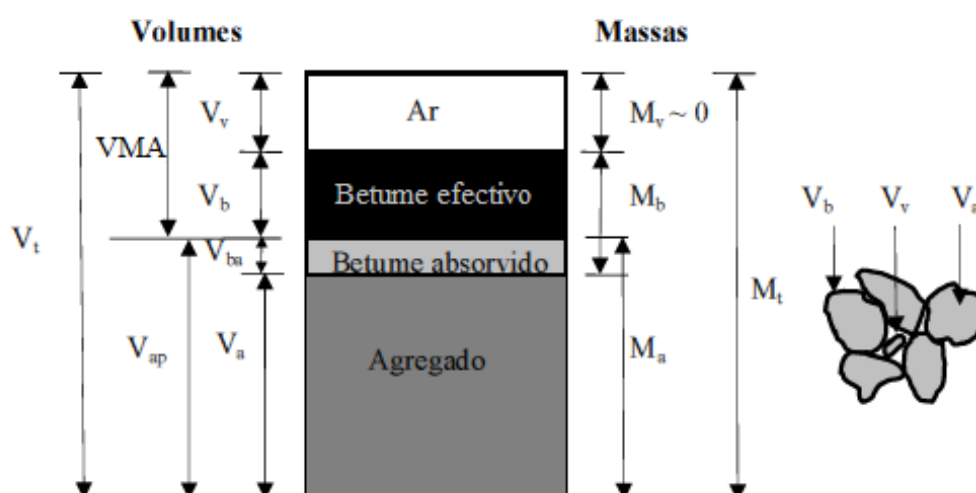


Fig. 4.1 – Composição volumétrica de uma amostra de mistura betuminosa compactada (Pavimentos Rodoviários, 2009)

Quadro 4.1 – Abreviaturas adotadas na Figura 4.1

Abreviatura	Grandeza
M_a	Massa de agregado
M_b	Massa de betume
M_v	Massa de vazios (ar) (desprezável)
M_t	Massa total
V_a	Volume de agregado
V_b	Volume de betume efetivo
V_v	Volume de vazios
V_{ba}	Volume de betume absorvido
V_t	Volume total
$V_{ap} = V_a + V_{ba}$	Volume aparente
$VMA = V_b + V_v$	Volume de vazios no agregado mineral

A composição volumétrica de uma mistura betuminosa deve ser analisada em pormenor durante a formulação, de modo que esta possa ter um adequado desempenho durante o fabrico e em serviço. Desta forma, deve ser determinada a relação entre as diversas frações dos agregados (granulometria), percentagem de betume e volume de vazios que, para determinado ligante e agregados, que garantam um comportamento adequado das misturas betuminosas.

Dois parâmetros muito importantes são os vazios na mistura total ou o volume de vazios (V_v) e o volume de vazios no agregado mineral (VMA) que representa o volume dos vazios intergranulares entre as partículas de agregados de uma mistura betuminosa compactada, que inclui o volume de vazios e o volume de betume, expresso como uma percentagem do volume total, isto é, representa tudo o que não é agregado numa mistura (vazios com ar e betume).

A compactação é o processo que diminui os vazios da mistura betuminosa, de modo a propiciar-lhe adequadas propriedades mecânicas. Este processo influencia propriedades como estabilidade, deformabilidade e durabilidade.

A composição volumétrica influencia as propriedades da mistura betuminosa. O Quadro 4.2 apresenta as variáveis da composição volumétrica que afetam as propriedades das misturas betuminosas.

Quadro 4.2 – Variáveis que afetam as propriedades das misturas betuminosas

Propriedades	Definição	Variáveis que afetam as propriedades
Flexibilidade	Capacidade de deformar-se, de modo a permitir a adaptação das camadas betuminosas a assentamentos graduais das camadas inferiores	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume
Estabilidade	Consiste em obter uma mistura com a capacidade adequada para resistir às deformações produzidas pelas cargas a que fica sujeita em serviço. Depende essencialmente da fricção interna dos materiais e da sua coesão	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume; grau de compactação.
Durabilidade	Resistência à degradação causada pelo tráfego e pelos efeitos dos agentes atmosféricos	Granulometria; percentagem de betume; grau de compactação; sensibilidade à água.
Resistência à fadiga	Aptidão da mistura em resistir a esforços de flexão repetidos sem fendilhar	Granulometria; percentagem de betume; rigidez do betume; grau de compactação; temperatura da mistura.
Resistência à derrapagem	Capacidade da superfície de um pavimento, quando molhada, em oferecer resistência ao deslizamento e à derrapagem.	Granulometria; tipo e textura do agregado; resistência do agregado ao polimento.
Impermeabilidade	Aptidão da mistura em impedir o acesso de água às camadas inferiores.	Granulometria; percentagem de betume; grau de compactação.
Trabalhabilidade	Facilidade de uma mistura betuminosa em ser espalhada e compactada.	Granulometria; percentagem e tipo de betume; tipo de agregado.

4.2. PREPARAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS ENSAIADAS

4.2.1. TEMPERATURA DA MISTURA

Segundo a EN 12697-35, a temperatura máxima da realização da mistura em laboratório deve ser 20 °C superior em relação à temperatura de referência indicada no Quadro 4.3. Nos ensaios foi utilizado um betume com classe de penetração 35/50 à qual corresponde uma temperatura de referência de 165 °C e consequentemente uma temperatura máxima de 185 °C. A temperatura de aquecimento da mistura (temperatura alvo) deve ser escolhida de modo a que a mistura tenha arrefecido para a temperatura de referência quando a compactação tem início mas não deve ser superior à máxima temperatura.

Quadro 4.3 – Temperaturas de referência das misturas betuminosas (EN 12697-35)

Classe de penetração do betume	Temperatura de referência para as misturas betuminosas, °C	Classe de penetração do betume	Temperatura de referência para as misturas betuminosas, °C
20/30 pen	180	100/150 pen	140
30/45 pen	175	160/220 pen	135
35/50 pen	165	250/330 pen	130
40/60 pen	155	330/430 pen	125
50/70 pen	150	500/650 pen	120
70/100 pen	145	650/900 pen	115

4.2.2. PREPARAÇÃO DO AGREGADO, FILER E FIBRAS

1 – O agregado mineral deve consistir da mistura de partículas, com a distribuição correta das respetivas dimensões;

2 – Pesar os agregados, incluindo o filer, com uma exatidão de 0,1 %. A quantidade medida deve corresponder à composição da mistura betuminosa e da massa do conjunto a ser produzido. A massa do conjunto deve ter em conta a capacidade efetiva do misturador;

3 – Pesar as fibras com a mesma exatidão.



Fig. 4.2 – Pó 0/4 (LGMC, 2011)

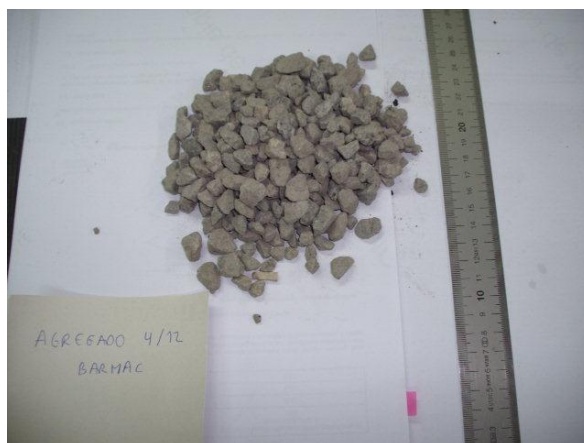


Fig. 4.3 – Agregado 4/12 (LGMC, 2011)

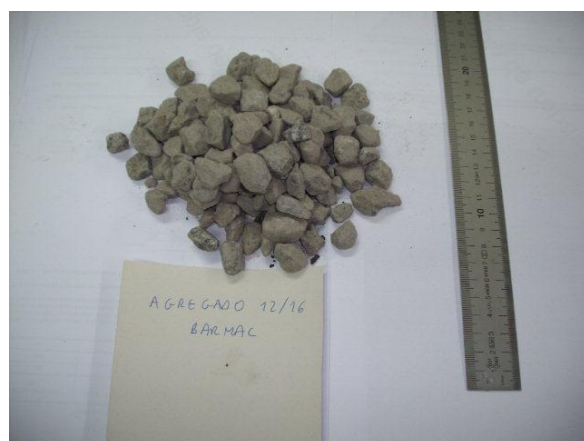


Fig. 4.4 – Agregado 12/16 (LGMC, 2011)

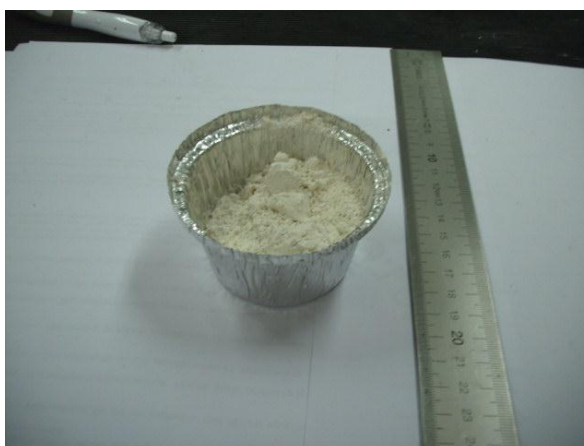


Fig. 4.5 – Filler (LGMC, 2011)

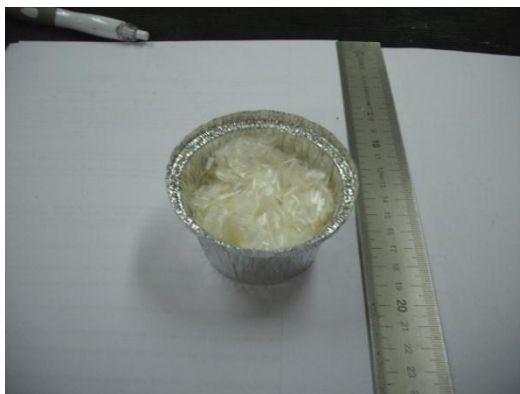


Fig. 4.6 – Fibras (LGMC, 2011)

4.2.3. PREPARAÇÃO DO BETUME

- 1 – Despejar o betume em recipientes de metal;
- 2 – Aquecer o betume até à temperatura alvo na estufa. Antes de misturar, abrir os recipientes, mexer o betume manualmente e verificar a temperatura;
- 3 – Ao aquecer o recipiente, devem ser tomadas precauções para que a pressão dentro do recipiente não se torne excessiva, como por exemplo, soltar um pouco a tampa.



Fig. 4.7 – Betume (LGMC, 2011)

4.2.4. PROCESSO DE MISTURA

- 1 – Antes de começar a misturar, aquecer o recipiente de mistura até à temperatura alvo;
- 2 – Despejar os agregados, já pesados, para o recipiente de mistura. Se necessário, misturar os agregados em conjunto. De seguida, adicionar as fibras (nas misturas onde estão presentes) e logo depois o betume. Controlar a quantidade precisa de betume pesando o recipiente enquanto se adiciona o mesmo. Misturar os componentes no recipiente de mistura até o agregado ficar totalmente revestido com o ligante. Examinar visualmente a mistura para assegurar a mesma está homogênea.
- 3 – Depois do processo de mistura, a mistura betuminosa SMA está pronta para ser usada no procedimento de ensaio.

4.3. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS ENSAIADAS

Para a realização dos ensaios foram preparados sete tipos diferentes de misturas betuminosas. Nas misturas betuminosas fez-se variar as percentagens de betume e as percentagens de fibra. Foram preparadas sete misturas betuminosas:

- 0 % de fibras e 4,5 %, 5 %, 5,5 %, 6 % e 6,5 % de betume;
- 0,2 % de fibras e 6 % betume;
- 0,4 % de fibras e 6 % de betume.

Os quadros com os diferentes materiais e respectivas percentagens que compõem as sete misturas betuminosas ensaiadas encontram-se nos Anexos na alínea A.1.

No estudo foram utilizados agregados graníticos, filer comercial calcário, betume modificado 35/50 e fibras acrílicas.

De acordo com a norma EN 13108-5 (devido à inexistência do Anexo Nacional na referida norma, foi utilizado como referência o Anexo Espanhol), a designação das misturas ensaiadas é ‘SMA 16 bin 35/50’, ou seja, trata-se de uma mistura betuminosa tipo Stone Mastic Asphalt com dimensão máxima do agregado de 16 mm para camada de regularização e com ligante da gama de penetração 35/50. Os requisitos recomendados para declarar a conformidade das misturas são os seguintes:

- Ao tratar-se de um SMA 16 bin 35/50, o valor indicativo mínimo para a percentagem de betume é de 4,8 %. Nos ensaios utilizou-se 4,5 % para estudar os resultados com esta percentagem e mais à frente indicar-se-ão quais as conclusões a que se chegou.
- Em termos granulométricos, para as misturas betuminosas habitualmente aplicadas em Portugal se enquadrarem num SMA 16 bin 35/50, recomendam-se os fusos apresentados no Quadro 4.4. A mistura de agregados utilizada nos ensaios laboratoriais cumpre este fuso granulométrico.

Quadro 4.4 – Fusos granulométricos para as misturas betuminosas tipo SMA 16 bin 35/50 (EN13108-5)

Peneiros, mm	Fusos granulométricos, %
22	100
16	90-100
11	30-45
8	20-30
4	20-28
2	20-25
0,5	-
0,063	4-7

4.4. BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA DAS MISTURAS BETUMINOSAS

A baridade máxima teórica define-se como a massa por unidade de volume de uma mistura betuminosa, sem vazios, a uma temperatura conhecida.

A norma EN 12697-5 descreve três métodos para determinar a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa: um método volumétrico (A), um método hidrostático (B) e um método matemático (C). No método volumétrico, o volume da amostra é medido com o auxílio de um picnómetro, como o deslocamento da água ou o solvente na amostra. No método hidrostático, o volume da amostra é calculado a partir do princípio da hidrostática (o volume é calculado através da massa de água deslocada quando o corpo é imerso – impulso). No método matemático, a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa é calculada a partir da sua composição (percentagem de ligante, percentagem de agregados e percentagem de fibras) e respetivas massas volúmicas.

4.4.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS (PROCEDIMENTOS A E B)

- Estufa;
- Espátula;
- Balança, com uma resolução de 0,1 g;
- Termómetro, com uma resolução de 0,1 °C;
- Banho-maria, capaz de manter a água a uma temperatura uniforme com uma exatidão de 0,2 °C. O banho deve conter uma rede para permitir a imersão do picnómetro até 20 mm abaixo da parte superior do mesmo, permitindo que a água circule. O volume do banho deve ser no mínimo três vezes superior ao volume do picnómetro;
- Mesa vibratória;
- Picnómetro com tampa, com um volume tal que a mostra ocupe mais de 2/3 do seu volume. O volume do picnómetro deve ser calibrado com regularidade;
- Sistema de Vácuo, com um manómetro calibrado, capaz de evacuar o ar de dentro do picnómetro a uma pressão residual de 4 kPa ou menos.

4.4.2. MATERIAIS E REAGENTES

- Água desionizada.



Fig. 4.8 – Estufa (LGMC, 2011)



Fig. 4.9 – Mesa vibratória, sistema de vácuo e picnômetro (LGMC, 2011)



Fig. 4.10 – Banho-maria (LGMC, 2011)



Fig. 4.11 – Picnômetro e balança (LGMC, 2011)

4.4.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras devem ser espalhadas e separadas em partículas e aglomerações. As aglomerações de partículas não devem exceder os 6 mm. Se a mistura não estiver suficientemente mole para ser separada manualmente, aquecê-la num tabuleiro na estufa a uma temperatura que não exceda os 110 °C, mas apenas até a mistura poder ser trabalhada manualmente.

4.4.4. MODO DE PROCEDER

4.4.4.1. Procedimento A - Volumétrico

- 1 – Pesar o picnómetro vazio com tampa (m_1), de volume conhecido (V_p);
- 2 – Colocar a amostra seca dentro do picnómetro e colocá-lo à temperatura ambiente, e depois pesar novamente com a tampa (m_2);
- 3 – Encher o picnómetro com água desionizada, até ao máximo de 30 mm abaixo da junta da tampa;
- 4 – Evacuar o ar do interior do picnómetro, aplicando uma pressão de vácuo residual de 4kPa ou menos durante (15 ± 1) minutos. A evacuação do ar deve ser auxiliada colocando o picnómetro numa mesa vibratória;
- 5 – Encher o picnómetro com água desionizada assegurando que nenhum ar é introduzido, até perto da marca de referência da tampa;
- 6 – Colocar o picnómetro no banho-maria a uma temperatura conhecida (± 1 °C) (temperatura de ensaio) durante 30 minutos no mínimo, de modo a que o picnómetro e a amostra fiquem à temperatura da água do banho-maria. O nível da água do banho-maria deve estar aproximadamente 20 mm abaixo do topo do picnómetro;
- 7 – Encher o picnómetro até à marca de referência na tampa com água desionizada. Essa água desionizada, deve ser colocada à temperatura de ensaio antes de ser adicionada, num banho-maria;
- 8 – Retirar o picnómetro do banho-maria, secar a parte exterior e pesar imediatamente (m_3).

4.4.4.2. Procedimento B - Hidrostático

- 1 – Determinar a massa do recipiente vazio ao ar (m_1) e quando submerso em água (m_2);
- 2 – Colocar a amostra no recipiente seco e trazê-la à temperatura ambiente, depois determinar a massa do recipiente mais a amostra ao ar (m_3);
- 3 – Encher o recipiente com água desionizada e evacuar as possíveis bolhas de ar, por agitação e/ou vibração, aplicando uma pressão de vácuo residual de 4kPa ou menos durante (15 ± 1) minutos;
- 4 – Colocar o recipiente em banho-maria a uma temperatura conhecida (± 1 °C) entre os 20 °C e os 30 °C pelo menos 30 minutos, levar a temperatura da amostra e da água no recipiente para o mesmo valor como a da água em banho-maria. O nível da água do banho-maria deve estar aproximadamente 20 mm abaixo do topo do recipiente;
- 5 – Determinar a massa do recipiente mais a amostra quando suspensa em água (m_4). A água deve estar à mesma temperatura que a usada no ponto 4.

4.4.4.3. Procedimento C – Matemático

O método matemático é particularmente adequado quando a composição da mistura (percentagem de agregado e percentagem de ligante) e as massas volúmicas dos agregados e ligante são conhecidas. Uma das desvantagens deste método reside no facto do nível de absorção do ligante ser apenas suposto, tornando-se assim difícil simular com exatidão a verdadeira ocorrência. Contudo, o método poderá também ser utilizado para determinar os limites extremos da baridade máxima teórica prevista da mistura através de métodos físicos.

