



Misturas Betuminosas tipo SMA

ANDRÉ ALEXANDRE FERREIRA DE OLIVEIRA

novembro de 2017

MISTURAS BETUMINOSAS TIPO *SMA*
FORMULAÇÃO DE MISTURAS EM LABORATÓRIO

ANDRÉ ALEXANDRE FERREIRA DE OLIVEIRA

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE INFRAESTRUTURAS

Orientador: Professor Ângelo Manuel Gonçalves Jacob

Supervisor: Engenheira Joana Santos (CICCOPN)

OUTUBRO DE 2017

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	III
RESUMO	V
ABSTRACT.....	VI
AGRADECIMENTOS.....	VII
ÍNDICE DE TEXTO.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
ÍNDICE DE ANEXOS	XXI
GLOSSÁRIO.....	XXIII
ABREVIATURAS	XXV
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 ESTADO DA ARTE	7
CAPÍTULO 3 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DE UM SMA.....	23
CAPÍTULO 4 ENSAIOS LABORATORIAIS (METODOLOGIA EXPERIMENTAL)	51
CAPÍTULO 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	89
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXOS	117

RESUMO

A maioria dos pavimentos rodoviários e aeroportuários, têm como solução construtiva, pavimentos constituídos por misturas betuminosas a quente, pelo bom desempenho e pela sua elevada durabilidade, em condições normais de serviço. Dentro das misturas betuminosas pode-se encontrar uma vasta gama de soluções, sendo a mais corrente o uso de betumes tradicionais sem qualquer aditivo, com granulometria contínua, cujo comportamento é satisfatório. Verifica-se, no entanto, que com a solução tradicional, ao longo do seu tempo sua vida útil, o aparecimento de várias patologias que tornam o seu desempenho ineficiente sobretudo nas áreas onde as condições de tráfego são mais severas, logo, existe necessidade de encontrar soluções que minimizem estes problemas. Uma solução possível e atualmente usada para colmatar estes problemas é a execução de pavimentos com betumes modificados e com granulometria descontínua, designados por SMA.

A presente dissertação tem como objetivo avaliar o desempenho das misturas SMA (*Stone Mastic Asphalt*), ensaiando em laboratório vários tipos de mistura, com diferentes betumes e estabilizadores.

Pretendeu-se com este estudo, adequar os resultados com os requisitos prescritos pelo Caderno de Encargos das Infraestruturas de Portugal (CETO), respeitantes às misturas betuminosas a quente, submetendo todas as variações de composição da mistura aos ensaios constantes no documento supracitado.

Neste trabalho manteve-se constante a granulometria da mistura, sendo que as temperaturas de mistura e compactação foram variadas em função do tipo de betume utilizado. O estudo dos diferentes estabilizadores apenas foi realizado numa parte dos ensaios (ensaio de escorrimento segundo a norma EN 12697-18 (1)), na elaboração das misturas e na realização de ensaios tipo Marshall, (segundo a norma EN 12697-34 (2)) e ensaio de sensibilidade à água, (segundo a norma EN 12697-12 (3)), manteve-se o tipo e a percentagem em massa dos estabilizadores de drenagem.

O objetivo final deste trabalho é a determinação das percentagens ótimas de diferentes betumes para uma mistura tipo SMA8.

Palavras-chave: Misturas Betuminosas, SMA, Pavimentos, Ensaios de laboratório, Betume

ABSTRACT

Most of the road and airport pavements have, as a constructive solution, floors composed of hot bituminous mixtures, for the good performance and for their high durability, under normal conditions of service. Within the bituminous mixtures a wide range of solutions can be found, being the most current the use of traditional bitumen without any additive, with continuous granulometry, whose behavior is satisfactory. However, with the traditional solution, over the course of its useful life, the appearance of several pathologies that render its performance inefficient, especially in areas where traffic conditions are more severe, therefore, there is a need for solutions that minimize these problems. One possible and currently used solution to overcome these problems is the execution of modified bitumen floors with discontinuous granulometry, called SMA.

The aim of this dissertation is to evaluate the performance of SMA (Stone Mastic Asphalt) blends by assaying in the laboratory various types of mixtures with different bitumen and stabilizers.

The purpose of this study was to adapt the results to the requirements prescribed by the specifications of the document (CETO) elaborated by “Infraestruturas de Portugal” regarding hot bituminous mixtures, subjecting all variations of the composition of the mixture to the tests described in the aforementioned document.

In this work the grain size of the mixture was constant, and the mixing and compaction temperatures were varied according to the type of bitumen used. The study of the different stabilizers was only carried out in one part of the tests (drainage test according to EN 12697-18 (1), the preparation of mixtures and the conduct of Marshall type tests (according to EN 12697-34 (2), and water sensitivity test (according to EN 12697-12 (3)), the type and percentage of drainage stabilizers was maintained.

The final objective of this work is the determination of the optimum percentages of different bitumen for an SMA8 type mixture.

Keywords: Mixtures Bitumens, SMA, Pavements, Laboratory tests, Bitumen

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao Laboratório de Geotecnia e Materiais de construção situado nas instalações do Ciccopn, a oportunidade de oferecer além do estudo deste tema, de ter sido acolhido como um membro da família, explicando todas as dúvidas que tive ao longo destes cinco meses, pela paciência que tiveram comigo ao ensinar a forma como se trabalha neste setor mas também pelas amizades que foram criadas. Acrescento o grande empenho das pessoas que lidaram muito de perto na realização deste trabalho, sobretudo pela minha supervisora Engenheira Joana Santos, pelo diretor do LGMC, Engenheiro Adriano Teixeira, pelo técnico Sr. Óscar Carvalho e também pela colega de curso Carla Sequeira, sendo também indispensável o meu agradecimento a todo pessoal dos outros departamentos do LGMC e à direção do CICCOPN pelo acolhimento excelente que foi oferecido.

Da mesma forma devo agradecer ao meu orientador da parte do ISEP, Professor Ângelo Jacob o elevado empenho e a atenção dada ao longo do estágio, mas também antes e depois deste. Pelo ânimo e pela clareza dos objetivos que me propôs, mas sobretudo pelo seu profissionalismo e empenho dado como professor que me levou a nunca desistir em continuar a lutar por esta profissão.

Pela importância dada devo aludir a disponibilidade da CEPISA Portugal no fornecimento dos betumes com especial agradecimento à Engenheira Teresa Carvalho, à Intevial, pelo fornecimento dos agregados com o apoio do Engenheiro Nuno Santos e pela Eurocálcio no fornecimento do filer que foram utilizados para a realização dos ensaios laboratoriais que serviram de base na elaboração desta tese.

Agracio à minha família (sobretudo à minha Mãe e padrinhos) e à namorada Teresa, pela compreensão sobretudo pela minha ausência durante a realização do estágio que dificilmente foi conseguido com a conciliação da atividade laboral.

Por ultimo, mas também com o mesmo grau de importância devo reconhecer aos meus colegas e gerentes da empresa Sónia Jardim e Pedro Loureiro da Taverna do alho a disponibilidade e apoio dado ao permitir conciliar a atividade laboral com o estágio.

Não conseguirei gratificar a todos que me apoiaram neste trabalho, por muitas palavras que possam existir.

Valeu a pena todo este esforço.