A composição da mistura é expressa em percentagens da mistura total [percentagem agregado + percentagem de fibras (caso existam) + percentagem ligante = 100,0 %].

As massas volúmicas dos agregados devem ser determinadas de acordo com a norma EN 1097-6. Segundo esta norma, são três os métodos para calcular as massas volúmicas dos agregados. O primeiro diz respeito ao cálculo da massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a) e define-se como o quociente entre a massa de uma amostra de agregado seca em estufa e o volume que esta amostra ocupa dentro de água incluindo quaisquer poros internos fechados mas excluindo poros acessíveis à água. O segundo método consiste na determinação da massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) mas ao contrário do método anterior que exclui os poros acessíveis à água no volume que a amostra ocupa dentro de água, este inclui. O terceiro e último método passa por calcular a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}) e define-se pelo quociente entre a massa da amostra do agregado incluindo a massa da água alojada nos poros acessíveis à água e o volume que a amostra ocupa na água incluindo quer os poros acessíveis à água, quer os poros internos fechados.

A determinação da baridade máxima teórica pelo procedimento C foi calculada utilizando dois destes três métodos, a massa volúmica das partículas secas em estufa e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca. Os valores das massas volúmicas dos agregados pelo método das partículas saturadas são ligeiramente superiores em relação ao das partículas secas porque enquanto num entra na fórmula de cálculo a massa das partículas secas em estufa, no outro entra a massa da amostra de agregado mais a massa da água que fica alojada nos poros (o volume é calculado do mesmo modo).

4.4.5. CÁLCULOS

Os quadros com os resultados dos cálculos da BMT para as sete misturas betuminosas ensaiadas encontram-se nos Anexos na alínea A.2.

A densidade da água a uma temperatura de 25 °C é 997,1 kg/m³. Para outras temperaturas a densidade é (997,1×K) kg/m³.

Quadro 4.5 – Densidade da água

Temperatura da Água, °C	Fator de correção, K	Densidade da Água, kg/m ³	Temperatura da Água, °C	Fator de correção, K	Densidade da Água, kg/m ³
10	1,0027	999,8	20	1,0012	998,3
11	1,0026	999,7	21	1,0010	998,1
12	1,0025	999,6	22	1,0007	997,8
13	1,0023	999,4	23	1,0005	997,6
14	1,0022	999,3	24	1,0003	997,4
15	1,0021	999,2	25	1,0000	997,1
16	1,0019	999,0	26	0,9997	996,8
17	1,0017	998,8	27	0,9995	996,6
18	1,0016	998,7	28	0,9992	996,3
19	1,0014	998,5	29	0,9989	996,0
20	1,0012	998,3	30	0,9986	995,7

4.4.5.1. Procedimento A - Volumétrico

A baridade máxima teórica da mistura betuminosa ρ_{mv} determinada pelo procedimento volumétrico deve ser calculada com uma precisão de 1 kg/m^3 de acordo com a expressão 4.1:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times \left(V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w} \right)} \quad (4.1)$$

em que,

ρ_{mv} - baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada pelo procedimento volumétrico, em kilogramas por metro cúbico (kg/m^3), com uma precisão de 1 kg/m^3 ;

m_1 - massa do picnómetro vazio, em gramas (g);

m_2 - massa do picnómetro mais amostra, em gramas (g);

m_3 - massa do picnómetro mais amostra e água, em gramas (g);

V_p - volume do picnómetro, quando cheio de água até à marca de referência, em metros cúbicos (m^3);

ρ_w - densidade da água à temperatura de ensaio, em $0,1 \text{ kilogramas por metro cúbico } (\text{kg/m}^3)$ com uma precisão de $0,1 \text{ kg/m}^3$, de acordo com o Quadro 4.5.

4.4.5.2. Procedimento B - Hidrostático

A baridade máxima teórica da mistura betuminosa ρ_{mh} determinada pelo procedimento hidrostático deve ser calculada com uma precisão de 1 kg/m^3 de acordo com a expressão 4.2:

$$\rho_{mh} = \frac{m_3 - m_1}{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_2)} \times \rho_w \quad (4.2)$$

em que,

ρ_{mh} - baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada pelo procedimento hidrostático, em kilogramas por metro cúbico (kg/m^3), com uma precisão de 1 kg/m^3 ;

m_1 - massa do recipiente vazio ao ar, em gramas (g);

m_2 - massa do recipiente vazio suspenso na água, em gramas (g);

m_3 - massa do recipiente mais amostra ao ar, em gramas (g);

m_4 - massa do recipiente mais amostra e água suspensos na água, em gramas (g);

ρ_w - densidade da água à temperatura de ensaio, em $0,1 \text{ kilogramas por metro cúbico } (\text{kg/m}^3)$ com uma precisão de $0,1 \text{ kg/m}^3$, de acordo com o Quadro 4.5.

4.4.5.3. Procedimento C - Matemático

A baridade máxima teórica da mistura betuminosa ρ_{mc} determinada pelo procedimento matemático deve ser calculada com uma precisão de 1 kg/m³ de acordo com a expressão 4.3:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\frac{p_a}{\rho_a} + \frac{p_b}{\rho_b}} \quad (4.3)$$

em que,

ρ_{mc} - baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada por cálculo, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³), com uma precisão de 1 kg/m³;

p_a - percentagem de agregado na mistura, com uma precisão de 0,1 % (m/m);

ρ_a - baridade aparente do agregado, em quilogramas por metro cúbico, com uma precisão de 1 kg/m³;

p_b - percentagem de ligante na mistura, com uma precisão de 0,1 % (m/m);

ρ_b - baridade do betume a 25 °C, em quilogramas por metro cúbico, com uma precisão de 1 kg/m³;

$p_a + p_b = 100,0$ % (m/m).

Quando são usados agregados com diferentes densidades, calcula-se a baridade máxima teórica pela expressão 4.4:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{p_{a1}}{\rho_{a1}}\right) + \left(\frac{p_{a2}}{\rho_{a2}}\right) + \dots + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)} \quad (4.4)$$

em que,

ρ_{mc} - baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada por cálculo, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³), com uma precisão de 1 kg/m³;

p_{a1} - percentagem de agregado 1 na mistura (m/m);

ρ_{a1} - baridade aparente do agregado 1, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³), com uma precisão de 1 kg/m³;

p_{a2} - percentagem de agregado 2 na mistura (m/m);

ρ_{a2} - baridade aparente do agregado 2, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³), com uma precisão de 1 kg/m³;

p_b - percentagem de ligante na mistura (m/m);

ρ_b - baridade do betume, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³), com uma precisão de 1 kg/m³;

$p_{a1} + p_{a2} + \dots + p_b = 100,0$ % (m/m).

4.4.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O gráfico da Figura 4.12 representa a evolução da baridade máxima teórica pelos quatro procedimentos em estudo quando se aumenta a percentagem de betume nas misturas betuminosas sem fibras e quando se aumenta a percentagem de fibras mantendo a percentagem de betume constante nos 6 %.

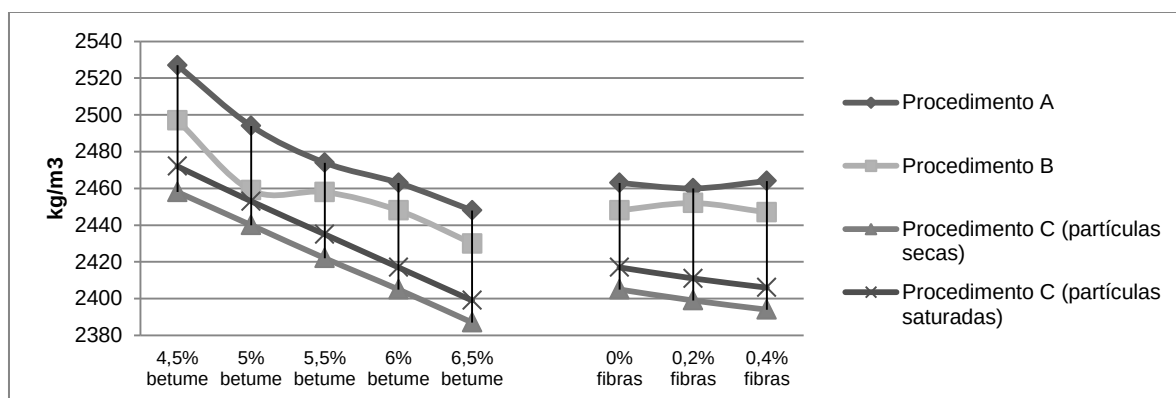


Fig. 4.12 – Comparação da Baridade Máxima Teórica pelos diferentes procedimentos, para as misturas sem fibras fazendo variar a percentagem de betume e para as misturas com 6 % de betume quando se aumenta a percentagem de fibras

Pela análise do gráfico verifica-se:

- a baridade máxima teórica, para todos os procedimentos, tende a diminuir quando se aumenta a percentagem de betume na mistura. Tal acontecimento fica a dever-se ao facto de o aumento da percentagem de betume na mistura betuminosa implicar uma redução da percentagem de agregado na mesma, isto é, quando se aumenta um constituinte com menor massa volúmica (betume) está a reduzir-se um constituinte com maior massa volúmica (agregado) fazendo com que a baridade máxima teórica diminua;
- para os métodos experimentais, o método A apresenta resultados mais coerentes do que o método B onde foi observado para a mistura com 5% de betume um valor não totalmente de acordo com a evolução natural da baridade máxima teórica.
- relativamente às misturas em que se aumenta a percentagem de fibras e se mantém constante a percentagem de betume, constata-se que a baridade máxima teórica apresenta pequenas oscilações nos procedimentos A e B inferiores à repetibilidade dos métodos pelo que se conclui que a introdução das fibras parece não influenciar a baridade máxima teórica da mistura betuminosa.
- no procedimento C (partículas secas e saturadas) a BMT diminui. Como é um procedimento matemático, se substituímos o agregado por fibras a BMT diminui pois a massa volúmica destas é menor. No entanto, estas variações são ligeiramente inferiores às variações que se registam quando se aumenta a percentagem de betume porque, enquanto com o aumento de betume o agregado diminui 0,5% no volume total da mistura, com o aumento de fibras diminui apenas 0,2%.

A fórmula de cálculo da baridade máxima teórica é dada pelo quociente entre a massa da mistura betuminosa e o volume (sem vazios) da mesma, de acordo com a expressão 4.5:

$$BMT = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume (sem vazios)}} \quad (4.5)$$

Na análise ao gráfico da Figura 4.12 verifica-se outra característica que se prende com o facto de o valor da baridade máxima teórica ser diferente nos procedimentos pela qual é calculada. Ora, se o numerador (massa) quer na expressão 4.1, 4.2 e 4.4 não varia de uma expressão para a outra, conclui-se que é o denominador (volume) varia com o procedimento de cálculo. Como a baridade máxima teórica calculada pelo procedimento A (expressão 4.1) apresenta um valor maior quando comparada com todos os outros procedimentos, significa que o denominador (volume) na expressão 4.1 é o que regista menores valores quando comparado com os denominadores (volumes) das expressões 4.2 e 4.4 (partículas secas e saturadas). A baridade máxima teórica calculada pelo procedimento C (partículas secas) reflete os menores valores, logo o denominador da expressão 4.4 (partículas secas) é superior ao denominador de todas as outras expressões de cálculo dos outros procedimentos.

A Figura 4.13 traduz a variação dos volumes pelos diferentes procedimentos de cálculo da baridade máxima teórica.

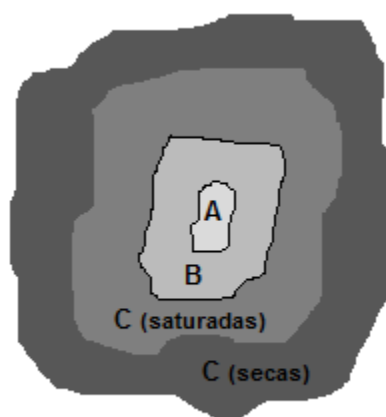


Fig. 4.13 – Variação dos volumes (denominadores) nas expressões de cálculo da BMT pelos diferentes procedimentos

4.5. BARIDADE DOS PROVETES DE MISTURAS BETUMINOSAS

Baridade define-se como a massa por unidade de volume, com vazios, de um provete a uma temperatura conhecida. Depende não só da densidade dos materiais que constituem a mistura mas também do grau de compactação, da curva granulométrica e da percentagem de betume. A massa do provete é obtida pela pesagem do provete seco ao ar. A baridade tem influência no desempenho de uma mistura betuminosa (resistência mecânica e módulo de rigidez), pelo que é uma medida indireta da sua “qualidade”.

A norma EN 12697-6 define os quatro métodos de ensaio para determinação da baridade de um provete betuminoso compactado:

- baridade – seca (para os provetes com uma superfície muito fechada),
- baridade – provete saturado com superfície seca (para os provetes com uma superfície fechada);
- baridade – provete selado (para os provetes com uma superfície aberta ou grosseira);
- baridade por dimensões (para os provetes com formas geométricas, regulares, ou seja, prismas, cilindros, etc).

Para os primeiros três métodos, o volume do provete é obtido com base na massa ao ar e na sua massa em água. No método a seco, a massa em água é determinada sem tratamento prévio. No método com o provete saturado com superfície seca, o provete é primeiramente saturado com água, e, em seguida, a sua superfície é seca com uma camurça húmida. No método com o provete selado, o provete é selado antes da sua imersão em água para evitar o acesso da água aos vazios do provete. No quarto método por dimensões, o volume do provete é obtido a partir da medição das dimensões.

4.5.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS

- Balança, com uma resolução de 0,1 g, capaz de pesar a o provete imerso em água (com cesto de rede metálica);
- Banho-maria, com uma temperatura uniforme com uma exatidão de $\pm 1,0$ °C. O banho-maria deve possuir uma rede metálica para permitir a circulação de água à volta do provete. O banho de ter um capacidade de pelo menos três vezes o volume do provete;
- Termómetro, com resolução de $\pm 1,0$ °C;
- Papel absorvente.



Fig. 4.14 – Balança e provete (LGMCC, 2011)



Fig. 4.15 – Fio suspenso ligado à balança para pesar o provete imerso em água (LGMC, 2011)

4.5.2. MATERIAIS E REAGENTES

- Água, com densidade conhecida à temperatura do ensaio.

4.5.3. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

4.5.3.1. Equipamento e Utensílios

- Compactador de impacto com pedestal de madeira;
- Moldes;
- Estufa;
- Placa de aquecimento;
- Dispositivo para desmoldar os provetes.

4.5.3.2. Procedimento

1 – A mistura deve ser colocada na estufa e aquecida até à temperatura de referência abaixo indicada, conforme a gama de penetração do betume utilizado. Nos ensaios foi utilizado um betume com classe de penetração 35/50 à qual corresponde uma temperatura de referência de 165 °C. Se necessário, após amassadura em laboratório, as misturas podem ser armazenadas em estufa, a uma temperatura máxima de 130 °C, durante um período máximo de 3 horas, sem que a mistura ultrapasse as temperaturas do Quadro 4.6;

Quadro 4.6 – Temperaturas de Referência

Classes de Penetração do Betume	Temperatura de Referência (°C)
20/30 pen	180
30/45 pen	175
35/50 pen	165
40/60 pen	155
50/70 pen	150

2 – Aquecer na placa de aquecimento a base do martelo que estará em contacto com o provete. Aquecer os moldes completos (base, molde e anel) na estufa até à temperatura de referência;

3 – Colocar o filtro circular na base onde irá encaixar o molde no compactador. Colocar a mistura quente dentro do molde usando um funil e distribuir o material fazendo circular a espátula. Deve ter-se cuidado para que não ocorra segregação. Após encher o molde, nivelar suavemente a superfície da mistura com a espátula e cobri-la com outro filtro circular;

4 – Dar início ao processo de compactação. Encher e compactar o provete num espaço de 4 minutos. O anel deve estar colocado sobre o molde e preso ao pedestal com umas pinças. Compactar o provete aplicando 50 pancadas de cada lado do provete;

5 – Colocar os moldes compactados sobre uma superfície lisa, isenta de impurezas. Deixar arrefecer os moldes ao ar, ou com a ajuda de uma ventoinha, até atingirem os 40 °C, aproximadamente. Desmoldar cuidadosamente os provetes, com o dispositivo adequado.



Fig. 4.16 – Compactador de impacto com pedestal de madeira (LGMC, 2011)

4.5.3.3. Dimensões e Armazenamento

Os provetes devem ter uma espessura mínima de 20 mm ou duas vezes a dimensão máxima do agregado, qual os dois for o maior. Os provetes devem ser armazenados num local fresco, com uma temperatura não superior a 25 °C.

4.5.3.4. Provetes

Os provetes devem ser limpos se necessário. Devem estar secos, ter um teor em água conhecido ou ser secos à temperatura ambiente até massa constante. A massa constante obtém-se quando a diferença entre duas pesagens consecutivas num intervalo no mínimo de 6 horas, for inferior a 0,1 %.

Foram preparados 28 provetes, divididos em 7 grupos de 4 provetes cada um. Os primeiros cinco grupos correspondem às cinco misturas preparadas com 0% de fibras e 4,5 %, 5 %, 5,5 %, 6 % e 6,5 %, respetivamente. O sexto e sétimo grupos, dizem respeito às duas misturas que foram preparadas com 6 % de betume e a fazer variar a percentagem de fibras em 0,2 % e 0,4 %, respetivamente.

4.5.4. DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS PROVETES

Os quadros com as dimensões dos provetes para as sete misturas betuminosas ensaiadas encontram-se nos Anexos na alínea A.3.

4.5.4.1. Equipamento e Utensílios

- Paquímetro

4.5.4.2. Medição da altura

- Tirar quatro medidas igualmente espaçadas à volta do perímetro de cada provete.
- Determinar a média das quatro medições da altura da amostra e representa-la com arredondamento ao 0,1 mm.

4.5.4.3. Medição do diâmetro

- Tirar duas medições perpendiculares entre si no topo, meio e base da amostra.
- Determinar a média das seis medições do diâmetro e representá-la com arredondamento ao 0,1 mm.



Fig. 4.17 – Determinação das dimensões do provete com o auxílio de um paquímetro (LGMC, 2011)

4.5.5. MODO DE PROCEDER

4.5.5.1. Procedimento A – A Seco

- 1 – Determinar a massa do provete seco (m_1). Se utilizar provetes húmidos, efetuar o passo 1 depois de executar de 2 a 4;
- 2 – Determinar a densidade da água à temperatura do ensaio (ρ_w), com uma precisão de 0,1 kg/m³, de acordo com o Quadro 4.5;
- 3 – Imergir o provete no banho-maria à temperatura de ensaio;
- 4 – Determinar a massa do provete, imediatamente após a água ter estabilizado após imersão (m_{2i}).