ÍNDICE DE TEXTO

ÍNDICE GERAL	III
RESUMO	V
ABSTRACT.....	VI
AGRADECIMENTOS.....	VII
ÍNDICE DE TEXTO	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
ÍNDICE DE ANEXOS	XXI
GLOSSÁRIO.....	XXIII
ABREVIATURAS	XXV
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 REFERÊNCIAS HISTÓRICAS DO SMA	2
1.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA	2
1.4 ENTIDADE ACOLEDORA DO ESTÁGIO	3
1.4.1 <i>A Missão do CICCOPN</i>	3
1.4.2 <i>Organograma onde se insere o estágio</i>	5
1.5 ESTRUTURA DO RELATÓRIO	5
CAPÍTULO 2 ESTADO DA ARTE	7
2.1 GENERALIDADES	7
2.2 CONCEITO DE PAVIMENTO E MISTURA BETUMINOSA	8
2.2.1 <i>Pavimento</i>	8
2.2.2 <i>Misturas Betuminosas</i>	13
2.3 A ADOÇÃO DO SMA COMO SOLUÇÃO	16
2.4 APLICAÇÕES CORRENTES DA SOLUÇÃO SMA	17
2.4.1 <i>Principais vantagens</i>	18
2.4.2 <i>Principais desvantagens</i>	18
2.5 APLICAÇÕES PRÁTICAS	19
2.6 NORMAS APLICÁVEIS	20

CAPÍTULO 3	CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DE UM SMA	23
3.1	ESTUDOS DE FORMULAÇÃO DA MISTURA	23
3.1.1	<i>Formulação inicial</i>	23
3.1.2	<i>Evolução do SMA e métodos correntes</i>	25
3.2	PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS - RELAÇÕES VOLUMÉTRICAS FUNDAMENTAIS	28
3.3	AGREGADOS E FUSO GRANULOMÉTRICO PARA UM SMA	31
3.3.1	<i>Caracterização dos agregados</i>	31
3.3.2	<i>Curva granulométrica base</i>	32
3.4	BETUME	34
3.4.1	<i>Denominação de betumes</i>	36
3.4.2	<i>Betumes tradicionais</i>	39
3.4.3	<i>Betumes modificados</i>	39
3.5	INIBIDORES DE ESCORRIMENTO (ADITIVOS E FIBRAS)	40
3.5.1	<i>Fibras celulósicas simples</i>	42
3.5.2	<i>Fibras celulósicas impregnadas com betume</i>	43
3.5.3	<i>Fibras têxteis</i>	43
3.5.4	<i>Fibras de PVC</i>	44
3.6	DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA	45
3.6.1	<i>Características Marshall</i>	45
3.6.2	<i>Determinação da sensibilidade à água (ITSR)</i>	47
3.7	DESEMPENHO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	48
CAPÍTULO 4	ENSAIOS LABORATORIAIS (METODOLOGIA EXPERIMENTAL)	51
4.1	INTRODUÇÃO	51
4.2	PREPARAÇÃO DAS MISTURAS	51
4.2.1	<i>Componentes das misturas betuminosas</i>	52
4.2.2	<i>Produção das misturas em laboratório</i>	54
4.3	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS	59
4.3.1	<i>Ensaio de penetração em Betume</i>	59
4.3.2	<i>Ensaio de determinação de temperatura anel e bola</i>	62
4.3.3	<i>Ensaio de determinação da curva granulométrica dos agregados</i>	64
4.3.4	<i>Ensaio de determinação da massa volúmica do agregado</i>	66
4.3.5	<i>Ensaio de escorrimento de ligante (Método de Schellenberg)</i>	69
4.3.6	<i>Ensaio de determinação da baridade das misturas betuminosas</i>	73
4.3.7	<i>Ensaio de determinação da Baridade máxima teórica</i>	77
4.3.8	<i>Ensaio de Marshall</i>	80
4.3.9	<i>Ensaio de determinação de Índice de sensibilidade à água</i>	83
4.3.10	<i>Ensaio de determinação da Resistência conservada</i>	87
4.4	CONSIDERAÇÕES GERAIS	88

CAPÍTULO 5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	89
5.1	RESULTADOS DO ESTUDO EXPERIMENTAL	89
5.1.1	<i>Penetração de betume.....</i>	<i>89</i>
5.1.2	<i>Temperatura anel e bola.....</i>	<i>90</i>
5.1.3	<i>Propriedades do agregado.....</i>	<i>90</i>
5.1.4	<i>Composição da curva granulométrica.....</i>	<i>91</i>
5.1.5	<i>Ensaio de escorrimento do ligante</i>	<i>93</i>
5.1.6	<i>Determinação da percentagem ótima de betume (PMB 45/80-65)</i>	<i>94</i>
5.1.7	<i>Determinação da percentagem ótima de betume (PMB 45/80-75)</i>	<i>98</i>
5.1.8	<i>Índice de sensibilidade à água (ITRS).....</i>	<i>101</i>
5.1.9	<i>Índice de Resistência conservada</i>	<i>103</i>
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS	104
5.2.1	<i>Ensaio de Escorrimento.....</i>	<i>104</i>
5.2.2	<i>Ensaio de determinação de Baridades e Baridade Máxima teórica.....</i>	<i>105</i>
5.2.3	<i>Ensaio Marshall</i>	<i>106</i>
5.2.4	<i>Ensaio de determinação do índice de sensibilidade à água.....</i>	<i>107</i>
5.2.5	<i>Ensaio de determinação da resistência conservada.....</i>	<i>107</i>
5.3	COMENTÁRIOS EM RELAÇÃO AOS REQUISITOS DO CADERNO DE ENCARGOS DAS INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL, EP	108
5.3.1	<i>Enquadramento dos resultados dos ensaios com os requisitos do CETO e verificação da percentagem ótima de betume</i>	<i>109</i>
5.3.2	<i>Análise comparativa</i>	<i>109</i>
CAPÍTULO 6	CONCLUSÃO.....	111
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115	
ANEXOS	117	
ANEXO nº1 – FICHA DE PRODUTO BETUME CEPSA 35/50		118
ANEXO nº2 – FICHA DE PRODUTO BETUME CEPSA ELASTER 14/60 PMB 45/80-65		119
ANEXO nº3 – FICHA DE PRODUTO BETUME CEPSA RAF AV PMB 45/80-75		120
ANEXO nº4 – FICHA DE PRODUTO FILER EUROCÁLCIO		121
ANEXO nº5 – FICHA DE PRODUTO FIBRAS VIATOP PREMIUM®		122
ANEXO nº6 – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM CADA ENSAIO		123
ANEXO nº7 – ENSAIO DE ESCORRIMENTO PELA EN 12697-18, PELO MÉTODO DE SCHELLENBERG (RESUMO)		125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Instalações do Ciccopn na Maia	3
Figura 1.2 – Logotipo do laboratório de geotecnia e materiais de construção	4
Figura 1.3 – Organograma do LGMC e enquadramento do estágio	5
Figura 2.1 – Plano Rodoviário 2000 (IP, ep)	7
Figura 2.2 – Vista de corte de um pavimento rodoviário (flexível) (Inir.pt,2017)	9
Figura 2.3 – Execução de um pavimento rígido (Oliveira,2000)	9
Figura 2.4 – Perfil de pavimento em betão armado com juntas (Oliveira,2000)	10
Figura 2.5 – Efeito da degradação das cargas num pavimento rígido (Pavimentos,2009)	11
Figura 2.6 – Efeito da degradação das cargas num pavimento flexível (Pavimentos,2009)	13
Figura 2.7 – Comparação entre estruturas granulares de diferentes misturas betuminosas (EAPA,2007)	14
Figura 2.8 – Diferenças entre temperaturas de fabrico das misturas betuminosas (Raul Pereira,UA,2013)	14
Figura 2.9 – Aplicação de mistura betuminosa a quente (asfaltodequalidade.pt, 2017).....	15
Figura 2.10 – Aplicação de mistura betuminosa a frio (nbkangola.com, 2017)	16
Figura 2.11 – Constituição típica de um SMA (EAPA (11))	17
Figura 2.12 – Pavimento aeroportuário em SMA (matthadei.de, 2017)	18
Figura 2.13 – Troço da VCI onde foi aplicada a solução de mistura SMA (Estradas, 2009).....	19
Figura 2.14 – Aplicação de um pavimento SMA em estradas de médio tráfego (Highways maintenace,2009)	20
Figura 3.1 – Primeira fase da mistura de acordo com a patente após colocação (US Patent Nº 3797951)	24
Figura 3.2 – Segunda fase da mistura de acordo com a patente após acabamento (US Patent Nº 3797951).....	24
Figura 3.3 – Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (adaptado de Pavimentos,2009).....	28
Figura 3.4 – Peneiração do agregado 4/8 lavado	32

Figura 3.5 – Curvas granulométricas dadas pelo CETO.....	34
Figura 3.6 – Patologia tipo "Pele de crocodilo" devido às ações climáticas e perda de flexibilidade do betume (lpe.ws, 2017)	36
Figura 3.7 – Evolução do índice de envelhecimento ao longo do tempo (Shell, 2003).....	36
Figura 3.8 – Produção de mistura em central (motaengil.com, 2017)	37
Figura 3.9 – Colocação em obra da mistura betuminosa (apresentando as três fases de aplicação) (asfaltodequalidade.pt, 2017).....	37
Figura 3.10 – Centro de investigação da CEPISA em Madrid (Cepsa, 2017)	38
Figura 3.11 – Escorrimento em função de diferentes estabilizadores e temperaturas (Brown,1997)	41
Figura 3.12 – Escorrimento de ligante num SMA sem fibras (Daniela Antunes,2014).....	42
Figura 3.13 – Fibras de celulose simples (engenhariacivil.com, 2017)	42
Figura 3.14 – Fibras impregnadas com betume.....	43
Figura 3.15 – Fibras Têxteis	44
Figura 3.16 – Resíduos de PVC utilizados na formulação da mistura	44
Figura 3.17 – Execução da mistura	45
Figura 3.18 – a) Compactador de impacto; b) Banho de água; c) Ensaio de compressão	46
Figura 3.19 – Desagregação da mistura para o ensaio de determinação da baridade máxima teórica.....	46
Figura 3.20 – Sequência de ensaios pelo método Marshall.....	47
Figura 3.21 – Ensaio à tração indireta	48
Figura 4.1 –Diferentes tipos de agregados e filer	53
Figura 4.2 – Betume modificado	53
Figura 4.3 – Execução manual de uma mistura betuminosa	57
Figura 4.4 – Estufa ventilada do LGMC.....	57
Figura 4.5 – Balança digital do LGMC	58
Figura 4.6 – Recipiente metálico e manta térmica	58
Figura 4.7 – Execução de ensaio de penetração em betume	59
Figura 4.8 – Esquema de ensaio de penetração de betume.....	59
Figura 4.9 – Penetrómetro com comparador (petrodidatica.com, 2017).....	60

Figura 4.10 – Ensaio de determinação de temperatura anel e bola	62
Figura 4.11 – a) e b) Execução de ensaio de determinação de temperatura anel e bola	63
Figura 4.12 – Material retido num peneiro a ser preparado para a determinação da sua massa	65
Figura 4.13 – Picnómetro com água após remoção de ar	67
Figura 4.14 – Colocação e compactação do provete no molde troncocónico (Gameiro, (26))	68
Figura 4.15 – Forma do provete após desmoldagem (Gameiro, (26))	68
Figura 4.16 – Absorção de água pelo procedimento B (Gameiro (26)).....	69
Figura 4.17 – Transferência do provete para o copo numerado	71
Figura 4.18 – Massa de betume vertida do copo	71
Figura 4.19 – Resíduo retido no copo.....	72
Figura 4.20 – Banho de água e balança	74
Figura 4.21 – Colocação dos provetes em banho de água (etapa 3) e determinação da massa do provete saturado com a superfície seca (etapa 6).....	75
Figura 4.22 – Determinação das dimensões dos provetes	75
Figura 4.23 – Agitador mecânico (à esquerda), picnómetro (centro) e Sistema de vácuo (à direita)	78
Figura 4.24 – Banho Termostático.....	78
Figura 4.25 – Provetes antes de serem colocados no banho termostático	81
Figura 4.26 – Prensa Marshall (antes da colocação do estabilómetro)	82
Figura 4.27: Realização de um ensaio Marshall.....	82
Figura 4.28 – Compactador de impacto com pedestal de madeira	84
Figura 4.29 – Ensaio de tração indireta	85
Figura 4.30 – Verificação do tipo de rotura à tração indireta.....	85
Figura 4.31 – Verificação de agregado fraturado	85
Figura 4.32 – Verificação da superfície revestida com betume no agregado exposto.....	86
Figura 4.33 – Avaliação do tipo de rotura à tração indireta, segundo a EN 12697-23 (31).	86
Figura 5.1 – Composição em massa da mistura de agregados e filer	91
Figura 5.2 – Curvas granulométrica a partir dos agregados, filer e mistura de agregados	92

Figura 5.3 – Gráfico do ensaio de baridade com o betume PMB 45/80-65	94
Figura 5.4 – Gráfico do ensaio de baridade máxima teórica com o betume PMB 45/80-65	95
Figura 5.5 – Gráfico do ensaio de determinação da porosidade com o betume PMB 45/80-65	95
Figura 5.6 – Gráfico do ensaio de determinação do volume máximo do agregado mineral com o betume PMB 45/80-65	96
Figura 5.7 – Gráfico do ensaio de determinação da estabilidade Marshall com o betume PMB 45/80-65	96
Figura 5.8 – Gráfico do ensaio de determinação da deformação Marshall com o betume PMB 45/80-65	97
Figura 5.9 – Gráfico do ensaio de baridade com o betume PMB 45/80-75	98
Figura 5.10 – Gráfico do ensaio de baridade máxima teórica com o betume PMB 45/80-75	99
Figura 5.11 – Gráfico do ensaio de determinação da porosidade com o betume PMB 45/80-75	99
Figura 5.12 – Gráfico do ensaio de determinação do volume máximo do agregado mineral com o betume PMB 45/80-75	100
Figura 5.13 – Gráfico do ensaio de determinação da estabilidade Marshall com o betume PMB 45/80-75	100
Figura 5.14 – Gráfico do ensaio de determinação da deformação Marshall com o betume PMB 45/80-75	101
Figura 5.15 - Aparas de PVC recuperadas da mistura betuminosa	104
Figura 5.16 - Fixação do betume nas fibras sintéticas	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Espessuras normais das diferentes camadas de um pavimento flexível	12
Tabela 2.2 – Normas aplicáveis para cada parâmetro a ser analisado dado pela norma EN 13108-5 (4) ..	20
Tabela 3.1 – Primeira composição de um SMA em larga escala	23
Tabela 3.2 – Proporções de agregado grosso recomendados na norma alemã DAV (m/m)	25
Tabela 3.3 – Requisitos Marshall de um provete de SMA (<i>SMA Guidelines QIS 122</i>)	27
Tabela 3.4 – Abreviaturas adotadas na Figura 3.3.....	28
Tabela 3.5 – Características volumétricas para um SMA 8 (CETO (13))	31
Tabela 3.6 – Tabela Série Base+1 com as percentagens em função de D (adaptado da EN 13108-5 (4))..	32
Tabela 3.7 – Limitação de percentagem de material passado em cada peneiro e peneiros adicionais (adaptado da EN 13108-5 (4))	33
Tabela 3.8 – Requisitos dos agregados de um SMA 8 dados pelo CETO das Infraestruturas de Portugal (13).....	33
Tabela 3.9 – Requisitos do caderno de encargos para os betumes CETO da IP,ep (13).....	35
Tabela 3.10 – Resumo técnico de betumes e aplicações recomendadas pela CEPISA	38
Tabela 3.11 – Características Marshall para um SMA 8 (CETO (13)).....	47
Tabela 3.12 – Requisitos para o Índice de sensibilidade à água, para um SMA 8 (CETO)	48
Tabela 3.13 – Fatores que afetam o desempenho das misturas betuminosas a quente.....	49
Tabela 4.1 – Agregados e filer da mistura betuminosa	52
Tabela 4.2 – Betumes utilizados na formulação	53
Tabela 4.3 – Fibras utilizadas na formulação das misturas betuminosas	54
Tabela 4.4 – Temperaturas de mistura e compactação.....	55
Tabela 4.5 – Tempos e temperaturas de uso da estufa ventilada	55
Tabela 4.6 – Condições de ensaio em função da penetração esperada	61
Tabela 4.7 – Gama de validação de resultados do ensaio de penetração	61
Tabela 4.8 – Definição do banho líquido em função da temperatura de amolecimento	62