4.5.5.2. Procedimento B – Provete Saturado com a Superfície Seca (SSD)

- 1 – Determinar a massa do provete seco (m_1). Se utilizar provetes húmidos, efetuar o passo 1 depois de executar de 2 a 6;
- 2 – Determinar a densidade da água à temperatura do ensaio (ρ_w), com uma precisão de $0,1 \text{ kg/m}^3$, de acordo com o Quadro 4.5;
- 3 – Imergir o provete no banho-maria à temperatura de ensaio. Permitir que a água sature o provete durante tempo suficiente, ao fim do qual não há diferenças na massa do provete. Normalmente o período de saturação requerido é no mínimo de 30 minutos;
- 4 – Determinar a massa do provete saturado, imerso em água (m_2);
- 5 – Retirar o provete da água, secar a superfície com papel absorvente, assegurando que não ficam gotas superficiais;
- 6 – Determinar a massa do provete saturado com a superfície seca, imediatamente (m_3).

4.5.5.3. Procedimento C – Provete Selado

- 1 – Determinar a massa do provete seco (m_1);
- 2 – Determinar a densidade da água à temperatura do ensaio (ρ_w), com uma precisão de $0,1 \text{ kg/m}^3$, de acordo com o Quadro 4.5;
- 3 – Selar o provete de modo a que os vazios internos do provete que fazem parte da sua composição volumétrica não sejam preenchidos e que não surjam vazios adicionais entre o selante e o provete ou nas pregas do selante. Após este procedimento, o provete deve ficar inacessível à água quando submerso;
- 4 – Determinar a massa do provete seco e selado (m_2);
- 5 – Mergulhar o provete no banho de água mantido à temperatura de ensaio conhecida;
- 6 – Determinar a massa do provete selado imerso em água (m_3), tomando as precauções necessárias para evitar a adesão de bolhas de ar ao selante durante a pesagem.

4.5.5.4. Procedimento D – Provete Geométrico

- 1 – Determinar as dimensões do provete em milímetros;
- 2 – Determinar a massa do provete seco (m_1).

4.5.6. CÁLCULOS

Os quadros com os resultados dos cálculos da Baridade para as sete misturas betuminosas ensaiadas encontram-se nos Anexos na alínea A.4.

4.5.6.1. Procedimento A – A Seco

A baridade dos provetes de mistura betuminosa ρ_{bdry} , deve ser calculada com uma precisão de 1 kg/m³ de acordo com a expressão 4.6:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w \quad (4.6)$$

em que,

ρ_{bdry} - baridade do provete da mistura betuminosa determinada pelo procedimento A, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

m_1 - massa do provete seco, em gramas (g);

m_{2i} - massa do provete imediatamente após a água ter estabilizado após imersão, em gramas (g);

ρ_w - densidade da água à temperatura de ensaio, com uma precisão de 0,1 kg/m³.

4.5.6.2. Procedimento B - Proвете Saturado com a Superfície Seca (SSD)

A baridade dos provetes de mistura betuminosa ρ_{ssd} , deve ser calculada com uma precisão de 1 kg/m³ de acordo com a expressão 4.7:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (4.7)$$

em que,

ρ_{bssd} - baridade do provete da mistura betuminosa determinada pelo procedimento B (SSD), em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

m_1 - massa do provete seco, em gramas (g);

m_2 - massa do provete imerso em água, por um período mínimo de 30 minutos, em gramas (g);

m_3 - massa do provete saturado com a superfície seca, em gramas (g);

ρ_w - densidade da água à temperatura de ensaio, com uma precisão de 0,1 kg/m³.

4.5.6.3. Procedimento C - Proвете Selado

NOTA: Não foi possível calcular a baridade pelo procedimento C devido à ausência de material no laboratório para a realização do ensaio.

A baridade dos provetes de mistura betuminosa ρ_{bsea} , deve ser calculada com uma precisão de 1 kg/m³ de acordo com a expressão 4.8:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}} \quad (4.8)$$

em que,

ρ_{bsea} - baridade do provete da mistura betuminosa determinada pelo procedimento C, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

m_1 - massa do provete seco, em gramas (g);

m_2 - massa do provete selado seco, em gramas (g);

m_3 - massa do provete selado em água, em gramas (g);

ρ_w - densidade da água à temperatura de ensaio, com uma precisão de 0,1 kg/m³;

ρ_{sm} - densidade do material selante à temperatura de ensaio, com uma precisão de 10 kg/m³

4.5.6.4. Procedimento D - Provete Geométrico

A baridade dos provetes de mistura betuminosa $\rho_{b,dim}$, deve ser calculada com uma precisão de 1 kg/m³ de acordo com a expressão 4.9:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad (4.9)$$

em que,

$\rho_{b,dim}$ - baridade do provete da mistura betuminosa determinada pelo procedimento D, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

m_1 - massa do provete seco, em gramas (g);

h - altura do provete, em milímetro (mm);

d - diâmetro do provete, em milímetro (mm).

4.5.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O gráfico da Figura 4.18 traduz a evolução da baridade pelos três procedimentos em estudo quando se aumenta a percentagem de betume nas misturas betuminosas sem fibras e quando se aumenta a percentagem de fibras mantendo a percentagem de betume constante nos 6 %.

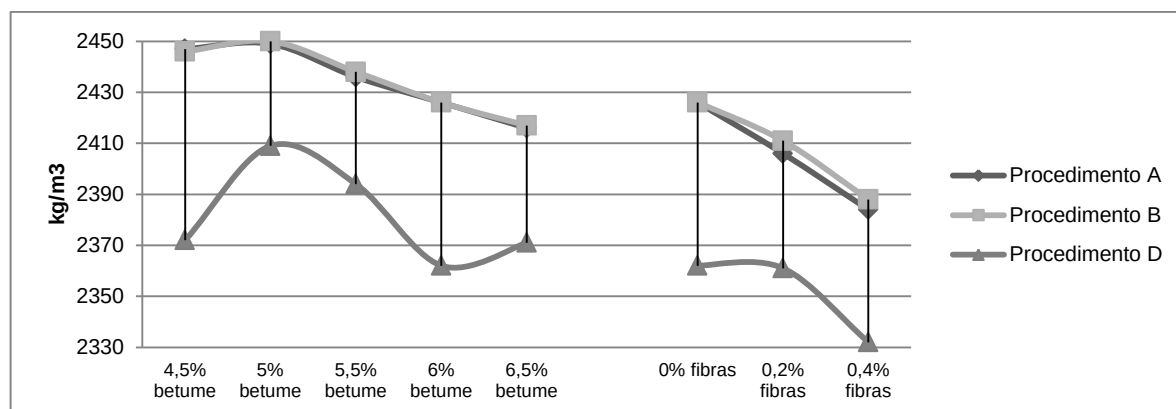


Fig. 4.18 – Comparação da Baridade pelos diferentes procedimentos, para as misturas sem fibras fazendo variar a percentagem de betume e para as misturas com 6 % de betume quando se aumenta a percentagem de fibras

Pela análise do gráfico verifica-se que, nos três procedimentos, a baridade para uma percentagem de betume de 5 % é superior à baridade para uma percentagem de 4,5 %. A partir de uma percentagem em betume ligeiramente superior a 5 % o valor da baridade tende a diminuir. Esse acontecimento parece ficar a dever-se aos seguintes aspetos:

- para uma mistura betuminosa com uma percentagem de betume de 4,5 % a compactação fica mais difícil na medida em que, aquando do processo de compactação de uma mistura, o betume atua como lubrificante baixando o atrito interno entre o agregado. Como a percentagem de betume é pequena, as forças de atrito são elevadas fazendo com que o volume do provete aumente e consequentemente a baridade seja inferior quando comparada com a baridade do provete da mistura betuminosa com 5 % de betume.
- o betume adicionado vai preencher vazios da mistura de agregado conduzindo a um aumento da massa do provete sem aumento do volume do provete.
- relativamente às misturas em que se aumenta a percentagem de fibras e se mantém constante a percentagem de betume nos 6 %, observa-se que a baridade diminui nos três procedimentos. Na realidade estamos a aumentar um constituinte com menor massa volúmica (fibras) e a reduzir um constituinte com maior massa volúmica (agregado), logo por si só a baridade vai diminuir. Mas a elevada redução da baridade com o aumento das fibras deve-se especialmente ao fato de as fibras criarem na mistura uma estrutura tridimensional que resiste à compactação absorvendo parte da energia de compactação não se obtendo a mesma redução de volume que a mistura sem fibras.
- a partir do valor máximo da baridade a redução desta grandeza varia de uma forma quase linear, para os métodos A e B, o que não acontece no procedimento D. Este aspeto só vem reforçar a tese de que o método D (dimensional) não é o mais indicado para a avaliação da baridade de misturas betuminosas fechadas (baixa porosidade).

A fórmula de cálculo da baridade é dada pelo quociente entre a massa da mistura betuminosa e o volume (com vazios) da mesma, de acordo com a expressão 4.10:

$$\text{Baridade} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume (com vazios)}} \quad (4.10)$$

Na análise ao gráfico da Figura 4.18 constata-se que a baridade varia quando se varia o procedimento pela qual é calculada. Ora, se o numerador (massa) nas expressões 4.7, 4.8 e 4.9 é sempre o mesmo pois é a massa do provete seco (m_1), conclui-se que é o denominador (volume) que varia com o procedimento. Como a baridade calculada pelo procedimento A (expressão 4.7) apresenta um valor muito similar ao calculado pelo procedimento B (expressão 4.8), conclui-se que o volume (denominador) não regista grandes variações de um procedimento para o outro. A baridade apresenta os menores valores quando calculada pelo procedimento D, o que traduz que o volume da expressão 4.9 é superior ao volume obtido pelos procedimentos A e B.

O gráfico da Figura 4.19 traduz a variação dos volumes pelos diferentes procedimentos de cálculo da baridade.

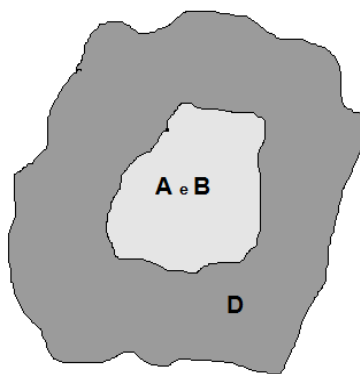


Fig. 4.19 – Variação dos volumes (denominadores) nas expressões de cálculo da baridade pelos diferentes procedimentos

É possível fazer uma análise da evolução da energia utilizada na compactação das misturas betuminosas através da comparação entre a baridade e a baridade máxima teórica, quando se aumenta a percentagem de betume ou a percentagem de fibras. Nos gráficos seguintes foi feita essa comparação para todas as combinações possíveis entre a baridade máxima teórica pelos procedimentos A, B e C (partículas secas e saturadas) e a baridade pelos procedimentos A, B e D.

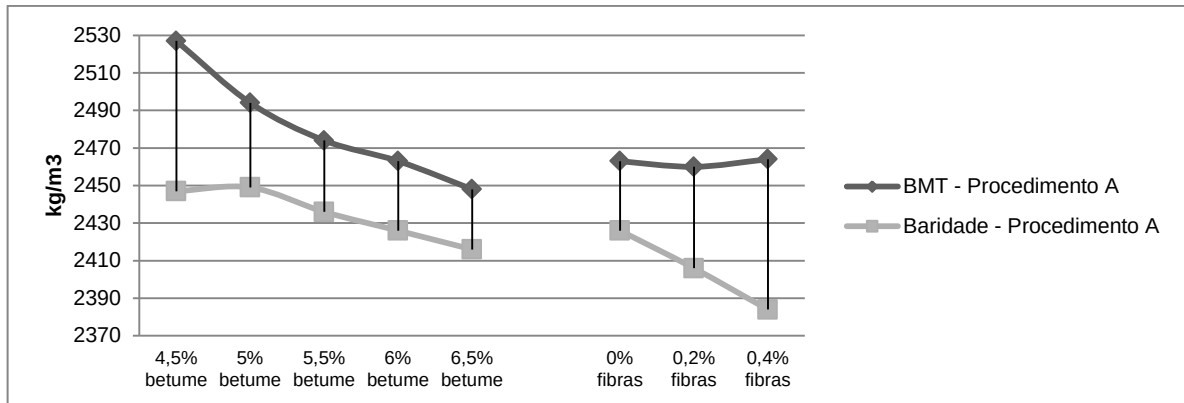


Fig. 4.20 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento A e a BMT calculada pelo procedimento A

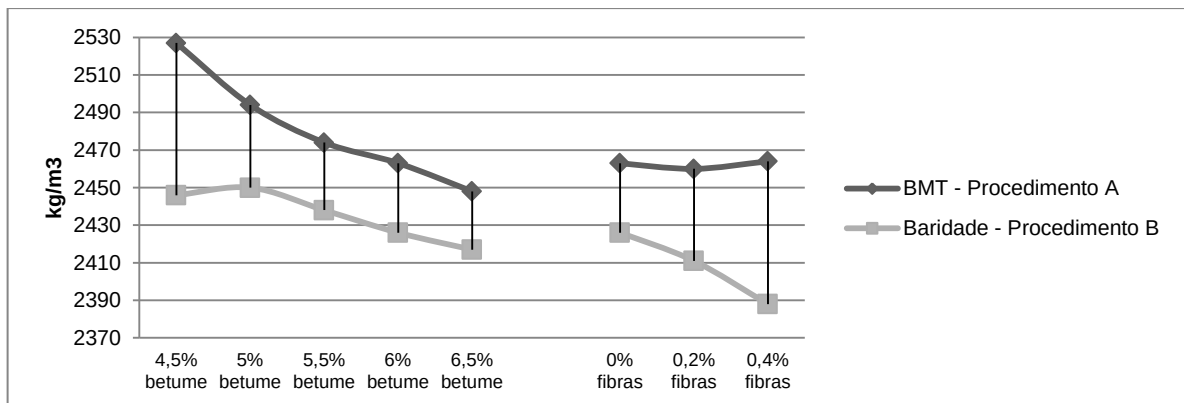


Fig. 4.21 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento B e a BMT calculada pelo procedimento A

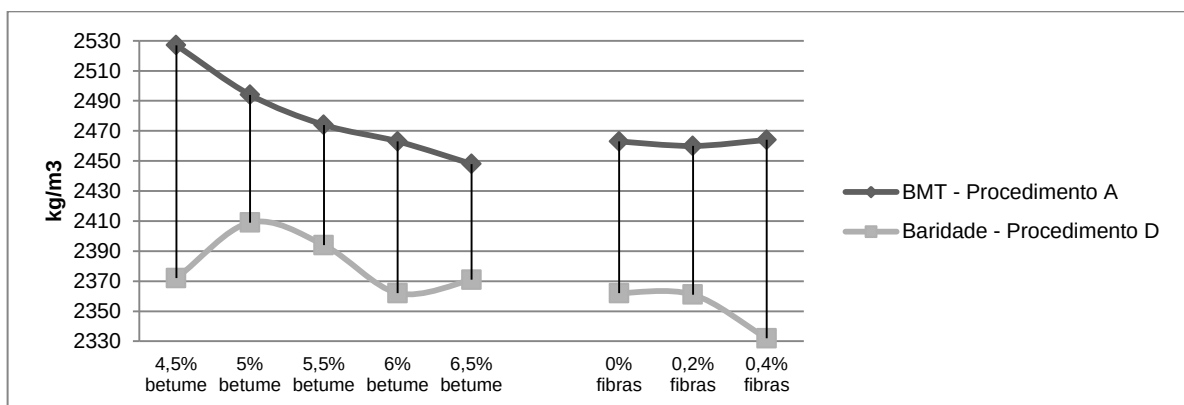


Fig. 4.22 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento D e a BMT calculada pelo procedimento A

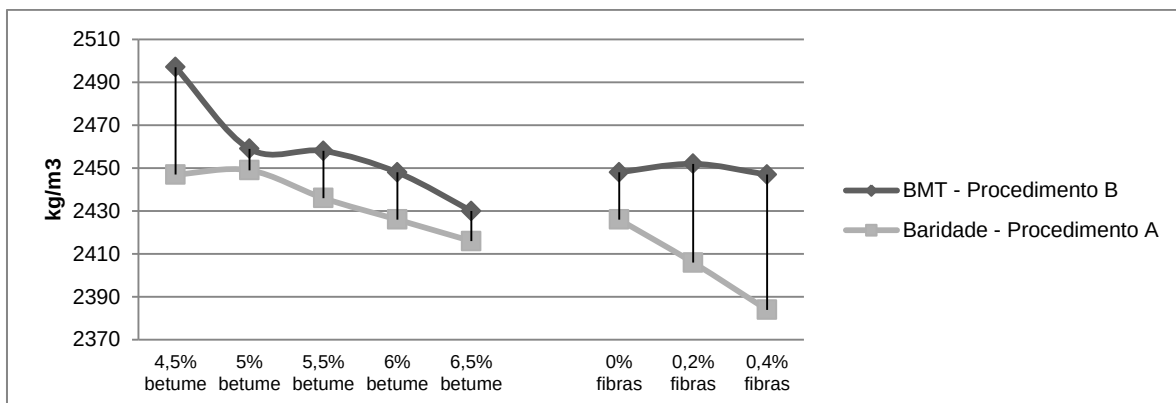


Fig. 4.23 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento A e a BMT calculada pelo procedimento B

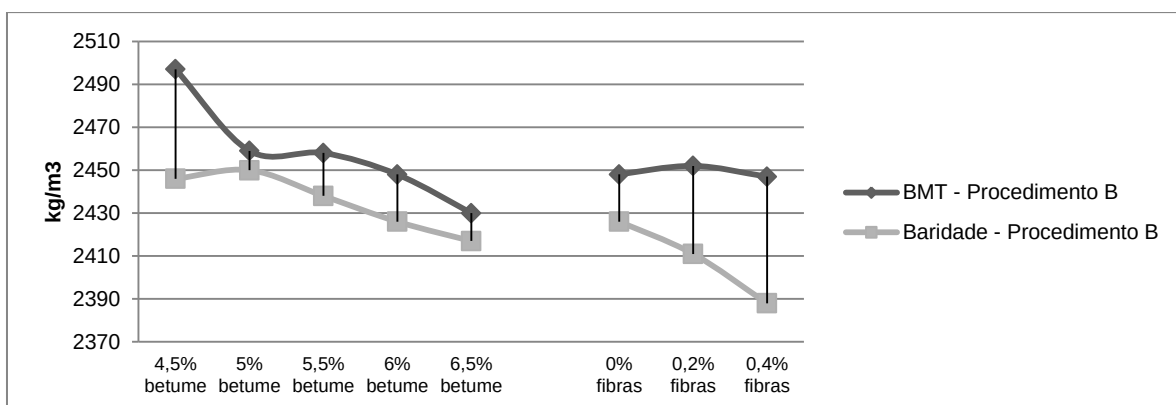


Fig. 4.24 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento B e a BMT calculada pelo procedimento B

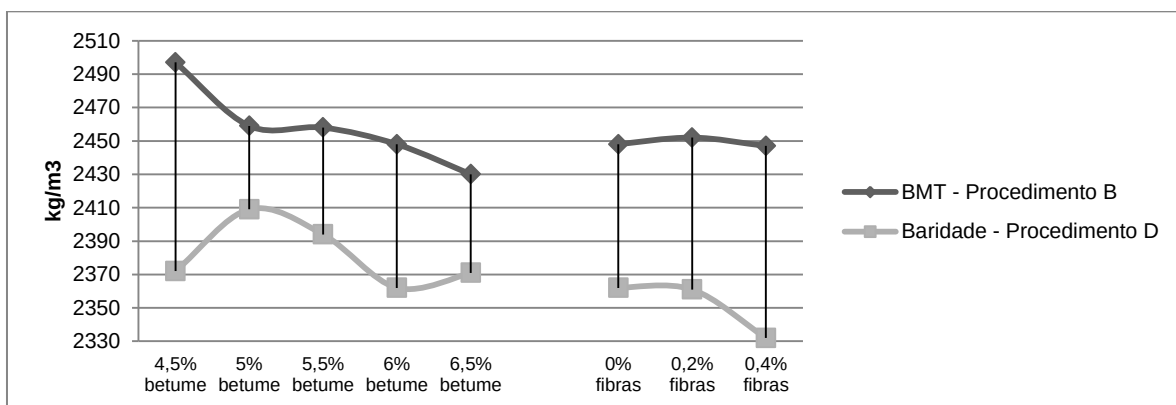


Fig. 4.25 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento D e a BMT calculada pelo procedimento B

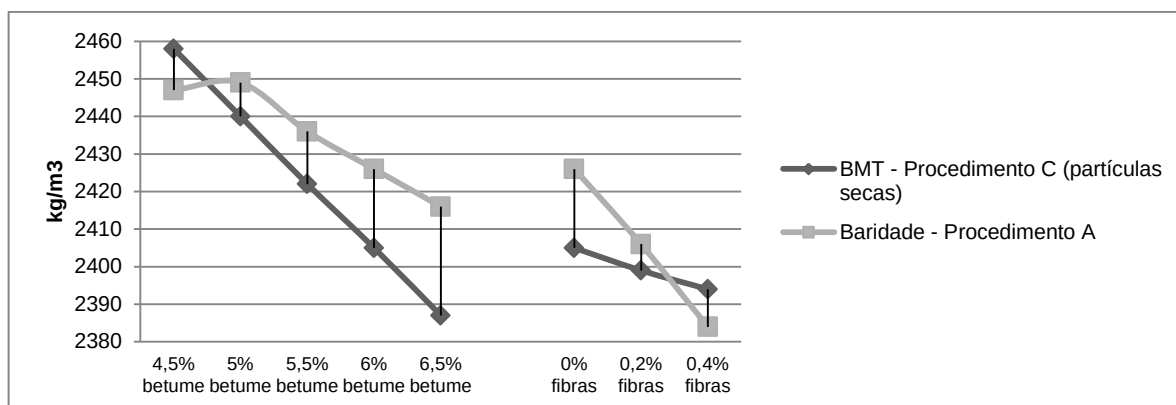


Fig. 4.26 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento A e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas secas)

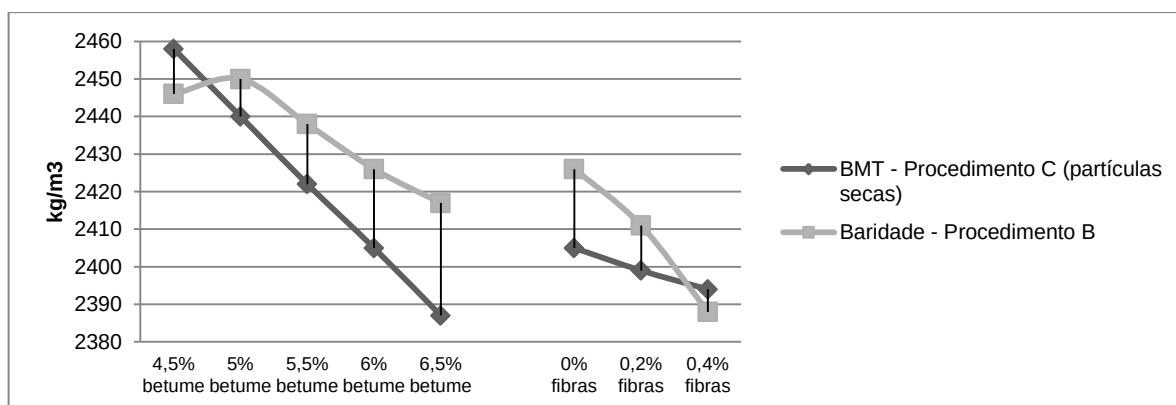


Fig. 4.27 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento B e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas secas)

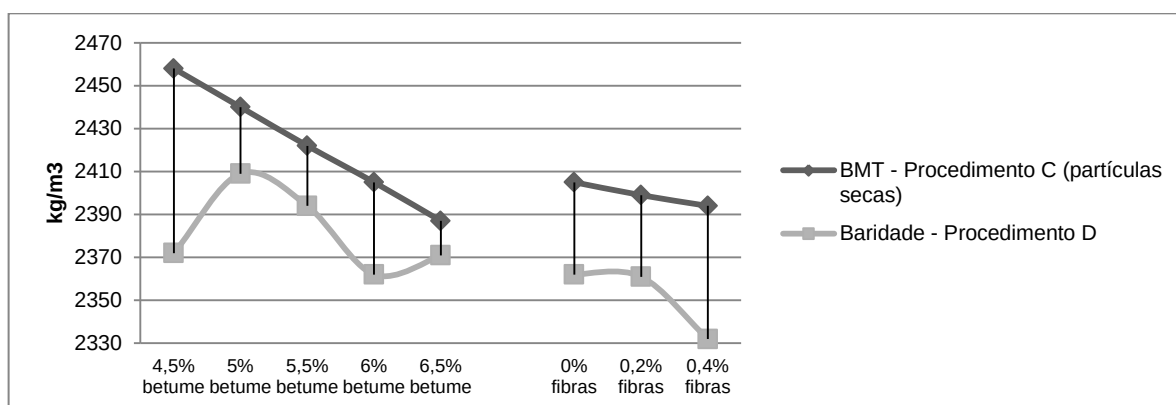


Fig. 4.28 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento D e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas secas)

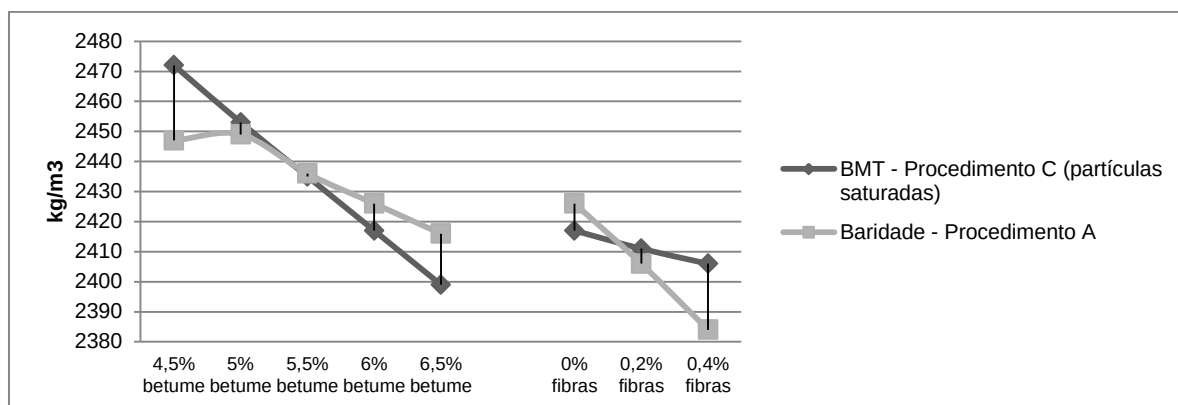


Fig. 4.29 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento A e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas saturadas)

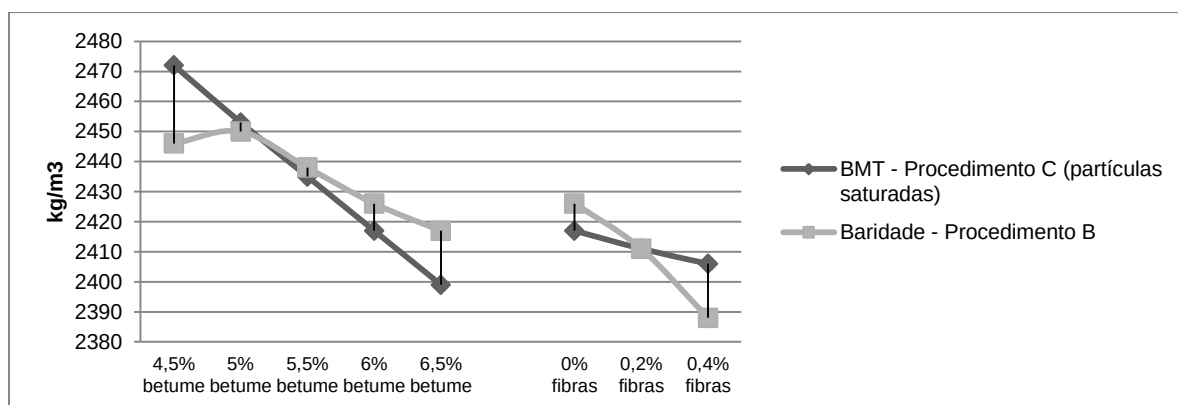


Fig. 4.30 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento B e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas saturadas)

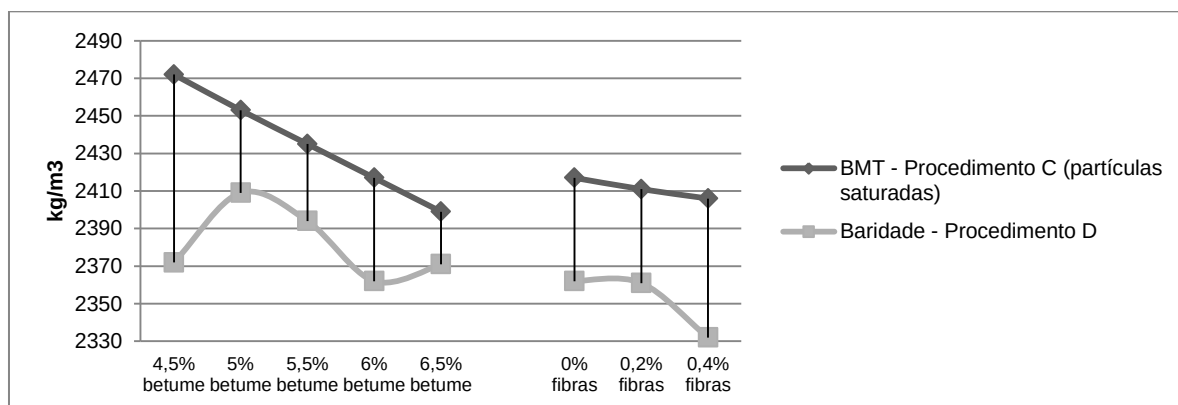


Fig. 4.31 – Comparação entre os valores da baridade calculada pelo procedimento D e a BMT calculada pelo procedimento C (partículas saturadas)

Para as misturas betuminosas sem fibras, quando a percentagem de betume é baixa (4,5 %) como a energia de compactação porque é sempre a mesma e como a percentagem de betume é baixa, as forças de atrito entre os agregados são elevadas. Quando se aumenta a percentagem de betume, o betume atua como lubrificante e provoca uma redução do atrito interno entre os agregados.

Como as fibras são adicionadas com o objetivo de aumentar a resistência das misturas betuminosas, naquelas em que mantém a percentagem de betume nos 6 % e se aumenta a percentagem de fibras, a compactação fica mais difícil devido ao aumento das forças de atrito interno entre o agregado e o betume sendo mais difícil a compactação para a mesma energia.

Através da análise das Figuras 4.26, 4.27, 4.29 e 4.30 verifica-se:

- a BMT calculada pelo procedimento C (partículas secas) é inferior à baridade calculada pelos procedimentos A e B, para percentagens de 0,2 % de fibras e de betume a partir dos 5 %;
- a BMT calculada pelo procedimento C (partículas saturadas) é inferior à baridade calculada pelos procedimentos A e B, para percentagens de betume a partir dos 5,5 %.

Conclui-se que, o cálculo da porosidade utilizando estas quatro combinações é inviável porque o resultado seria a obtenção de porosidades negativas.

Nos ensaios para o cálculo da baridade máxima teórica pelos métodos volumétricos e hidrostáticos pode ser utilizada água destilada à temperatura ambiente ou um solvente.

Nos ensaios realizados foi utilizada água. Uma das vantagens da utilização da água reside no facto de não serem utilizadas materiais perigosos. Uma segunda vantagem reside no facto da massa volúmica da água ter uma menor suscetibilidade à temperatura do que o solvente orgânico, o que significa que o controlo da temperatura durante a execução do ensaio exige um esforço menor.

Uma terceira vantagem reside no facto dos vazios de ar acessíveis no agregado, que se encontram situados por baixo da película de ligante e que ocorrem quando se utilizam agregados porosos, serem determinados como fazendo parte do volume do agregado, como está ilustrado na Figura 4.32.

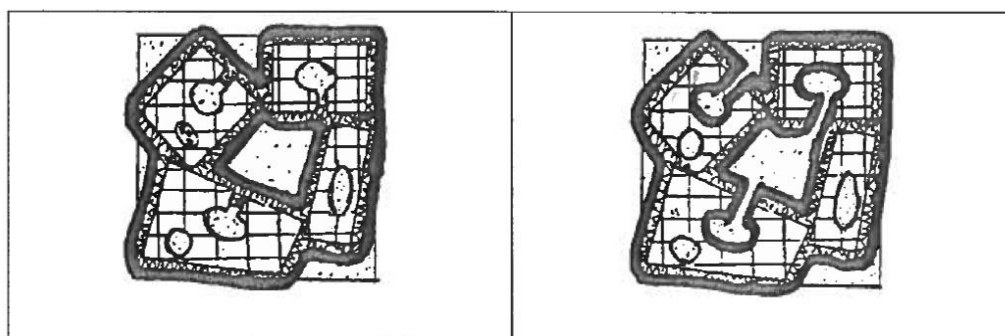


Fig. 4.32 – Vazios de agregado na mistura betuminosa com água e solvente, respetivamente (EN12697-5)

Quando se utiliza água, a camada de betume nos grãos superficiais permanece intacta, os vazios acessíveis no agregado permanecem fechados à água. Os vazios acessíveis são integrados no volume do agregado. Tecnicamente, isto é preferível, uma vez que deste ponto de vista apenas os vazios entre grãos são relevantes.

Uma das desvantagens da utilização de água reside no facto de nem todos os vazios entre os grãos revestidos serem suscetíveis de serem atingidos pela água e no facto dos vazios que poderão ocorrer por baixo da película de ligante devido a um revestimento deficiente poderem ser também incluídos como fazendo parte do volume do agregado, como demonstrado na Figura 4.33.



Fig. 4.33 – Vazios entre grãos **(a)** a serem atingidos (EN 12697-5)

Quando se utiliza solvente, a camada de betume nos grãos superficiais é removida, o solvente penetrará assim nos vazios acessíveis no agregado. O volume das partículas diminui o que corresponde a um aumento da baridade máxima teórica pelos procedimentos volumétrico e hidrostático.

A desvantagem da utilização de solvente é que os resultados do ensaio poderão ser menos precisos devido à suscetibilidade à temperatura comparativamente elevada desta mistura. Para além disso, implica a introdução de misturas perigosas.

Por todas as desvantagens na utilização de solventes, em Portugal apenas se realiza o ensaio com recurso a água destilada.

4.6. POROSIDADE, VMA E VFB DOS PROJETOS DE MISTURAS BETUMINOSAS

A porosidade (V_m) é o volume de ar retido entre as partículas de agregado e betume de uma mistura betuminosa compactada, expresso como uma percentagem do volume total da mistura.

Os vazios da mistura de agregados (VMA) correspondem ao volume dos vazios intergranulares entre as partículas de agregados de uma mistura betuminosa compactada, que inclui a porosidade e o volume de betume efetivo da mistura, expresso como uma percentagem do volume total da mistura. Por sua vez, os vazios preenchidos com betume (VFB) dizem respeito à percentagem de vazios na mistura de agregados, preenchidos com betume.

A norma EN 12697-8 define o procedimento de cálculo destas propriedades volumétricas características de uma mistura betuminosa compactada. Estas características volumétricas podem ser usadas como parâmetros para avaliar a mistura após a colocação e compactação na estrada.

4.6.1. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE (V_m)

A porosidade deve ser calculada arredondada a 0,1 %, de acordo com a seguinte expressão:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} (\times 100\%) \quad (4.11)$$

em que,

V_m – porosidade da mistura com uma precisão de 0,1 %.

ρ_m - baridade máxima teórica da mistura betuminosa, em kg/m³;

ρ_b – baridade do provete, em kg/m³.

4.6.2. DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM DE VAZIOS NA MISTURA DE AGREGADOS (VMA) E PERCENTAGEM DE VAZIOS PREENCHIDOS COM BETUME (VFB)

A percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume deve ser calculada arredondada a 0,1 %:

$$VFB = \frac{\frac{B \times \rho_b}{VMA}}{\rho_B} (\times 100\%) \quad (4.12)$$

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} (\%) \quad (4.13)$$

em que,

VFB – percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume arredondado a 0,1 %;

B – percentagem de betume do provete (em 100 % da mistura) arredondado a 0,1 %;

ρ_B – densidade do betume, em kg/m^3 ;

ρ_b – baridade do provete, em kg/m^3 ;

VMA – percentagem de vazios na mistura de agregados, arredondado a 0,1 %.

Os quadros com os resultados dos cálculos da Porosidade, VMA e VFB para as sete misturas betuminosas ensaiadas encontram-se nos Anexos na alínea A.5.

4.6.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Segundo a norma EN 13108-20, na fórmula de cálculo da porosidade, VMA e VFB de uma mistura betuminosa deve recorrer-se à baridade máxima teórica calculada pelo procedimento A e à baridade calculada pelo procedimento B. No entanto, o principal objetivo neste trabalho passa por calcular as propriedades volumétricas utilizando todos os procedimentos para ser possível fazer uma análise dos vários resultados.