Tabela 4.9 – Determinação da massa de agregado para o ensaio de Schellenberg	70
Tabela 4.10 – Temperaturas a definir para o ensaio de Schellenberg	70
Tabela 4.11 – Tipos de ensaios de baridade segundo a EN 12697-6 (27)	73
Tabela 4.12 – Tipos de ensaios de baridade segundo a EN 12697-5 (12)	77
Tabela 4.13 – Número de ensaios realizados e observações.....	88
Tabela 5.1 – Resultado dos ensaios de penetração de betume.....	89
Tabela 5.2 – Validação de resultados do ensaio de penetração	89
Tabela 5.3 – Resultado dos ensaios da temperatura anel e bola para cada betume usado na formulação	90
Tabela 5.4 – Validação de resultados do ensaio de temperatura anel e bola	90
Tabela 5.5 – Análise granulométrica: Massa volúmica e índice de achatamento.....	91
Tabela 5.6 – Composição de cada percentagem de agregado na mistura final.....	92
Tabela 5.7 – Resultados do ensaio pelo método de Schellenberg.....	93
Tabela 5.8 – Resultados do ensaio Marshall, em função da percentagem de betume PMB 45/80-65.....	94
Tabela 5.9 – Parâmetros determinados através das figuras 5.3 a 5.8, para a percentagem ótima de betume (PMB 45/80-65), determinadas através das retas de aproximação	97
Tabela 5.10 – Resultados do ensaio Marshall, em função da percentagem de betume PMB 45/80-75....	98
Tabela 5.11 – Parâmetros determinados através das figuras 5.9 a 5.14, para a percentagem ótima de betume (PMB 45/80-75), determinadas através das curvas de aproximação	101
Tabela 5.12 – Resultados dos ensaios de tração indireta e determinação do índice de sensibilidade à água.....	102
Tabela 5.13 – Determinação do tipo de rotura à tração indireta	102
Tabela 5.14 – Resultados dos ensaios de tração indireta e determinação do índice de sensibilidade à água.....	102
Tabela 5.15 – Determinação do tipo de rotura à tração indireta	102
Tabela 5.16 – Resultado dos ensaios de resistência conservada para os dois betumes	103
Tabela 5.17 – Resultados dos ensaios de determinação das baridades	106
Tabela 5.18 – Resultados dos ensaios de determinação das baridades máximas teóricas (BMT)	106

Tabela 5.19 – Resultados dos ensaios Marshall	107
Tabela 5.20 – Enquadramento dos resultados com os requisitos do CETO das infraestruturas de Portugal	109

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo nº1 – Ficha de produto Betume Cepsa 35/50	118
Anexo nº2 – Ficha de produto Betume Cepsa Elaster 14/60 PMB 45/80-65.....	119
Anexo nº3 – Ficha de produto Betume Cepsa RAF AV PMB 45/80-75	120
Anexo nº4 – Ficha de produto Filer Eurocálcio.....	121
Anexo nº5 – Ficha de produto Fibras Viatop Premium®	122
Anexo nº6 – Resumo dos resultados obtidos dos ensaios.....	123
Anexo nº7 – Ensaio de Escorrimento pela EN 12697-18, pelo método de Schellenberg (Resumo)	125

GLOSSÁRIO

Betume: Ligante utilizado para envolver o agregado mineral, para o fabrico de misturas betuminosas tradicionais, a usar principalmente na construção, na conservação de pavimentos e em trabalhos hidráulicos.

Betume modificado: Ligante betuminoso cujas propriedades reológicas foram modificadas durante o fabrico ou através da utilização de um ou mais agentes químicos.

Estabilizador: Material que impede o escorrimento do betume, impedindo a exsudação deste da mistura.

Ligante betuminoso: Material adesivo contendo betume que pode estar sob a forma de não modificado, modificado, oxidado, fluidificado, fluxão ou emulsionado.

Misturas betuminosas: Composição de agregados e partículas, cujos tamanhos variam entre 0 e D (mm) e um ligante betuminoso. Podem ser utilizados aditivos para aumentar o desempenho. A mistura final após compactação e arrefecida apresenta determinadas características volumétricas, mecânicas, funcionais e de desempenho, consoante as aplicações visadas.

Norma: Uma especificação técnica aprovada por um organismo de normalização reconhecido para aplicação repetida ou continuada, cuja observância não é obrigatória e que se enquadra no âmbito de uma das seguintes categorias, de Norma Internacional, Norma europeia ou Norma nacional.

Pavimento: Estrutura composta por uma ou mais camadas destinadas a permitir a circulação de tráfego sobre o terreno. As várias camadas constituintes dos pavimentos podem ser estruturais, de desgaste, de ligação, de regularização e camada base.

Penetração: Consistência expressa pela profundidade, em décimas de milímetro, a que uma agulha normalizada penetra verticalmente num provete do material em condições específicas de temperatura, carga e duração de aplicação da carga.

Temperatura de amolecimento: Temperatura à qual o material nas condições de referência do ensaio atinge uma consistência específica.

ABREVIATURAS

Ipen - Índice de penetração

P - Penetração

v - Velocidade

ρ - Densidade

τ - Tensão de corte

AC - *Asphalt concrete*

BBM/BMC - Betume com borracha incorporada

BT - Betume para misturas temperadas

CE - Comunidade Europeia

CETO - Caderno de Encargos Tipo Obra

CEN - Comité Europeu de Normalização

D - Dimensão nominal do agregado

DPC - Diretiva dos Produtos de Construção

EAPA - *European Asphalt Pavement Association*

EN - Norma Europeia

EU - União Europeia

IPQ - Instituto Português da Qualidade

NP - Norma Portuguesa

pen - Penetração no betume

PMB - Betume modificado com polímeros

SMA - *Stone Mastic Asphalt*

Tab - Temperatura anel e bola

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estado dos pavimentos em serviço vai sofrendo degradações ao longo do tempo, pela ação do tráfego e dos agentes climáticos. A camada superficial é especialmente solicitada por estes dois tipos de ações.

As cargas que afetam mais as camadas superiores dos pavimentos, são as cargas verticais dos veículos pesados, mas também as ações de torção dos veículos e as forças de atrito, devidas à interação pneu-pavimento. Além destas, existem várias outras ações que afetam os pavimentos, tais como as derivadas dos elementos que compõem a atmosfera (a radiação ultravioleta, a água, o oxigénio, etc.), especialmente se tratam de pavimentos flexíveis ou semi-rígidos, ou seja, pavimentos com camada de desgaste em material betuminoso. No caso de pavimentos em zonas de estacionamento ou em terminais portuários e aeroportuários, existem ainda as cargas estáticas devidas aos veículos estacionados, depósito de contentores e circulação dos veículos de dimensão excepcional.

É esperado que os pavimentos apresentem boas características funcionais e estruturais, de entre as quais se destacam as seguintes: regularidade superficial; resistência à derrapagem; resistência à deformação permanente e resistência à fadiga. Outras propriedades funcionais (de segurança, conforto e ambiente) são fundamentais, como por exemplo a capacidade de drenagem e a durabilidade das marcas rodoviárias.

Para além de todos estes aspetos técnicos, ambientais e económicos, verifica-se ainda hoje em dia uma preocupação crescente em relação à minimização das intervenções de conservação, manutenção e substituição e às suas habituais consequências para os utentes, ganhando relevância as soluções de grande durabilidade e baixo custo no ciclo de vida. Para dar resposta a todo este tipo de preocupações, tem sido desenvolvido, nas últimas quatro décadas, o conhecimento sobre o comportamento de pavimentos (e dos seus materiais constituintes, em especial betuminosos), com desempenho muito superior ao convencional e uma maior vida útil. De entre estes, destacam-se as misturas designadas por SMA, que se encontram normalizadas, a nível europeu, pela norma EN 13108-5 (4).

Segundo a EAPA (5), este tipo de misturas, atualmente das mais aplicadas como camada de desgaste na Europa, é adequado a diversos tipos de pavimentos, (rodoviários, portuários e aeroportuários) e são especialmente indicados em grandes vias de acesso, zonas de tráfego elevado e pesado (p. ex. em portos e aeroportos), com inclinações acentuadas, em zonas de travagem, viadutos e túneis.