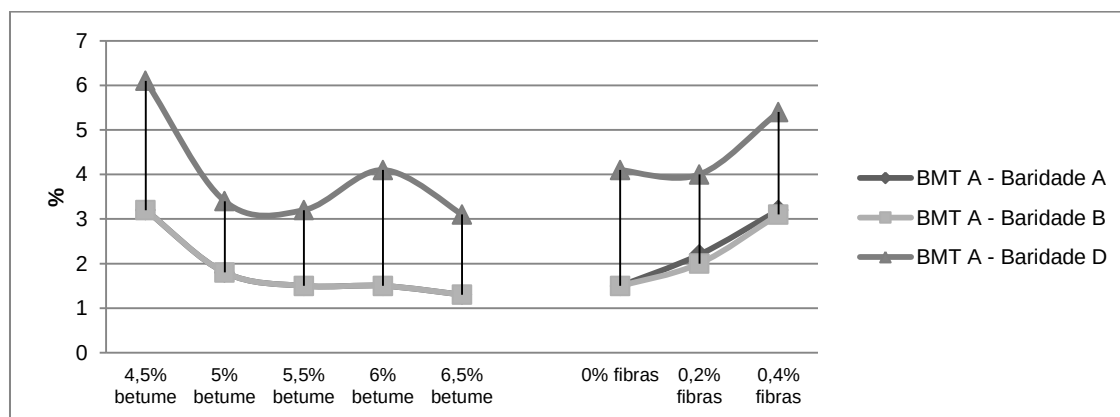


Fig. 4.34 – Porosidade das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento A e a Baridade pelos procedimentos A, B e D

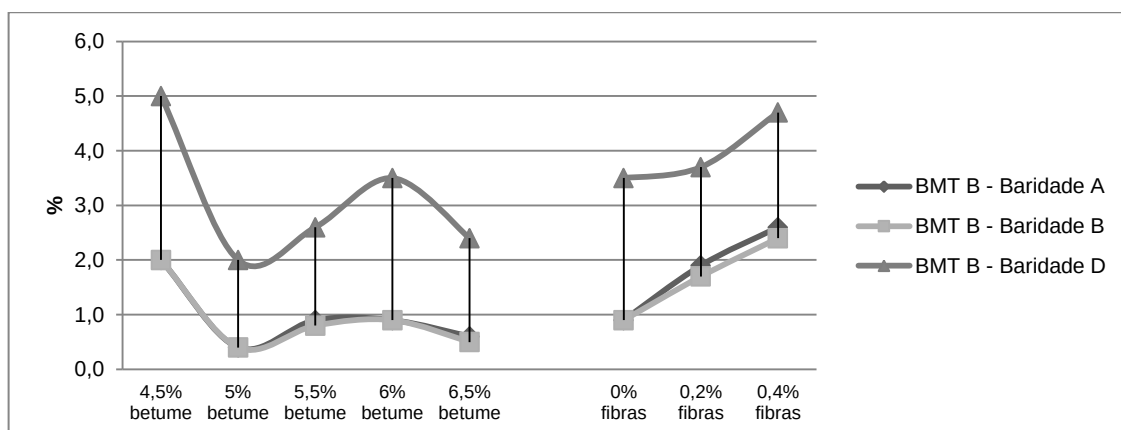


Fig. 4.35 – Porosidade das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento B e a Baridade pelos procedimentos A, B e D

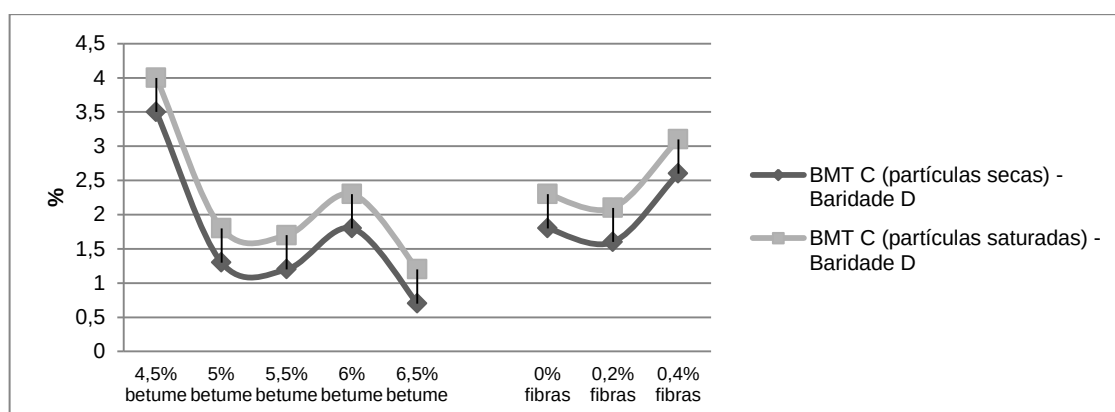


Fig. 4.36 – Porosidade das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento C (partículas secas e saturadas) e a Baridade pelo procedimento D

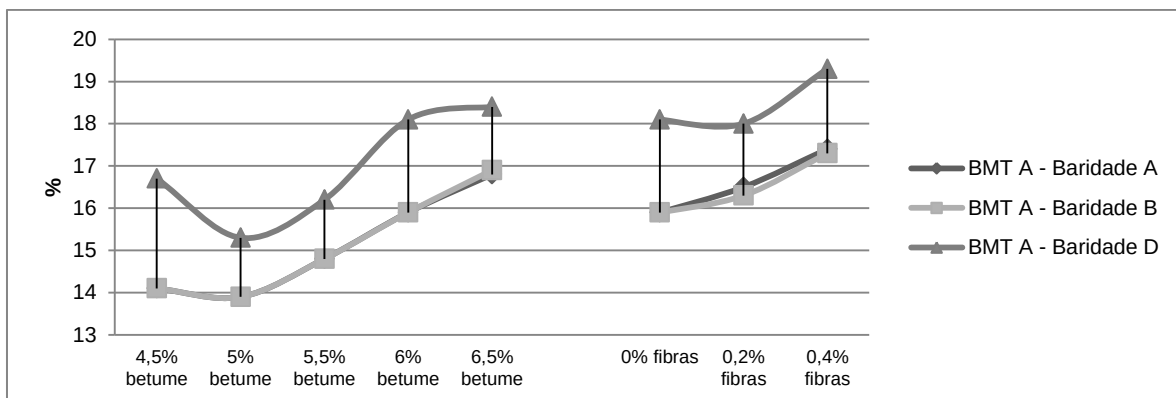


Fig. 4.37 – VMA das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento A e a Baridade pelos procedimentos A, B e D

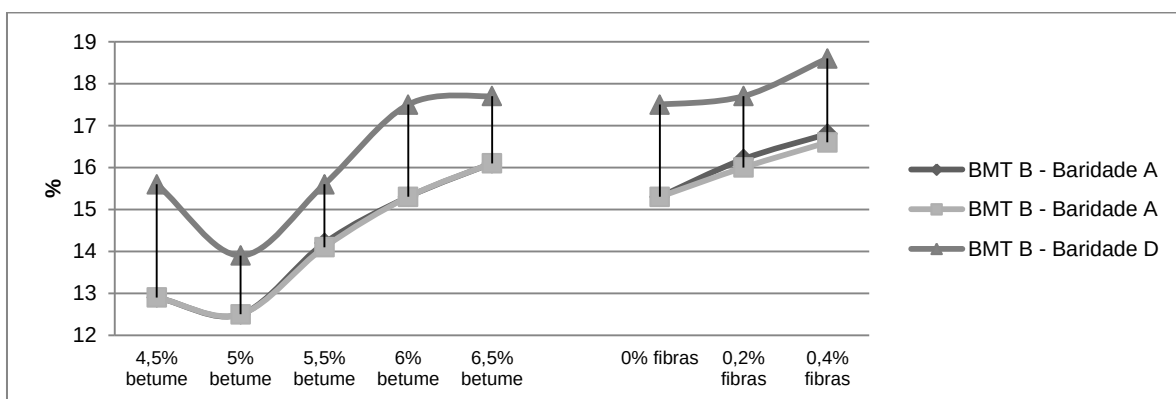


Fig. 4.38 – VMA das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento B e a Baridade pelos procedimentos A, B e D

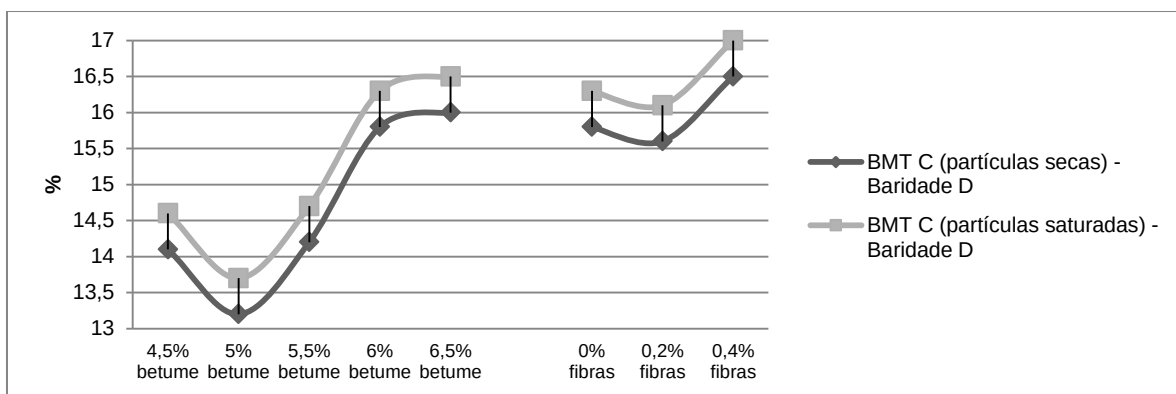


Fig. 4.39 – VMA das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento C (partículas secas e saturadas) e a Baridade pelo procedimento D

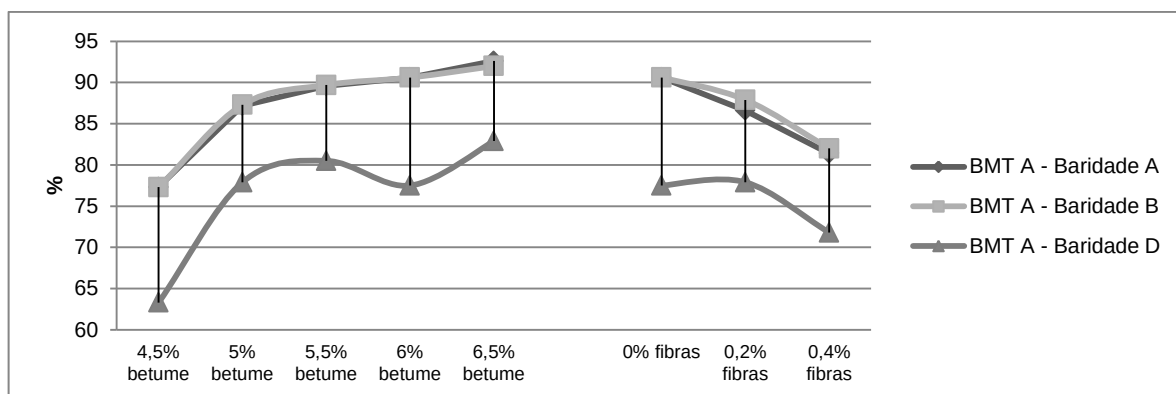


Fig. 4.40 – VFB das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento A e a Baridade pelos procedimentos A, B e D

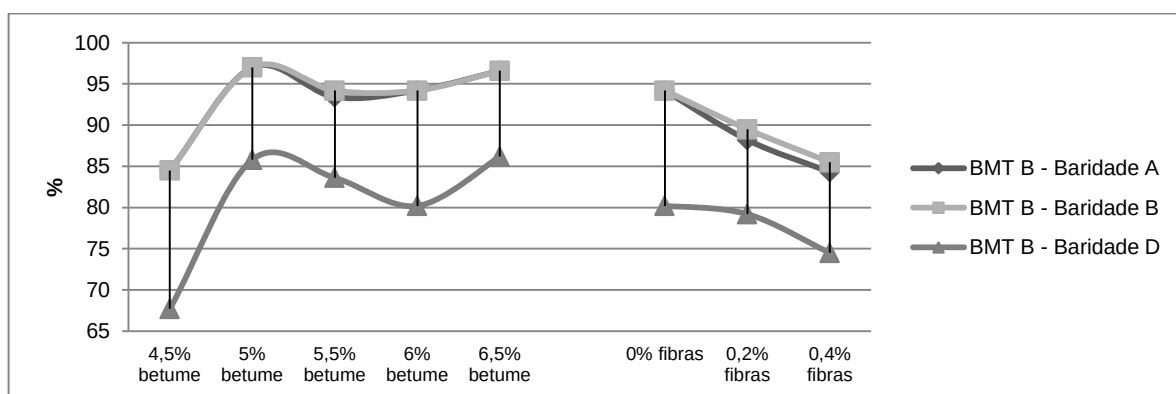


Fig. 4.41 – VFB das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento B e a Baridade pelos procedimentos A, B e D

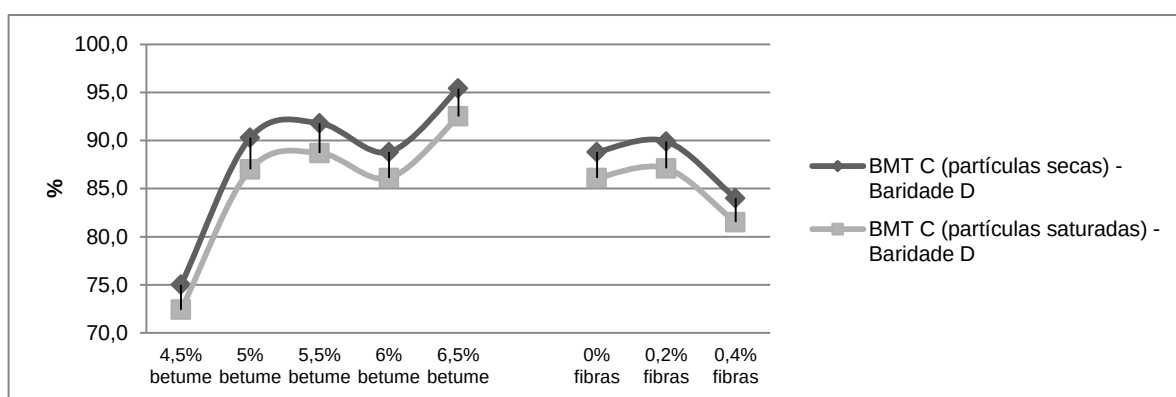


Fig. 4.42 – VFB das misturas betuminosas quando se varia a percentagem de betume mantendo nula a percentagem de fibras e quando se mantém o betume em 6 % fazendo variar as fibras, utilizando a BMT pelo procedimento C (partículas secas e saturadas) e a Baridade pelo procedimento D

Numa primeira observação da evolução das curvas dos gráficos, verifica-se que os procedimentos C (baridade máxima teórica) e D (baridade) não são apropriados para o estudo das propriedades volumétricas em análise. Estes procedimentos não devem ser utilizados em misturas de baixa porosidade como as analisadas neste estudo.

Quando se fala de porosidade de uma mistura betuminosa está a falar-se do volume formado por o conjunto de vazios num provete compactado de misturas betuminosas, expresso como uma percentagem do volume total desse provete.

Observando os gráficos das Figuras 4.34, 4.35 e 4.36, constata-se que, para as misturas com 4,5 % de betume regista-se o valor da porosidade mais elevado e quando se aumentam as percentagens de fibras a porosidade aumenta. Tais acontecimentos devem-se ao facto de a compactação ficar mais difícil devido à baixa percentagem de betume (que atua como lubrificante) e ao aumento de fibras (aumentam a resistência das misturas betuminosas), o que leva ao aumento das forças de atrito entre o agregado e consequente diminuição da baridade. Como a baridade máxima teórica não regista grandes oscilações com o aumento da percentagem de fibras, a porosidade aumenta. O volume do provete será, assim, maior e consequentemente o volume formado pelo conjunto de vazios também.

Com o aumento da percentagem de betume, a compactação decorre segundo o esperado (o aumento do betume corresponde a uma redução do atrito interno entre os agregados) e a porosidade vem para valores mais baixos e tende a estabilizar.

Os vazios da mistura de agregados (VMA) definem-se como o volume dos vazios intergranulares entre as partículas de agregados de uma mistura betuminosa compactada, que inclui a porosidade e o volume de betume do provete, expresso como uma percentagem do volume total do provete.

Analisando os gráficos das Figuras 4.37, 4.38 e 4.39, conclui-se que a evolução do VMA, quando se aumenta a percentagem de betume e de fibras, é em tudo semelhante à evolução da porosidade mas com um acréscimo. Enquanto, quando se aumenta a percentagem de betume, a porosidade evolui para uma estabilização no seu valor, o VMA regista um forte aumento. Este aumento fica a dever-se ao facto de para o cálculo do VMA entrar como variável, além da porosidade, o volume de betume do provete. Se se aumenta o volume de betume, aumenta-se o VMA.

De registar uma exceção, que é uma diminuição do VMA quando se aumenta a percentagem de betume de 4,5 % para 5 %. Esta diminuição é consequência de uma redução abrupta do volume de vazios quando se faz variar o betume nestas percentagens, idêntico ao que se passa nos gráficos iniciais devido à dificuldade de compactação.

Por sua vez, os vazios preenchidos com betume (VFB) dizem respeito à percentagem de vazios na mistura de agregados, preenchidos com betume. Os gráficos das figuras 4.40, 4.41 e 4.42 demonstram que com o aumento da percentagem de betume, a percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume também aumenta.

A maior subida regista-se quando se passa de 4,5 % para 5 % de betume. Isto deve-se ao facto de haver uma grande redução do volume de vazios quando se varia o betume dos 4,5 % para 5 %. As misturas com 4,5 % de betume são muito mais porosas, logo a percentagem de vazios preenchidos com betume é muito baixa. As misturas com 5 % de betume apresentam na sua composição volumétrica menos percentagem de vazios por isso será muito maior a percentagem destes preenchidos com betume.

5

CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo principal estabelecer as principais diferenças nas propriedades volumétricas das misturas betuminosas ensaiadas experimentalmente em laboratório. A concepção de uma mistura betuminosa e o estudo das suas propriedades estão moldadas ao que é imposto pela legislação das Normas Europeias, de modo a que as exigências de desempenho, tanto funcionais como estruturais, dos pavimentos sejam materializadas.