1.2 REFERÊNCIAS HISTÓRICAS DO SMA

As misturas betuminosas do tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*) tiveram origem na década de sessenta na Alemanha, sendo que o objetivo inicial que levou ao seu desenvolvimento foi o de criar uma mistura mais resistente ao desgaste provocado pelos pneus com pitons utilizados em zonas e épocas com gelo. Com o desenvolvimento destas misturas constatou-se que apresentavam uma melhor resistência às deformações permanentes e uma maior durabilidade, tendo-se generalizado a sua utilização principalmente nos países do norte da Europa (5).

Por esta razão, as misturas SMA, foram utilizadas durante os primeiros tempos, sobretudo, nos países frios e mais desenvolvidos, cujas redes de estradas principais já estavam construídas. Entretanto, nos países do sul da Europa ainda se concluíam as redes fundamentais de estradas e, por isso, a prioridade nos investimentos estava focada na construção de novas vias. Na última década, estando a rede básica de estradas já concluída em muitos países, começou progressivamente a ganhar ênfase a conservação da rede existente.

Por conseguinte, passou a ser mais importante o bom desempenho e a maior vida útil relativa dos diferentes tipos de misturas betuminosas, dado que os custos de conservação das camadas de desgaste podem representar entre 25 a 35% do custo total de exploração das vias rodoviárias (6).

As misturas do tipo SMA são constituídas por uma mistura de agregados de granulometria descontínua e por um masticque betuminoso⁽¹⁾ rico em betume. Por apresentarem um conteúdo em betume relativamente elevado, são geralmente utilizados aditivos, denominados estabilizadores, como por exemplo fibras celulósicas, com o objetivo principal de inibir o escorrimento do ligante betuminoso, denominados estabilizadores.

1.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA

O primeiro objetivo deste trabalho é, elaborar um estudo completo de uma mistura betuminosa tipo SMA, analisando todos os seus componentes sendo eles os agregados, o tipo de betume utilizado, os inibidores de escorrimento (fibras), conforme a norma EN 13108-5 (4).

Inicialmente, houve necessidade de consultar alguma literatura especializada no tema, normalmente em língua inglesa, algumas teses de mestrado na área dos pavimentos betuminosos e consultadas as referências normativas aos ensaios que foram executados neste estudo. Esta consulta foi fundamental

¹ O masticque betuminoso é habitualmente referido como o produto da ligação do ligante betuminoso com as frações finas do agregado mineral (finos e filler)

na organização da sequência dos ensaios e aquisição de conhecimento técnico necessários para a interpretação dos seus resultados.

O trabalho foi inteiramente executado em condições laboratoriais, sendo necessária alguma formação base para a execução dos ensaios e o necessário acompanhamento da parte dos técnicos especializados em laboratório.

Os estudos focaram-se na submissão em laboratório a diversos ensaios preconizados na normativa em vigor tendo sido experimentados diferentes inibidores de escorrimento (aparas de PVC, fibras “Viatop” e têxteis), vários ligantes (betumes normais e modificados) sendo que a granulometria do agregado (com marcação CE) não sofreu qualquer alteração.

O objetivo final consistiu em elaborar em laboratório várias misturas com variações na sua composição, e submetê-las a ensaios normalizados preconizados pela EN 13108-5 (4), verificando os valores aceitáveis para cada tipo de mistura. Também foi procurado neste trabalho o estudo de formulação de uma mistura SMA que fosse mais económica verificando o desempenho de um betume com melhores características e substituindo os inibidores de escorrimento (fibras comerciais) por fibras sintéticas e de resíduos da construção (aparas de PVC).

1.4 ENTIDADE ACOLHEDORA DO ESTÁGIO

1.4.1 A Missão do CICCOPN

O estágio foi realizado nas instalações do laboratório de geotecnia e materiais de construção (LGMC), no setor de betuminosos, sendo este um departamento do centro de formação orientado para setor da construção civil e obras públicas (CICCOPN), cujas instalações (Figura 1.1) são localizadas no concelho da Maia.



Figura 1.1 – Instalações do Ciccopn na Maia

Introdução

Na estrita fidelidade a esta missão desde 1981, o CICCOPN dinamiza ações para Jovens e Adultos, candidatos a emprego qualificado, promovendo a inserção no mercado de trabalho e a melhoria das competências e conhecimentos técnicos, atento às reais necessidades de formação das empresas, relativamente ao recrutamento de novos elementos para os seus quadros, e às expectativas de todos quantos desejam qualificações acrescidas e certificadas para corresponder aos elevados níveis de produtividade e competitividade de um setor da Construção cada vez mais global. Com idêntico empenho, proporciona aos ativos do setor – quadros, técnicos e operários – a oportunidade de acesso a múltiplas ações de formação contínua que visam a adaptação, reciclagem, aperfeiçoamento e especialização profissionais, prosseguindo o desígnio da aprendizagem ao longo da vida.

O Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) do CICCOPN é um laboratório aberto ao setor da construção civil que inclui formação profissional, acreditado pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC) com o n.º L0154, para um número alargado de ensaios (50 ensaios acreditados), nas diversas áreas de atividade (fonte: www.ciccopn.pt).



Figura 1.2 – Logotipo do laboratório de geotecnia e materiais de construção

Este Laboratório, com recursos técnicos de elevado nível, presta serviços de grande qualidade, estabelecendo uma ligação direta às empresas do setor da Construção e outras entidades. Estes serviços permitem ao CICCOPN articular a sua vertente formativa com uma relação técnica com as empresas, influenciando, deste modo, quer os estágios do curso de Controlo da Qualidade, no âmbito da Formação Inicial, quer o incentivo à formação contínua dos ativos dessas empresas. O LGMC possui um grupo de trabalho com elevada capacidade técnica, sendo-lhe reconhecida competência para realizar ensaios de laboratório e de campo. O LGMC desenvolve ações de formação para profissionais nas áreas dos materiais de construção e da geotecnia, que pretendam atualizar os seus conhecimentos.

O Setor de produtos betuminosos, abrange uma área muito extensa de ensaios de laboratório, realizados em betumes, emulsões betuminosas e misturas betuminosas e ensaios para o controlo da aplicação das misturas betuminosas e caracterização final do pavimento. O LGMC encontra-se equipado para a realização de estudos de formulação e marcação CE de misturas betuminosas e efetua ainda o acompanhamento técnico em obra e a elaboração de pareceres no âmbito da patologia de pavimentos betuminosos. Os ensaios mais importantes são os que permitem a previsão do comportamento das

misturas no pavimento em termos de comportamento à fadiga, deformações permanentes, permeabilidade e desprendimento dos materiais (fonte: www.ciccopn.pt).

1.4.2 Organograma onde se insere o estágio

O organograma do LGMC e enquadramento do estágio é apresentado na Figura 1.3.

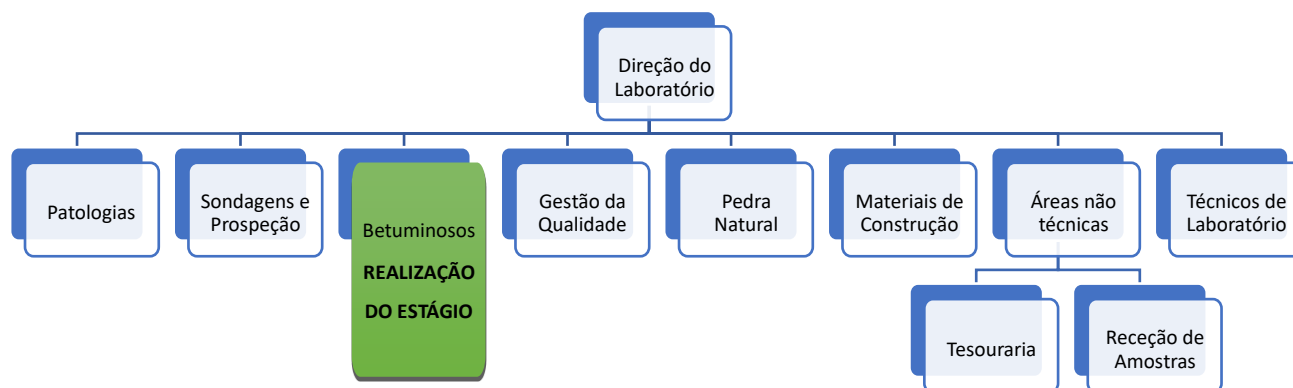


Figura 1.3 – Organograma do LGMC e enquadramento do estágio

1.5 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O relatório está estruturado da com seis capítulos conforme a seguir descritos:

No capítulo primeiro, designado como “Introdução”, faz-se referência ao enquadramento do tema e descrevem-se os objetivos, estrutura do trabalho e referencia-se a entidade acolhedora do estágio. O segundo capítulo designado como “Estado da arte”, é composto pela elucidação do conceito de pavimento sendo referidos alguns tipos de pavimento, das várias misturas betuminosas e é dada explicação pormenorizada de todos os componentes das misturas betuminosas tipo SMA e das suas exigências normativas. No capítulo terceiro, intitulado “Propriedades principais de um SMA” é feita a explicação pormenorizada de todos os componentes das misturas SMA tendo em conta as exigências normativas. No quarto capítulo “Ensaios laboratoriais”, é feita uma abordagem aos métodos de ensaios, com recurso às referências normativas (âmbito de aplicação) e também ao método de execução de cada ensaio, sendo ilustrado através de figuras a execução de cada um deles. Na fase de avaliação de resultados, com designação “Resultado de ensaios” encontra-se o quinto capítulo, onde estão apresentados os resultados de cada ensaio, devidamente enquadrados com os requisitos das normas, sendo apresentadas as expressões de cálculo e dada a validação de resultados. Por ultimo, em conclusão é apresentado o sexto capítulo, intitulado “Conclusões e trabalhos futuros”, onde se faz referência às principais conclusões retiradas deste estudo, com especial ênfase para trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos sobre a aplicação desta solução. Como anexos tem-se a primeira parte

Introdução

onde constam as fichas de produto dos fornecedores de betume, filer e fibras VIATOP. No segundo anexo são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais devidamente validados pelo laboratório.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 GENERALIDADES

A grande extensão e a deficiente qualidade da rede rodoviária nacional constituíram, durante muitos anos, um fator desfavorável ao desenvolvimento socioeconómico de Portugal, não restando dúvidas de que a implementação do Plano Rodoviário Nacional de 1985 e mais recentemente o Plano Rodoviário Nacional 2000 apresentado na Figura 2.1, contribuíram em grande medida para o desenvolvimento observado em Portugal desde a adesão à União Europeia (7).



Figura 2.1 – Plano Rodoviário 2000 (IP, 2017)

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 os itinerários principais, da rede rodoviária nacional, até às estradas de nível municipal, devem encontrar-se em bom estado de conservação, proporcionando deslocações rápidas e seguras.

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.

2.2 CONCEITO DE PAVIMENTO E MISTURA BETUMINOSA

2.2.1 Pavimento

Um pavimento rodoviário é uma estrutura constituída por um conjunto de camadas de espessura finita, apoiadas num maciço semi-indefinido, o solo de fundação. A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período de vida do pavimento, sob a ação das ações do tráfego, e nas condições climáticas que ocorram. A comodidade e segurança de circulação rodoviária são asseguradas pelo papel estrutural e funcional das camadas constituintes do pavimento. A função estrutural está ligada à capacidade que o conjunto das diversas camadas tem para resistir às cargas aplicadas pelos veículos e às ações climáticas, sem sofrer degradações que ponha em risco a funcionalidade do pavimento. Em relação aos tipos de pavimentos existentes classificam-se os pavimentos em flexíveis, como representado na Figura 2.2 – Vista de corte de um pavimento rodoviário (flexível) (Inir,2017), rígidos e semi-rígidos. 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 (8):

- Categoria da estrada;
- Condições climatéricas;
- Tráfego previsto;
- Condições do terreno de fundação.

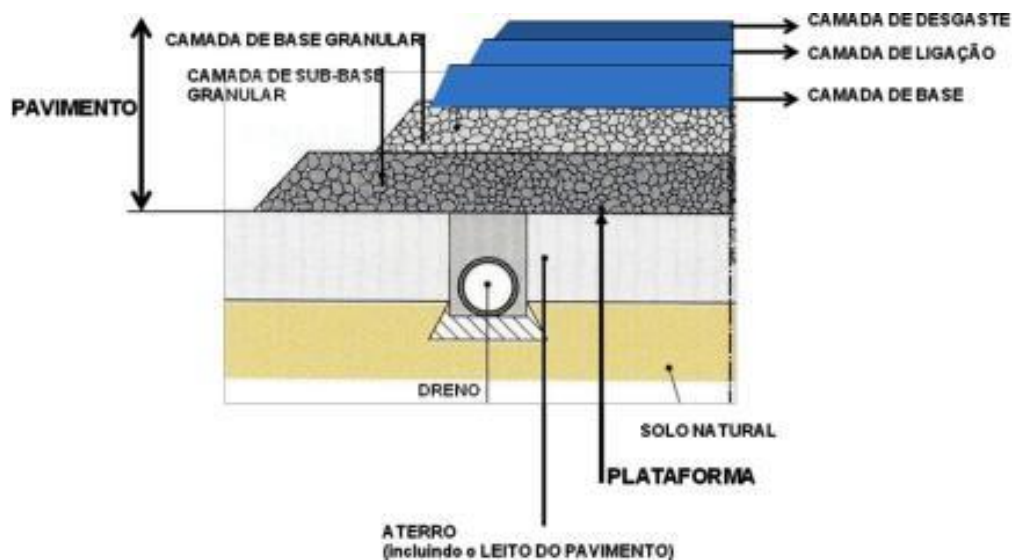


Figura 2.2 – Vista de corte de um pavimento rodoviário (flexível) (Inir,2017)

Pavimento Rígidos

Um pavimento rígido é constituído por uma laje de betão, que pode ser colocada diretamente sobre a fundação, conforme a Figura 2.3, ou sobre uma ou mais camadas de suporte (base/sub-base) que podem ser ou não aglutinadas com ligante. Embora teoricamente a laje possa ser aplicada diretamente sobre a fundação, tal não é desejável, uma vez que o facto de a laje ter um apoio relativamente uniforme e resistente à erosão é essencial para garantir a durabilidade do pavimento.



Figura 2.3 – Execução de um pavimento rígido (Oliveira,2000)

O mecanismo de degradação considerado para efeitos de dimensionamento deste tipo de pavimentos é o fendilhamento por fadiga da laje de betão. No entanto, não é este o tipo de degradação mais frequente nos pavimentos rígidos, mas sim as degradações de superfície, que afetam essencialmente as condições de circulação dos veículos. Estes defeitos estão associados ao estado das juntas, ao estado da superfície do betão e aos deslocamentos entre lajes adjacentes.

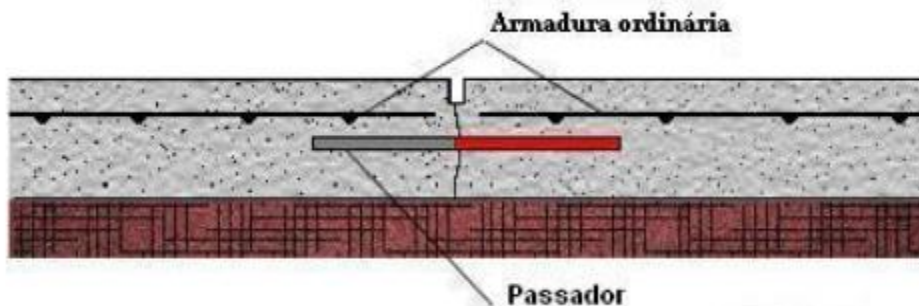


Figura 2.4 – Perfil de pavimento em betão com juntas (Oliveira, 2000)

No que se refere às juntas, observa-se o destacamento do produto de selagem e o seu envelhecimento, que o torna frágil e degradável; pode ainda observar-se o lasqueamento da junta. Nas lajes de betão, podem ocorrer peladas, lasqueamentos ou perdas de agregado grosso, em consequência da ação abrasiva do tráfego e dos agentes atmosféricos, ou como resultado do emprego de materiais de qualidade inferior. Podem ainda ocorrer fendas de retração nas lajes de betão quando há atraso na serralagem das juntas de retração, bem como fendas de canto devido ao deficiente apoio das lajes ou à sua sobrecarga. Por último, o escalonamento entre lajes é devido a uma degradação das suas condições de apoio, frequentemente originada por fenómenos de erosão e bombagem nas camadas subjacentes, provocando o basculamento das lajes. Quando se utilizam pavimentos de betão armado contínuo, a generalidade dos defeitos anteriormente referidos é minimizada, a menos que se utilizem práticas construtivas inadequadas. As características funcionais de um pavimento são condicionadas essencialmente pela sua superfície. O acabamento da superfície e os materiais que nela são aplicados influenciam significativamente aspetos importantes e preocupantes para os utilizadores, tais como:

- Aderência entre o pneu e o pavimento;
- Projeção de água em tempo de chuva;
- Desgaste dos pneus;
- Ruído no exterior e no interior do veículo;
- Comodidade e a estabilidade durante a circulação;
- Ações dinâmicas do tráfego;
- Resistência ao rolamento (economia de combustíveis);
- Desgaste dos veículos;
- Propriedades óticas.