Na validação dos resultados, conclui-se que as fortes diferenças no comportamento das misturas quando a percentagem de betume reduz de 5 % para 4,5 % suscita um peculiar interesse em estudar até que ponto as misturas se comportariam com 4 % de betume. As acentuadas dificuldades criadas na compactação dos provetes com 4,5 % de betume devido às elevadas forças de atrito interno entre as partículas de agregado, refletem um comportamento desaconselhável da mistura betuminosa para estes valores de percentagem de betume.

Analisando a porosidade das misturas betuminosas sem fibras como impõe a norma EN 13108-20, entra na fórmula de cálculo a baridade máxima teórica calculada pelo procedimento A e a baridade calculada pelo procedimento B. O resultado conduz ao gráfico da Figura 5.1.

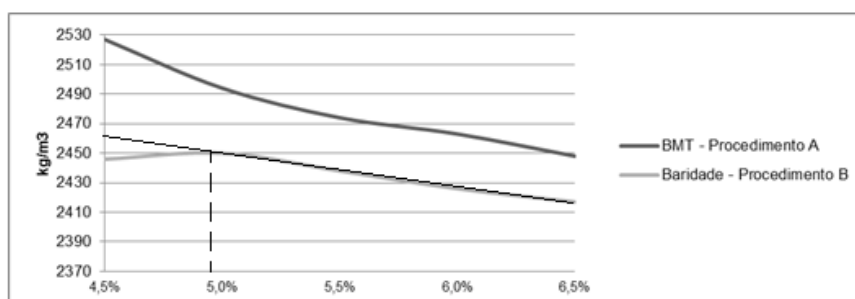


Fig. 5.1 – Valor mínimo para a percentagem de betume

As misturas betuminosas ensaiadas são do tipo SMA 16 bin 35/50. Segundo a norma EN13108-5, o valor mínimo recomendado para a percentagem de betume neste tipo de misturas é 4,8 % do seu volume total. O comportamento da curva da baridade para as misturas laboratorialmente experimentadas focaliza a percentagem mínima indicativa de betume para um valor a rondar os 4,9 %. Este valor está em conformidade com o pressuposto pela norma. Estes fatores refletem a conclusão de

que as forças de atrito são muito elevadas e só é possível uma boa compactação para valores de percentagem de betume superior a 5%.

Para a materialização de uma mistura com fibras deverá ter-se atenção ao acréscimo adicional das forças de atrito interno entre as partículas de agregado, os quais deverão ser compensados com o aumento da percentagem de betume (atua como lubrificante no processo de compactação) de forma e evitar volumes de vazios indesejáveis e consequentes danos permanentes nos pavimentos. O consequente aumento do valor mínimo da percentagem de betume suscitou um peculiar interesse em fazer uma análise similar à do gráfico 5.1 mas, neste caso, para as misturas com 0,2 % e 0,4 % de fibras, de modo a poder quantifica-lo e avaliar em que medida aumenta. Infelizmente, o período de tempo destinado a esta dissertação pecou por ser escasso para a execução e estudo de mais estas misturas em laboratório.

Se por um lado as Normas Europeias estipulam as percentagens mínimas de betume a utilizar nas misturas betuminosas, por outro não definem qualquer ensaio para as determinar. A objetividade de uma análise como a do gráfico 5.1 poderá ser extrapolada para o fim de complementar as normas nesse aspeto.

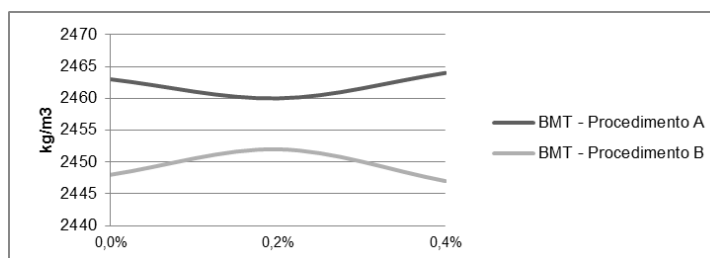


Fig. 5.2 – BMT pelos procedimentos A e B com o aumento de fibras

Para os ensaios de BMT realizados nas diferentes misturas betuminosas verificou-se que o procedimento B conduz sistematicamente a valores inferiores aos obtidos no procedimento A, exemplo das misturas com fibras na figura 5.2.

Conclui-se, ainda, que a introdução de fibras conduz a uma significativa redução da baridade, mantendo inalterável a BMT, e que os procedimentos C e D não devem ser utilizados em misturas de baixa porosidade como as analisadas neste estudo.

Aconselha-se assim, de forma a complementar o estudo realizado, a realização de estudos relativos à análise da percentagem mínima de betume e interação do betume com as fibras em dissertações futuras.

BIBLIOGRAFIA

- Estradas de Portugal. *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários*. EP, Portugal.
- European Asphalt Pavement Association (2001). *Asphalt in Figures*. EAPA, Holanda.
- European Asphalt Pavement Association (1998). *Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA*. EAPA, Holanda.
- Horst, Erdlen (2000). *Stone Mastic Asphalt – Pavement Technology*. Anais do XV Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2005). *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários*. LNEC, Portugal.
- National Asphalt Pavement Association (2002). *Design and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice*. NAPA, EUA.
- Neves, J.M.C. *Apontamentos da Unidade Curricular de Construção e Manutenção de Infraestruturas de Transportes*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Neves, J.M.C. *Projeto de Pavimentação Rodoviária*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Ribeiro, Jaime Queirós. *Apontamentos da Unidade Curricular de Obras Rodoviárias*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Ribeiro, Jaime Queirós. *Apontamentos da Unidade Curricular de Pavimentos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.; Ray, D.; Kennedy, T.W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. NAPA Research and Education Foundation, USA.
- Vale, C.; Melo, A.S. (2006). *Análise dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Os Modelos Materiais das Misturas Betuminosas*. V Jornadas Luso-Brasileiras, Recife, Brasil.
- EN 12697-5 (2009), Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – *Part 5: Determination of the maximum density*.
- EN 12697-6 (2003) + A1 (2007), Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – *Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*.
- EN 12697-8 (2003), Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – *Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*.
- EN 12697-35 (2004) + A1 (2007), Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – *Part 35: Laboratory mixing*.
- EN 13108-5 (2006), Bituminous mixtures – Material specifications – *Part 5: Stone Mastic Asphalt*.
- EN 13108-20 (2008), Bituminous mixtures – Material specifications – *Part 20: Type Testing*.
- EN 1097-6 (2003) + A1 (2010), Bituminous mixtures – Tests for mechanical and physical properties of aggregates – *Part 6: Determination of particle density and water absorption*.

<http://www.eapa.org>, abril de 2011

<http://www.hotmix.org>, abril de 2011

<http://www.engenhariacivil.com>, abril de 2011

<http://www.inir.pt>, abril de 2011

<http://www.ipq.pt>, abril de 2011

ANEXOS

A.1 – COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS ENSAIADAS

A.2 – BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA

A.3 – DIMENSÕES MÉDIAS DOS PROJETES

A.4 – BARIDADE

A.5 – POROSIDADE, VMA E VFB

A.1 – COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS ENSAIADAS

Quadro A.1 – Mistura com 4,5% de betume e 0% de fibras

Material	Percentagem na mistura, %	Massa, g
Brita 12/16	11,46	687,6
Brita 4/12	52,53	3151,5
Pó 0/4	25,79	1547,1
Filer	5,73	343,8
Fibras	0,00	0,0
Betume	4,50	270,0
Soma	100	6000

Quadro A.2 – Mistura com 5% de betume e 0% de fibras

Material	Percentagem na mistura, %	Massa, g
Brita 12/16	11,40	684,0
Brita 4/12	52,25	3135,0
Pó 0/4	25,65	1539,0
Filer	5,70	342,0
Fibras	0,00	0,0
Betume	5,00	300,0
Soma	100	6000

Quadro A.3 – Mistura com 5,5% de betume e 0% de fibras

Material	Percentagem na mistura, %	Massa, g
Brita 12/16	11,34	680,4
Brita 4/12	51,98	3118,5
Pó 0/4	25,52	1530,9
Filer	5,67	340,2
Fibras	0,00	0,0
Betume	5,50	330,0
Soma	100	6000

Quadro A.4 – Mistura com 6% de betume e 0% de fibras

Material	Percentagem na mistura, %	Massa, g
Brita 12/16	11,28	676,8
Brita 4/12	51,70	3102
Pó 0/4	25,38	1522,8
Filer	5,64	338,4
Fibras	0,00	0,0
Betume	6,00	360,0
Soma	100	6000

Quadro A.5 – Mistura com 6% de betume e 0,2% de fibras

Material	Percentagem na mistura, %	Massa, g
Brita 12/16	11,26	675,4
Brita 4/12	51,59	3095,4
Pó 0/4	25,33	1519,7
Filer	5,63	337,7
Fibras	0,20	12,0
Betume	6,00	360,0
Soma	100	6000

Quadro A.6 – Mistura com 6% de betume e 0,4% de fibras

Material	Percentagem na mistura, %	Massa, g
Brita 12/16	11,23	673,9
Brita 4/12	51,48	3088,8
Pó 0/4	25,27	1516,3
Filer	5,62	337,0
Fibras	0,40	24,0
Betume	6,00	360,0
Soma	100	6000

Quadro A.7 – Mistura com 6,5% de betume e 0% de fibras

Material	Percentagem na mistura, %	Massa, g
Brita 12/16	11,22	673,2
Brita 4/12	51,43	3085,5
Pó 0/4	25,25	1514,7
Filer	5,60	336,6
Fibras	0,00	0,0
Betume	6,50	390,0
Soma	100	6000

A.2 – BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA

Quadro A.8 – Baridade máxima teórica das misturas, pelo procedimento A

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
m_1 , g	3045	3045	3045	3045	3045	3045	3045
m_2 , g	4141	4117	4156	5022	4239	4205	4065
m_3 , g	8108	8088	8108	8621	8155	8135	8049
V_p , m ³	0,0044123	0,0044123	0,0044158	0,0044123	0,0044127	0,0044123	0,0044123
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	996,3	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{mv}, kg/m³	2527	2494	2474	2463	2460	2464	2448

Quadro A.9 – Baridade máxima teórica das misturas, pelo procedimento B

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
m_1 , g	3045	3045	3045	3045	3045	3045	3045
m_2 , g	1920,6	1920,6	1920,6	1920,6	1920,6	1920,6	1920,6
m_3 , g	4141	4117	4156	5023	4239	4205	4065
m_4 , g	2579	2558	2581	3093	2629	2608	2522
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	997,1	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{mh}, kg/m³	2497	2459	2458	2448	2452	2447	2430

Quadro A.10 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 4,5% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C

Material	Percentagem na mistura, %	Baridade (partículas secas em estufa), kg/m ³	$\rho_{mc,rd}$, kg/m ³	Baridade (partículas saturadas com superfície seca), kg/m ³	$\rho_{mc,ssd}$, kg/m ³
Brita 12/16	11,46	2670	2458	2690	2472
Brita 4/12	52,53	2640		2660	
Pó 0/4	25,79	2620		2630	
Filer	5,73	2620		2620	
Fibras	0,00	1170		1170	
Betume	4,50	1010		1010	

Quadro A.11 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 5% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C

Material	Percentagem na mistura, %	Baridade (partículas secas em estufa), kg/m ³	$\rho_{mc,rd}$, kg/m ³	Baridade (partículas saturadas com superfície seca), kg/m ³	$\rho_{mc,ssd}$, kg/m ³
Brita 12/16	11,40	2670	2440	2690	2453
Brita 4/12	52,25	2640		2660	
Pó 0/4	25,65	2620		2630	
Filer	5,70	2620		2620	
Fibras	0,00	1170		1170	
Betume	5,00	1010		1010	

Quadro A.12 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 5,5% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C

Material	Percentagem na mistura, %	Baridade (partículas secas em estufa), kg/m ³	$\rho_{mc,rd}$, kg/m ³	Baridade (partículas saturadas com superfície seca), kg/m ³	$\rho_{mc,ssd}$, kg/m ³
Brita 12/16	11,34	2670	2422	2690	2435
Brita 4/12	51,98	2640		2660	
Pó 0/4	25,52	2620		2630	
Filer	5,67	2620		2620	
Fibras	0,00	1170		1170	
Betume	5,50	1010		1010	

Quadro A.13 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 6% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C

Material	Percentagem na mistura, %	Baridade (partículas secas em estufa), kg/m ³	$\rho_{mc,rd}$, kg/m ³	Baridade (partículas saturadas com superfície seca), kg/m ³	$\rho_{mc,ssd}$, kg/m ³
Brita 12/16	11,28	2670	2405	2690	2417
Brita 4/12	51,70	2640		2660	
Pó 0/4	25,38	2620		2630	
Filer	5,64	2620		2620	
Fibras	0,00	1170		1170	
Betume	6,00	1010		1010	

Quadro A.14 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 6% de betume e 0,2% de fibras, pelo procedimento C

Material	Percentagem na mistura, %	Baridade (partículas secas em estufa), kg/m ³	$\rho_{mc,rd}$, kg/m ³	Baridade (partículas saturadas com superfície seca), kg/m ³	$\rho_{mc,ssd}$, kg/m ³
Brita 12/16	11,26	2670	2399	2690	2411
Brita 4/12	51,59	2640		2660	
Pó 0/4	25,33	2620		2630	
Filer	5,63	2620		2620	
Fibras	0,20	1170		1170	
Betume	6,00	1010		1010	

Quadro A.15 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 6% de betume e 0,4% de fibras, pelo procedimento C

Material	Percentagem na mistura, %	Baridade (partículas secas em estufa), kg/m ³	$\rho_{mc,rd}$, kg/m ³	Baridade (partículas saturadas com superfície seca), kg/m ³	$\rho_{mc,ssd}$, kg/m ³
Brita 12/16	11,23	2670	2394	2690	2406
Brita 4/12	51,48	2640		2660	
Pó 0/4	25,27	2620		2630	
Filer	5,62	2620		2620	
Fibras	0,40	1170		1170	
Betume	6,00	1010		1010	

Quadro A.16 – Baridade Máxima Teórica da mistura com 6,5% de betume e 0% de fibras, pelo procedimento C

Material	Percentagem na mistura, %	Baridade (partículas secas em estufa), kg/m ³	ρ_{mc,rd_3} kg/m ³	Baridade (partículas saturadas com superfície seca), kg/m ³	ρ_{mc,ssd_3} kg/m ³
Brita 12/16	11,22	2670	2387	2690	2399
Brita 4/12	51,43	2640		2660	
Pó 0/4	25,25	2620		2630	
Filer	5,60	2620		2620	
Fibras	0,00	1170		1170	
Betume	6,50	1010		1010	

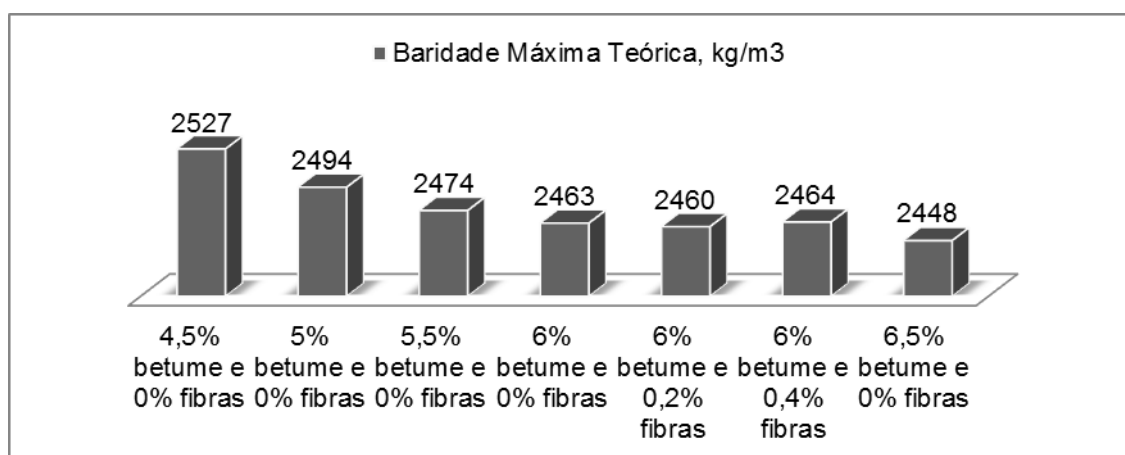


Fig. A.1 – Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas, pelo procedimento A

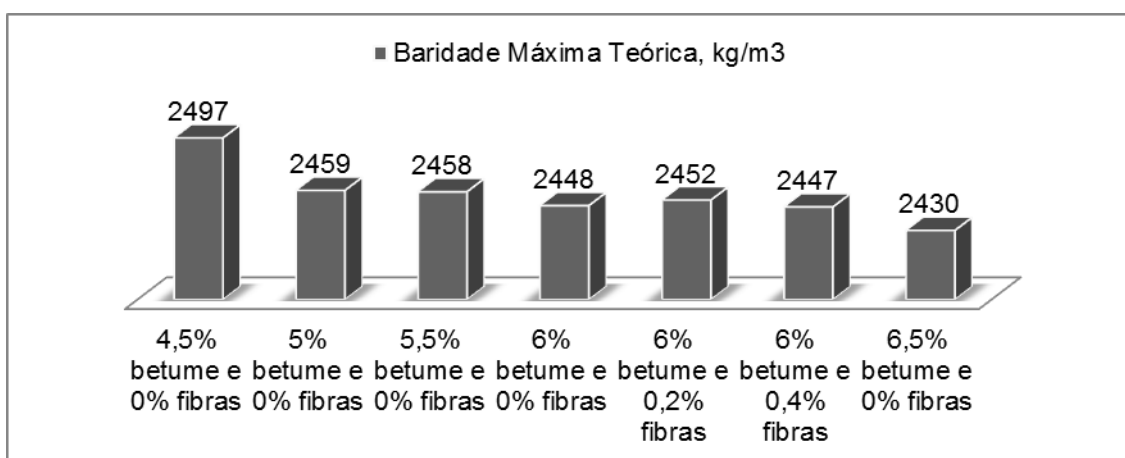


Fig. A.2 – Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas, pelo procedimento B