Estes aspectos funcionais do pavimento estão principalmente associados à sua textura e regularidade superficial. Relativamente à textura é usual distinguir entre a microtextura, que corresponde às irregularidades superficiais do pavimento inferiores a 0,5 mm, a macrotextura, correspondente às irregularidades entre 0,5 e 50 mm, e a megatextura, correspondentes a ordens de grandeza de 50 a 500 mm. A primeira define a aspereza da superfície, a segunda a sua rugosidade e a terceira, está associada a degradações superficiais como ninhos e peladas. Por sua vez, a irregularidade superficial está associada a ondulações de comprimento de onda superior a 0,5 m.

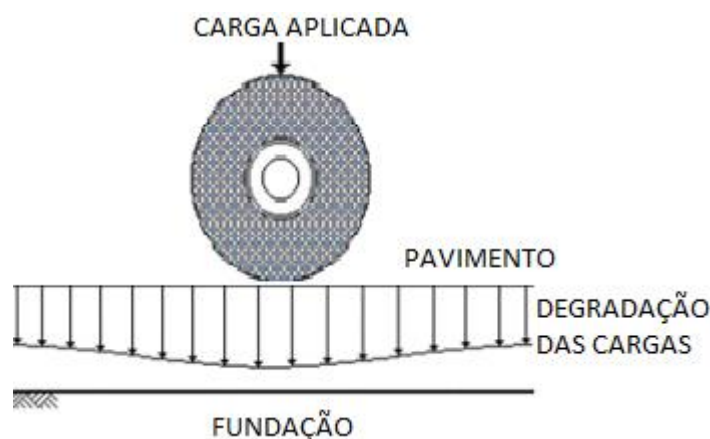


Figura 2.5 – Efeito da degradação das cargas num pavimento rígido (Pavimentos, 2009)

A microtextura, ou seja, a aspereza do pavimento, é necessária para se conseguir uma boa aderência. A macrotextura é necessária para manter essa aderência a velocidades elevadas, ou com o pavimento molhado. A macrotextura contribui também para melhorar a visibilidade em condições de piso molhado, elimina ou reduz os fenómenos de reflexão da luz que têm lugar nos pavimentos lisos molhados, e melhora a percepção das marcas de sinalização horizontal.

Pavimento Flexível

Os pavimentos flexíveis podem ser constituídos por uma ou várias camadas de misturas betuminosas.

A resistência estrutural dos pavimentos flexíveis é dada pelas diferentes camadas que o constituem assim como os materiais usados no qual a resistência e rigidez são fundamentais. A camada mais importante é a de base pois recebe os esforços de tráfego provenientes da camada de desgaste, uniformiza as tensões e posteriormente transmite-as para a camada de sub-base sendo as espessuras normais para cada tipo de camada apresentadas na Tabela 2.1.

A camada de desgaste, é a camada superior do pavimento e na qual circula diretamente o tráfego. Deve apresentar uma superfície lisa, regular, não derrapante e resistente ao desgaste contínuo do tráfego, conferindo as condições de segurança e conforto para os utilizadores. Esta camada é em mistura betuminosa, constituída por uma mistura de agregados e betume. Os agregados têm uma maior

Estado da Arte

percentagem na camada de cerca de 85 a 90% e têm como função resistir ao desgaste imposto pelas solicitações e suportar e transmitir as cargas provenientes do tráfego para a camada de base. O betume constitui o restante material com cerca de 10 a 15% e tem como função ligar os agregados, tratando-se de um elemento aglutinante e impermeabilizador da camada.

A camada de desgaste, tem como função receber as cargas derivadas do tráfego e transmitidas pela camada de regularização, uniformizar as tensões e posteriormente transmitir para a camada de base. Esta camada é constituída por uma mistura betuminosa.

A camada base, é a camada estrutural mais importante. Tem como função receber as cargas transmitidas pela camada de regularização, uniformizar as tensões e posteriormente transmitir para a camada de sub-base. É constituída por material granular compactado.

A camada de sub-base, é utilizada para reduzir a espessura da base, tem como funções receber os esforços provenientes da camada de base e redistribuir os esforços para a fundação, drenar as infiltrações que poderão ocorrer nas camadas superiores e impedir a ascensão da água capilar evitando que atinjam as camadas nobres do pavimento.

Das vantagens da utilização deste tipo de pavimento, destaca-se a facilidade e rapidez de reparação e a adaptação a eventuais deformações das camadas inferiores. Para o seu dimensionamento torna-se necessário conhecer o tráfego presente e futuro, pois as características do tráfego influenciam a degradação do pavimento como se poderá verificar na Figura 2.6. As condições climáticas e de fundação, são também dados essenciais ao dimensionamento dos pavimentos flexíveis. De um modo geral, os pavimentos rodoviários são constituídos por três camadas: camadas superiores, camadas granulares e o solo de fundação. Na Figura 2.2 encontra-se um esquema da estrutura de um pavimento flexível.

Tabela 2.1 – Espessuras normais das diferentes camadas de um pavimento flexível

Camada	Espessura (cm)
Desgaste	4 a 8
Regularização	4 a 10
Base	15 a 30
Sub-base	15 a 30

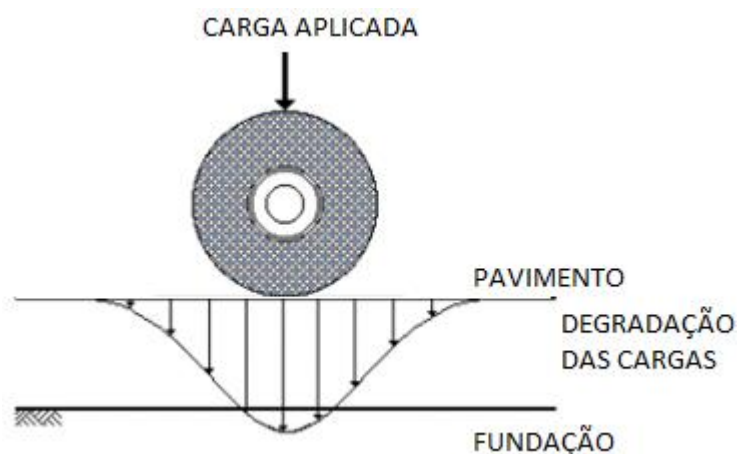


Figura 2.6 – Efeito da degradação das cargas num pavimento flexível (Pavimentos, 2009)

2.2.2 Misturas Betuminosas

Definição

As misturas betuminosas são constituídas por um conjunto de materiais granulares, doseados de uma forma ponderal ou volumétrica, misturados em central com uma quantidade de ligante previamente determinada. Logicamente, como o comportamento das misturas betuminosas depende de cada um dos componentes elementares que as compõem, antes de se proceder ao estudo da sua formulação, é imperativo que os agregados e o ligante betuminoso sejam corretamente estudados e caracterizados, de modo a que o desempenho das misturas não seja comprometido pelo comportamento inadequado dos seus constituintes, ou pela sua má dosagem (9).