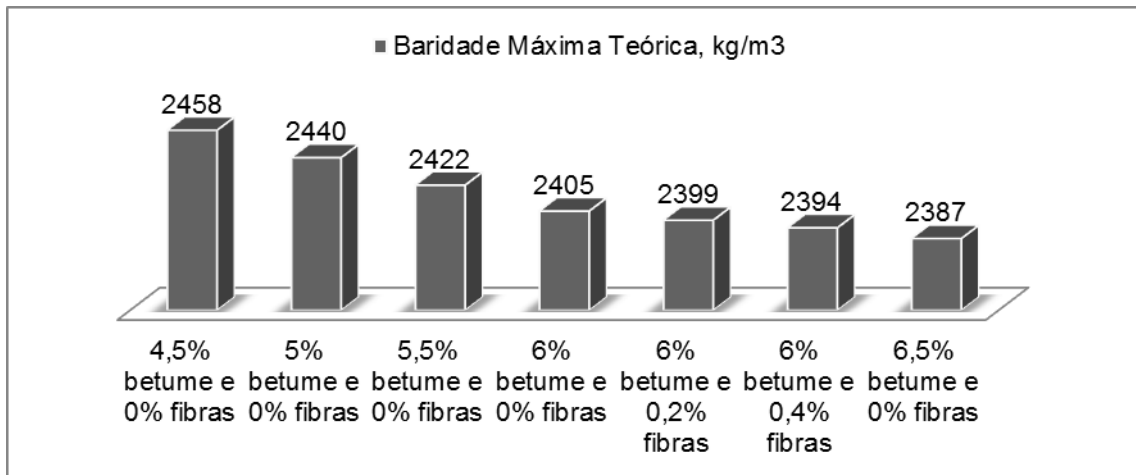


Fig. A.3 – Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas, pelo procedimento C (partículas secas em estufa)

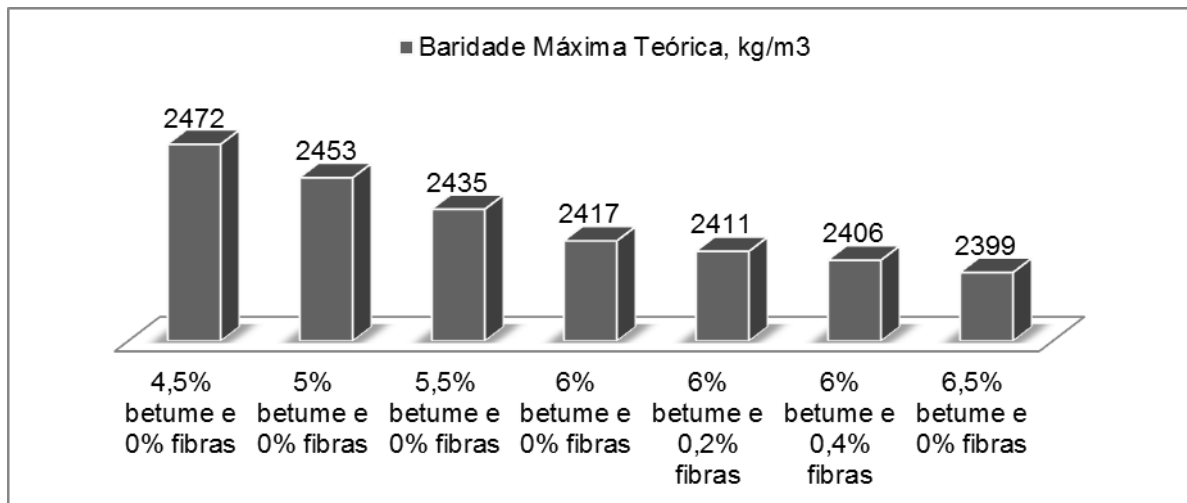


Fig. A.4 – Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas, pelo procedimento C (partículas saturadas com superfície seca)

A.3 – DIMENSÕES MÉDIAS DOS PROJETES

Quadro A.17 – Dimensões médias dos provetes com 4,5% de betume e 0% de fibras

	Provetes			
	1	2	3	4
h – Altura, mm	62,0	63,0	62,4	62,8
d – Diâmetro, mm	101,6	101,7	101,7	101,6

Quadro A.18 – Dimensões médias dos provetes com 5% de betume e 0% de fibras

	Provetes			
	1	2	3	4
h – Altura, mm	61,5	61,4	61,5	61,1
d – Diâmetro, mm	101,7	101,6	101,6	101,7

Quadro A.19 – Dimensões médias dos provetes com 5,5% de betume e 0% de fibras

	Provetes			
	1	2	3	4
h – Altura, mm	61,9	61,9	61,9	61,6
d – Diâmetro, mm	101,7	101,8	101,7	101,6

Quadro A.20 – Dimensões médias dos provetes com 6% de betume e 0% de fibras

	Provetes			
	1	2	3	4
h – Altura, mm	62,5	62,2	63,0	62,9
d – Diâmetro, mm	101,6	101,6	101,7	101,7

Quadro A.21 – Dimensões médias dos provetes com 6% de betume e 0,2% de fibras

	Provetes			
	1	2	3	4
h – Altura, mm	62,7	62,6	62,7	62,2
d – Diâmetro, mm	101,7	101,7	101,7	101,7

Quadro A.22 – Dimensões médias dos provetes com 6% de betume e 0,4% de fibras

	Provetes			
	1	2	3	4
h – Altura, mm	64,0	63,3	63,0	62,9
d – Diâmetro, mm	101,7	101,7	101,7	101,7

Quadro A.23 – Dimensões médias dos provetes com 6,5% de betume e 0% de fibras

	Provetes			
	1	2	3	4
h – Altura, mm	61,7	61,6	61,8	62,2
d – Diâmetro, mm	101,7	101,7	101,7	101,7

A.4 – BARIDADE

Quadro A.24 – Baridade das misturas com 4,5% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D

	Provetes			
	1	2	3	4
m_1 , g	1201,9	1205,2	1203,8	1203,9
m_{2i} , g	712,8	712,3	714,1	713,3
m_2 , g	714,1	713,8	714,8	714,8
m_3 , g	1202,7	1207,3	1205,2	1205,3
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{bdry} , kg/m ³	2450	2438	2451	2447
ρ_{bdry} , kg/m ³ (valor médio)	2447			
ρ_{bssd} , kg/m ³	2453	2435	2448	2447
ρ_{bssd} , kg/m ³ (valor médio)	2446			
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³	2391	2355	2375	2365
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³ (valor médio)	2372			

Quadro A.25 – Baridade das misturas com 5% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D

	Provetes			
	1	2	3	4
m_1 , g	1200,7	1201,8	1199,3	1198,1
m_{2i} , g	710,9	713	710,2	711,2
m_2 , g	712,0	713,8	711,2	712,2
m_3 , g	1201,0	1202,4	1199,9	1198,6
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{bdry} , kg/m ³	2444	2452	2445	2454
ρ_{bdry} , kg/m ³ (valor médio)	2449			
ρ_{bssd} , kg/m ³	2448	2453	2447	2456
ρ_{bssd} , kg/m ³ (valor médio)	2451			
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³	2403	2414	2405	2414
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³ (valor médio)	2409			

Quadro A.26 – Baridade das misturas com 5,5% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D

	Provetes			
	1	2	3	4
m_1 , g	1201,2	1196,6	1206,4	1205,5
m_{2i} , g	708,3	706,8	712,5	713,3
m_2 , g	709,2	707,6	713,4	714,2
m_3 , g	1201,9	1197,2	1207,0	1205,9
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{bdry} , kg/m ³	2430	2436	2436	2442
ρ_{bdry} , kg/m ³ (valor médio)	2436			
ρ_{bssd} , kg/m ³	2431	2437	2437	2445
ρ_{bssd} , kg/m ³ (valor médio)	2438			
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³	2389	2375	2399	2414
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³ (valor médio)	2394			

Quadro A.27 – Baridade das misturas com 6% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D

	Provetes			
	1	2	3	4
m_1 , g	1202,2	1198,9	1202,3	1199,6
m_{2i} , g	706,9	706,7	709,2	705,7
m_2 , g	707,0	707,3	710,0	706,8
m_3 , g	1202,6	1199,5	1203,1	1200,3
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{bdry} , kg/m ³	2420	2429	2431	2422
ρ_{bdry} , kg/m ³ (valor médio)	2426			
ρ_{bssd} , kg/m ³	2419	2429	2432	2424
ρ_{bssd} , kg/m ³ (valor médio)	2426			
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³	2373	2377	2349	2348
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³ (valor médio)	2362			

Quadro A.28 – Baridade das misturas com 6% de betume e 0,2% de fibras, pelos procedimentos A, B e D

	Provetes			
	1	2	3	4
m_1 , g	1199,1	1199,8	1202,2	1198,7
m_{2i} , g	701,2	702,8	703,7	702,7
m_2 , g	702,5	704,1	705,2	704
m_3 , g	1199,7	1200,3	1202,7	1199,0
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{bdry} , kg/m ³	2401	2407	2405	2410
ρ_{bdry} , kg/m ³ (valor médio)	2406			
ρ_{bssd} , kg/m ³	2405	2412	2410	2415
ρ_{bssd} , kg/m ³ (valor médio)	2411			
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³	2354	2359	2360	2372
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³ (valor médio)	2361			

Quadro A.29 – Baridade das misturas com 6% de betume e 0,4% de fibras, pelos procedimentos A, B e D

	Provetes			
	1	2	3	4
m_1 , g	1199,9	1200,8	1198,1	1197,1
m_{2i} , g	697,1	698,1	696,4	697,9
m_2 , g	698,2	700,1	697,5	699,2
m_3 , g	1200,8	1201,5	1198,7	1197,7
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{bdry} , kg/m ³	2380	2382	2381	2391
ρ_{bdry} , kg/m ³ (valor médio)	2384			
ρ_{bssd} , kg/m ³	2381	2389	2384	2397
ρ_{bssd} , kg/m ³ (valor médio)	2388			
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³	2308	2335	2341	2343
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³ (valor médio)	2332			

Quadro A.30 – Baridade das misturas com 6,5% de betume e 0% de fibras, pelos procedimentos A, B e D

	Provetes			
	1	2	3	4
m_1 , g	1189,5	1185,9	1193,6	1193,7
m_{2i} , g	698,6	696,5	701,2	700,5
m_2 , g	699,2	697,2	702,0	701,1
m_3 , g	1189,8	1186,3	1194,1	1194,2
ρ_w , kg/m ³	997,1	997,1	997,1	997,1
ρ_{bdry} , kg/m ³	2416	2416	2417	2413
ρ_{bdry} , kg/m ³ (valor médio)	2416			
ρ_{bssd} , kg/m ³	2418	2418	2418	2414
ρ_{bssd} , kg/m ³ (valor médio)	2417			
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³	2373	2370	2378	2363
$\rho_{b,dim}$, kg/m ³ (valor médio)	2371			

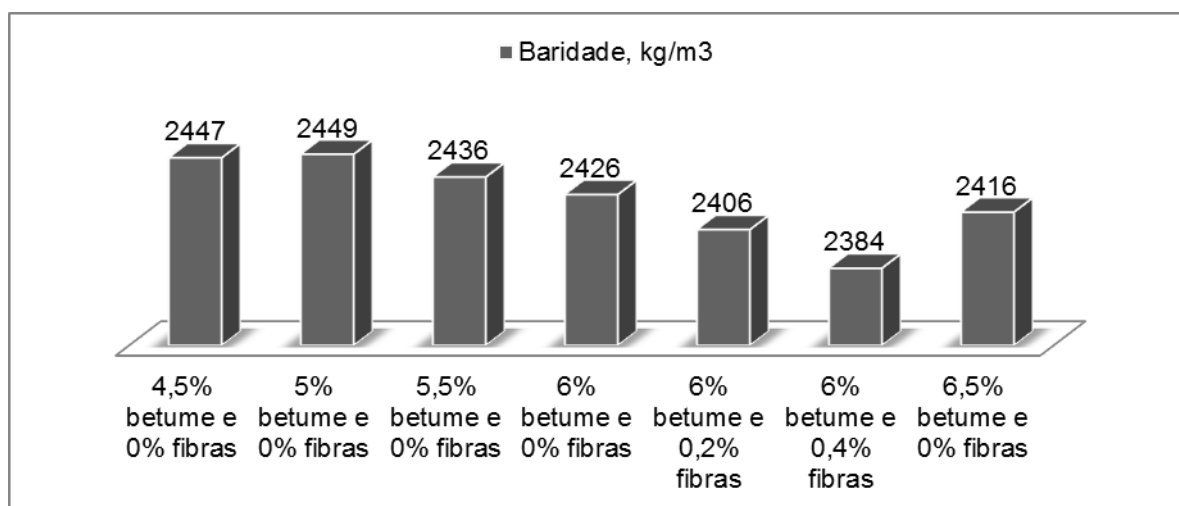


Fig. A.5 – Baridade das misturas betuminosas, pelo procedimento A

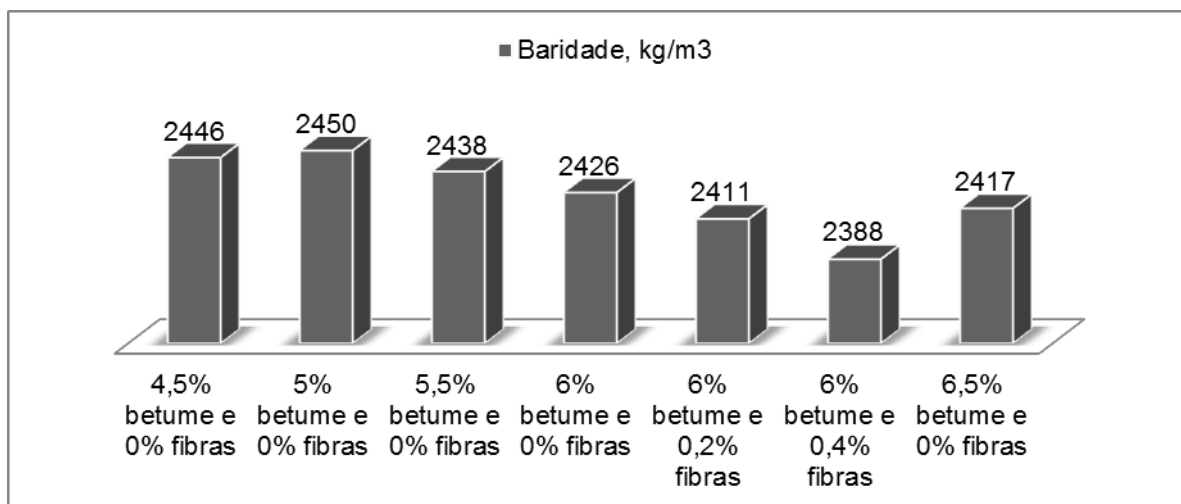


Fig. A.6 – Baridade das misturas betuminosas, pelo procedimento B

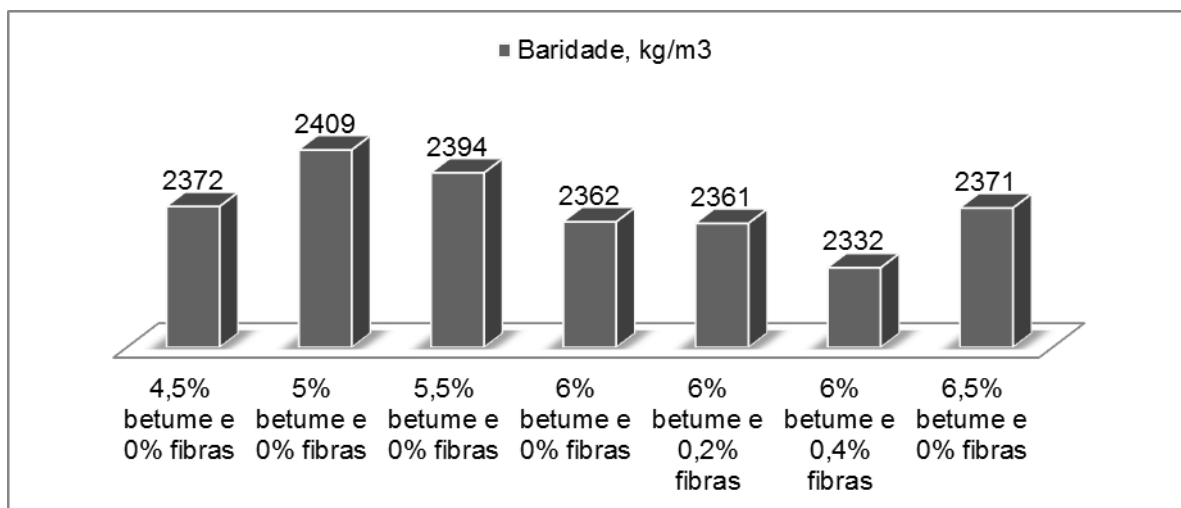


Fig. A.7 – Baridade das misturas betuminosas, pelo procedimento D

A.5 – POROSIDADE, VMA E VFB

Quadro A.31 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento A)

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mv},$ kg/m ³	2527	2494	2474	2463	2460	2464	2448
$\rho_b = \rho_{bdry},$ kg/m ³	2447	2449	2436	2426	2406	2384	2416
$V_m, \%$	3,2	1,8	1,5	1,5	2,2	3,2	1,3
$\rho_B, \text{kg/m}^3$	1010						
$VMA, \%$	14,1	13,9	14,8	15,9	16,5	17,4	16,8
$VFB, \%$	77,3	87,2	89,6	90,6	86,6	81,4	92,6

Quadro A.32 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento B)

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mv},$ kg/m ³	2527	2494	2474	2463	2460	2464	2448
$\rho_b = \rho_{bssd},$ kg/m ³	2446	2450	2438	2426	2411	2388	2417
$V_m, \%$	3,2	1,8	1,5	1,5	2,0	3,1	1,3
$\rho_B, \text{kg/m}^3$	1010						
$VMA, \%$	14,1	13,9	14,8	15,9	16,3	17,3	16,9
$VFB, \%$	77,3	87,3	89,7	90,6	87,9	82,0	92,0

Quadro A.33 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento D)

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mv}$, kg/m ³	2527	2494	2474	2463	2460	2464	2448
$\rho_b = \rho_{b,glm}$, kg/m ³	2372	2409	2394	2362	2361	2332	2371
V_m , %	6,1	3,4	3,2	4,1	4,0	5,4	3,1
ρ_B , kg/m ³	1010						
VMA , %	16,7	15,3	16,2	18,1	18,0	19,3	18,4
VFB , %	63,3	77,9	80,5	77,5	77,9	71,8	82,9

Quadro A.34 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento A)

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mh}$, kg/m ³	2497	2459	2458	2448	2452	2447	2430
$\rho_b = \rho_{bdry}$, kg/m ³	2447	2449	2436	2426	2406	2384	2416
V_m , %	2,0	0,4	0,9	0,9	1,9	2,6	0,6
ρ_B , kg/m ³	1010						
VMA , %	12,9	12,5	14,2	15,3	16,2	16,8	16,1
VFB , %	84,5	97,0	93,4	94,2	88,2	84,3	96,6

Quadro A.35 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento B)

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{m,h}$, kg/m ³	2497	2459	2458	2448	2452	2447	2430
$\rho_b = \rho_{b,ssd}$, kg/m ³	2446	2450	2438	2426	2411	2388	2417
V_m , %	2,0	0,4	0,8	0,9	1,7	2,4	0,5
ρ_B , kg/m ³	1010						
VMA , %	12,9	12,5	14,1	15,3	16,0	16,6	16,1
VFB , %	84,5	97,0	94,2	94,2	89,5	85,5	96,6

Quadro A.36 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento D)

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{m,h}$, kg/m ³	2497	2459	2458	2448	2452	2447	2430
$\rho_b = \rho_{b,dim}$, kg/m ³	2372	2409	2394	2362	2361	2332	2371
V_m , %	5,0	2,0	2,6	3,5	3,7	4,7	2,4
ρ_B , kg/m ³	1010						
VMA , %	15,6	13,9	15,6	17,5	17,7	18,6	17,7
VFB , %	67,7	85,8	83,6	80,2	79,2	74,5	86,2

Quadro A.37 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas secas) e baridade pelo procedimento A]

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mth}$, kg/m ³	2458	2440	2422	2405	2399	2394	2387
$\rho_b = \rho_{bdry}$, kg/m ³	2447	2449	2436	2426	2406	2384	2416
V_m , %	0,4	-0,4	-0,6	-0,9	-0,3	0,4	-1,2
ρ_B , kg/m ³	1010						
VMA , %	11,3	11,7	12,7	13,5	14,0	14,6	14,3
VFB , %	96,5	103,6	104,5	106,8	102,1	97,0	108,7

Quadro A.38 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas secas) e baridade pelo procedimento B]

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mth}$, kg/m ³	2458	2440	2422	2405	2399	2394	2387
$\rho_b = \rho_{bssd}$, kg/m ³	2446	2450	2438	2426	2411	2388	2417
V_m , %	0,5	-0,4	-0,7	-0,9	-0,5	0,3	-1,3
ρ_B , kg/m ³	1010						
VMA , %	11,4	11,7	12,6	13,5	13,8	14,5	14,3
VFB , %	95,6	103,7	105,4	106,8	103,8	97,8	108,8

Quadro A.39 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas secas) e baridade pelo procedimento D]

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mh}, \text{ kg/m}^3$	2458	2440	2422	2405	2399	2394	2387
$\rho_b = \rho_{b,dlm}, \text{ kg/m}^3$	2372	2409	2394	2362	2361	2332	2371
$V_m, \%$	3,5	1,3	1,2	1,8	1,6	2,6	0,7
$\rho_B, \text{ kg/m}^3$	1010						
$VMA, \%$	14,1	13,2	14,2	15,8	15,6	16,5	16,0
$VFB, \%$	75,0	90,3	91,8	88,8	89,9	84,0	95,4

Quadro A.40 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas saturadas) e baridade pelo procedimento A]

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mh}, \text{ kg/m}^3$	2472	2453	2435	2417	2411	2406	2399
$\rho_b = \rho_{bdry}, \text{ kg/m}^3$	2447	2449	2436	2426	2406	2384	2416
$V_m, \%$	1,0	0,2	0,0	-0,4	0,2	0,9	-0,7
$\rho_B, \text{ kg/m}^3$	1010						
$VMA, \%$	11,9	12,3	13,3	14,0	14,5	15,1	14,8
$VFB, \%$	91,6	98,6	99,7	102,9	98,6	93,8	105,1

Quadro A.41 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas saturadas) e baridade pelo procedimento B]

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mth}$, kg/m ³	2472	2453	2435	2417	2411	2406	2399
$\rho_b = \rho_{bssd}$, kg/m ³	2446	2450	2438	2426	2411	2388	2417
V_m , %	1,1	0,1	-0,1	-0,4	0,0	0,7	-0,8
ρ_B , kg/m ³	1010						
VMA , %	12,0	12,2	13,2	14,0	14,3	14,9	14,8
VFB , %	90,8	99,4	100,6	102,9	100,2	95,2	105,1

Quadro A.42 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas saturadas) e baridade pelo procedimento D]

	Misturas						
	4,5% de betume e 0% de fibras	5% de betume e 0% de fibras	5,5% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0% de fibras	6% de betume e 0,2% de fibras	6% de betume e 0,4% de fibras	6,5% de betume e 0% de fibras
$\rho_m = \rho_{mth}$, kg/m ³	2472	2453	2435	2417	2411	2406	2399
$\rho_b = \rho_{b,dlm}$, kg/m ³	2372	2409	2394	2362	2361	2332	2371
V_m , %	4,0	1,8	1,7	2,3	2,1	3,1	1,2
ρ_B , kg/m ³	1010						
VMA , %	14,6	13,7	14,7	16,3	16,1	17,0	16,5
VFB , %	72,4	87,0	88,7	86,1	87,1	81,5	92,5

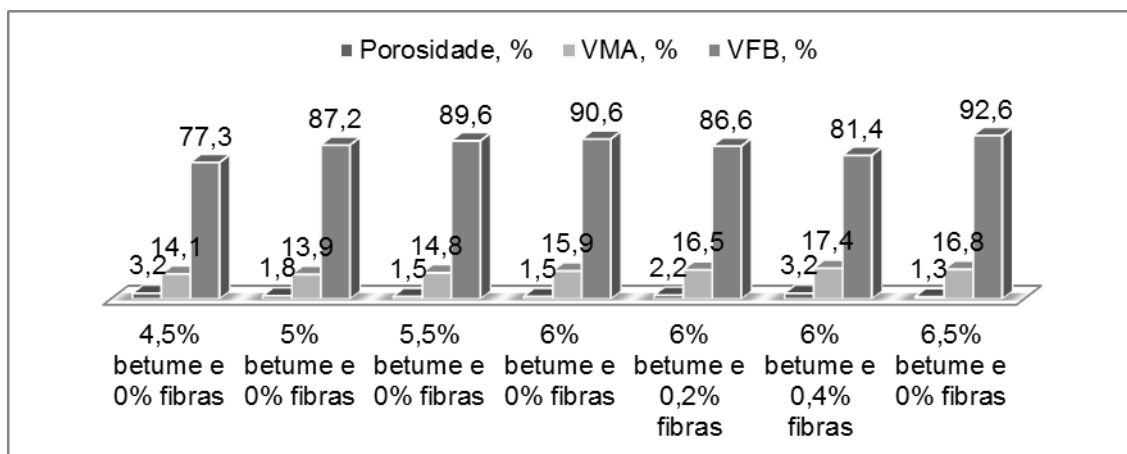


Fig. A.8 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento A)

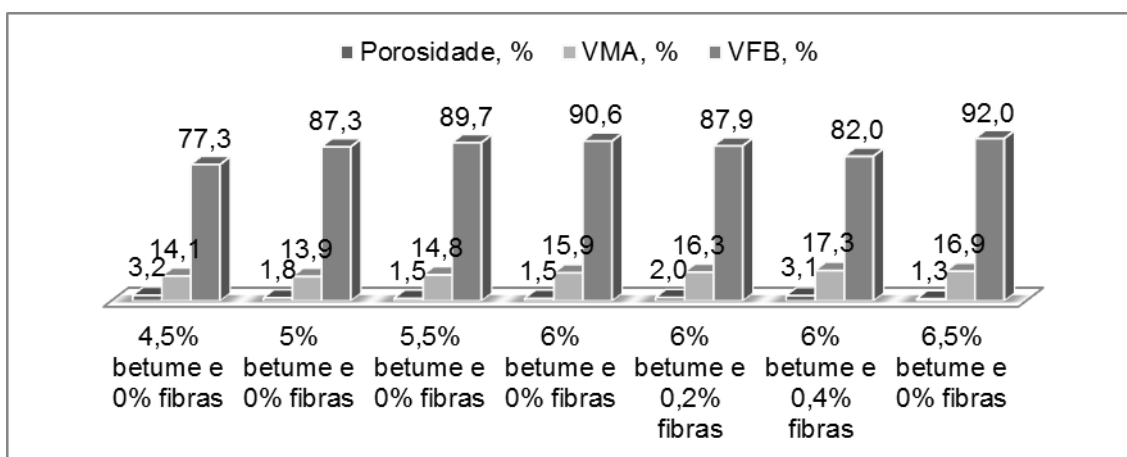


Fig. A.9 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento B)

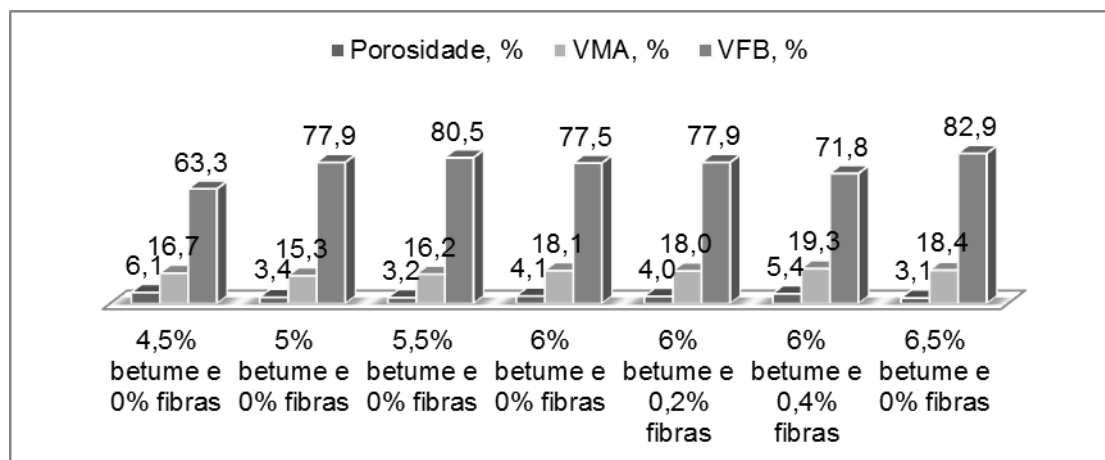


Fig. A.10 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento A e baridade pelo procedimento D)

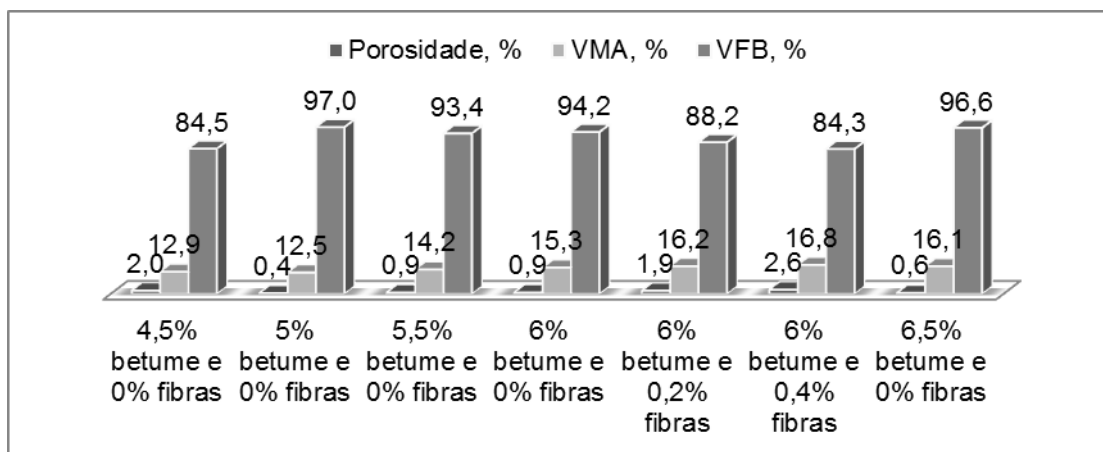


Fig. A.11 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento A)

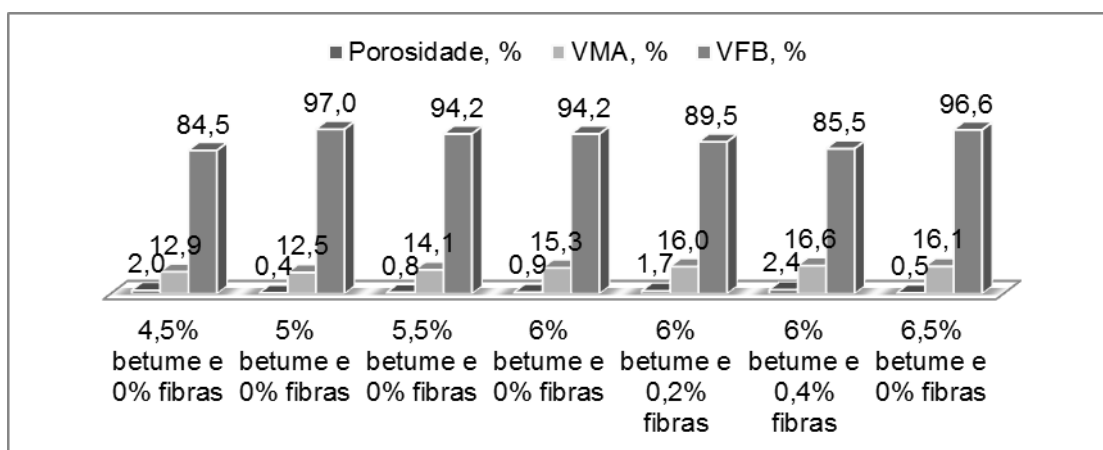


Fig. A.12 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento B)

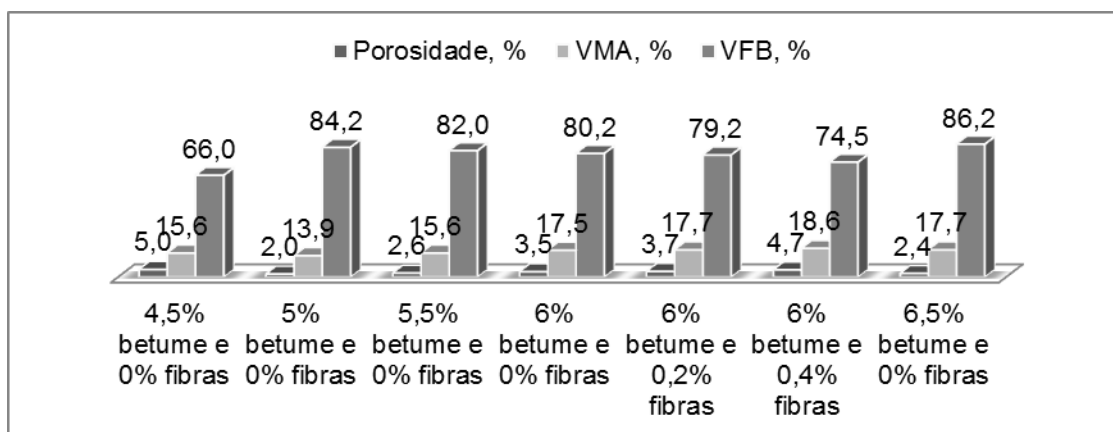


Fig. A.13 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume (BMT pelo procedimento B e baridade pelo procedimento D)

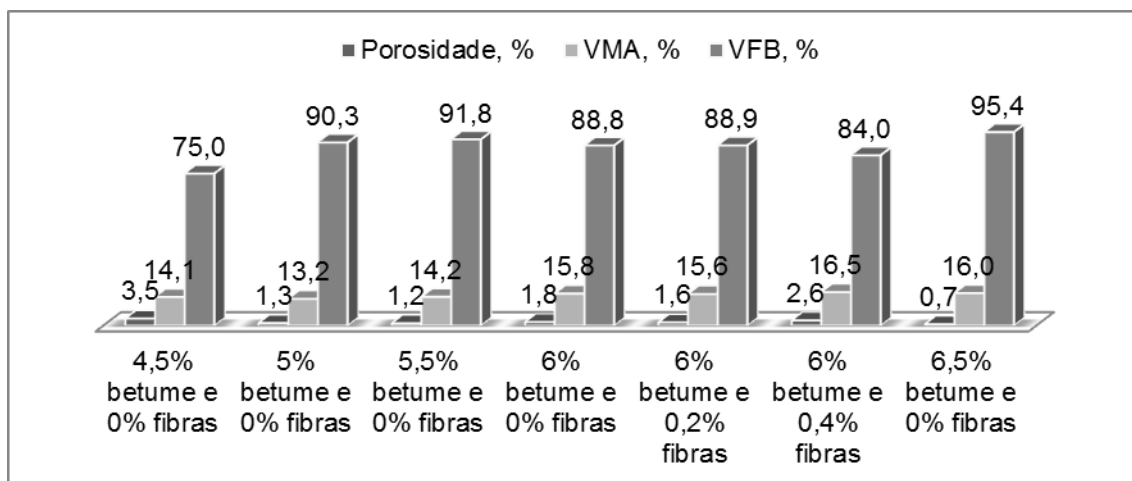


Fig. A.14 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas secas) e baridade pelo procedimento D]

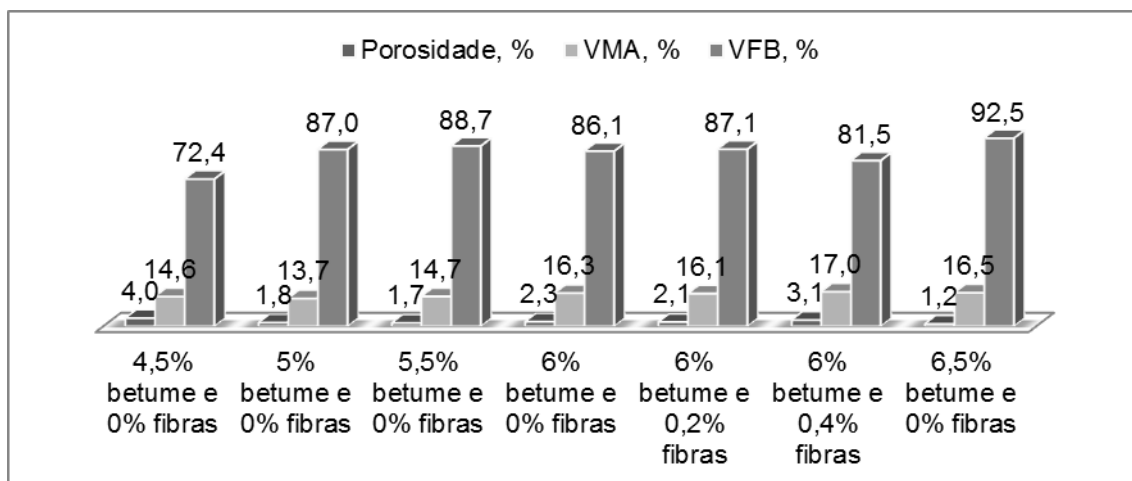


Fig. A.15 – Porosidade das misturas betuminosas, percentagem de vazios na mistura de agregados e percentagem de vazios preenchidos com betume [BMT pelo procedimento C (partículas saturadas) e baridade pelo procedimento D]