As misturas betuminosas podem ser distinguidas pela granulometria e/ou pela sua temperatura de fabrico:

Segundo a granulometria (Figura 2.7):

- Contínuas (AC (Betão betuminoso));
- Descontínuas (Mástique de pedra (SMA) e misturas betuminosas drenantes (PA).

Segundo a temperatura de fabrico (Figura 2.8):

- A Frio (até 70°C);
- Semitemperadas (entre 70°C a 100°C);
- Temperadas (entre 100 °C e 140°C);
- A quente (acima de 140°C).

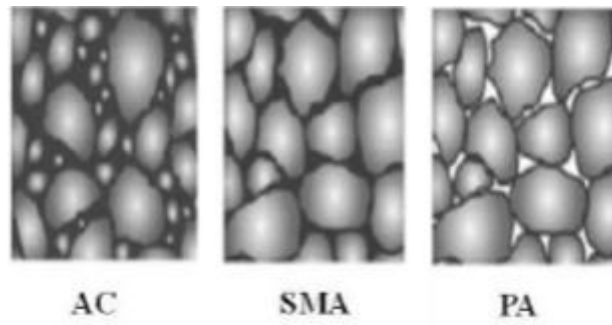


Figura 2.7 – Comparação entre estruturas granulares de diferentes misturas betuminosas (EAPA,2007)

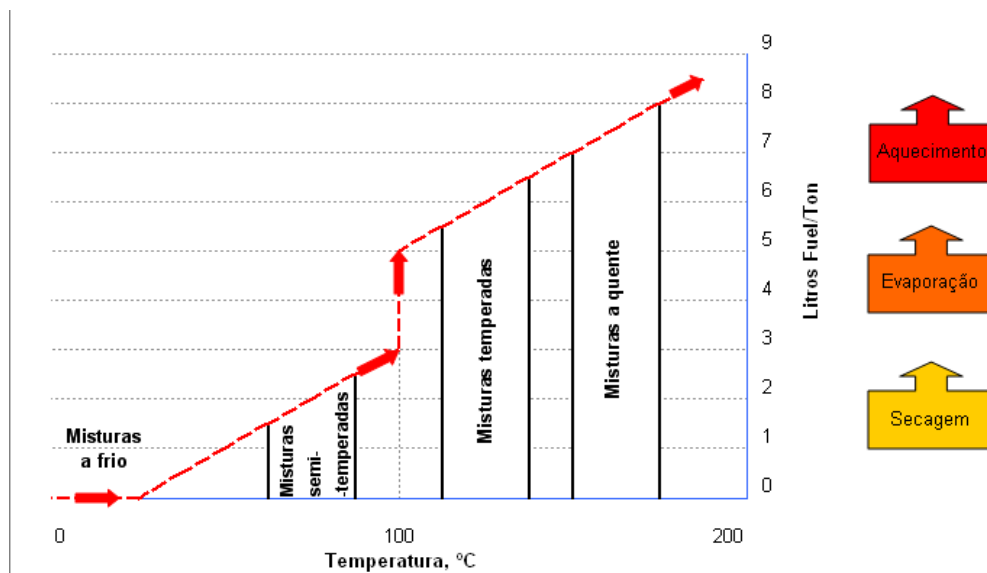


Figura 2.8 – Diferenças entre temperaturas de fabrico das misturas betuminosas (Raul Pereira,UA,2013)

Misturas betuminosas a quente

Para uma mistura betuminosa a quente as temperaturas de produção encontram-se no intervalo dos 120°C aos 190°C, consoante o betume a utilizar.

Cada uma dessas temperaturas tem um papel fundamental. Assim a temperatura de fabrico é essencial para garantir que o betume tenha a viscosidade necessária para que este envolva adequadamente os agregados durante o processo. Se a temperatura de mistura for demasiado elevada, o betume vai ter uma viscosidade baixa, que resulta no escoamento do betume após o envolvimento dos agregados, para além de potenciar a degradação do betume levando ao seu envelhecimento. Para temperaturas demasiado baixas, que pode acontecer por exemplo no momento de aplicação como demonstrado na Figura 2.9, resulta a situação inversa, o betume vai apresentar uma viscosidade elevada o que leva ao deficiente envolvimento dos agregados, dificultando o contacto agregado/betume sendo este um fator essencial para ocorra boa adesividade.



Figura 2.9 – Aplicação de mistura betuminosa a quente (asfaltodequalidade.pt, 2017)

Relativamente à temperatura de compactação, esta tem como objetivo garantir que as partículas de agregado constituam uma estrutura compacta, resistente, durável, coesa e com o volume de vazios definidos no projeto. Assim durante o processo de compactação é importante que esta temperatura não seja demasiado elevada, para garantir que o betume tem viscosidade suficiente que permita a coesão da mistura, de forma a suportar os esforços transmitidos durante a compactação sem originar descompactações sucessivas. Por outro lado, se esta temperatura for demasiado baixa, o betume vai apresentar uma viscosidade demasiado elevada, reduzindo a trabalhabilidade da mistura pelo aumento da resistência à reorganização dos agregados, dificultando a compactação (Alves (10)).

Misturas betuminosas temperadas

As misturas temperadas são produzidas a temperaturas entre os 100°C e os 140°C, a sua produção envolve várias técnicas que permitem a redução da viscosidade efetiva do ligante, permitindo o revestimento integral dos agregados durante a fase de mistura e compactação com aplicação de baixas temperaturas (Ferreira, 2009). De acordo com a EAPA (11) as técnicas mais utilizadas são as técnicas de espuma ou a adição de aditivos químicos ou orgânicos.

Misturas betuminosas semitemperadas

De acordo com a EAPA, as misturas semitemperadas caracterizam-se por serem produzidas a temperaturas inferiores a 100°C, usualmente entre os 70°C e os 100°C. Presentemente a produção deste tipo de misturas é possível através da tecnologia da emulsão (emulsão com teor em água de 30%), através de técnicas de espuma de betume ou por processos LEA (*Low Energy Asphalt*). O processo LEA resulta da capacidade do ligante anídrico quente produzir espuma ou de se emulsionar, quando em contacto com a água residual dos agregados com temperaturas um pouco inferiores a 100°C, permitindo assim, o revestimento dos agregados a temperaturas baixas.

Misturas betuminosas a frio

Ao contrário das misturas betuminosas a quente, em que se procede ao aquecimento do betume de modo a obter uma viscosidade adequada ao fabrico, espalhamento e compactação da mistura betuminosa, nas misturas a frio a diminuição da viscosidade do betume é conseguida através da sua incorporação na mistura sob a forma de emulsão betuminosa (emulsão de betume em água).



Figura 2.10 – Aplicação de mistura betuminosa a frio (nbkangola.com, 2017)

2.3 A ADOÇÃO DO SMA COMO SOLUÇÃO

De acordo com a EAPA (11), o *Stone Mastic Asphalt* é uma mistura flexível, estável e bastante resistente à rotura, graças ao emprego de fibras.

A mistura betuminosa SMA é uma mistura fabricada a quente, de granulometria descontínua, caracterizada por apresentar uma elevada percentagem de agregados grossos com esqueleto mineral formado por agregados grossos e finos e é preenchido por um mastique betuminoso, composto por filer e betume modificado com polímeros, ao qual são adicionados fibras para fornecer estabilidade durante o transporte e sobretudo como inibidores de escorrimento como apresentado na Figura 2.11. Quando avaliada pelo critério do custo-benefício, esta técnica 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. (EAPA(11))

O SMA é um revestimento geralmente aplicado como camada de desgaste, com espessuras entre 1,5 a 6 cm, e caracterizado, basicamente, por uma elevada percentagem de agregados grossos, que formam uma estrutura de granulometria descontínua de elevado atrito interno. Os vazios do esqueleto mineral

são preenchidos com betume modificado com polímeros, filer mineral e também com fibras, garantindo a sua impermeabilidade e estabilidade.

A sua principal vantagem, é 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 da projeção de água, da reflexão da luz em condição de estrada húmida e a diminuição do ruído do tráfego.

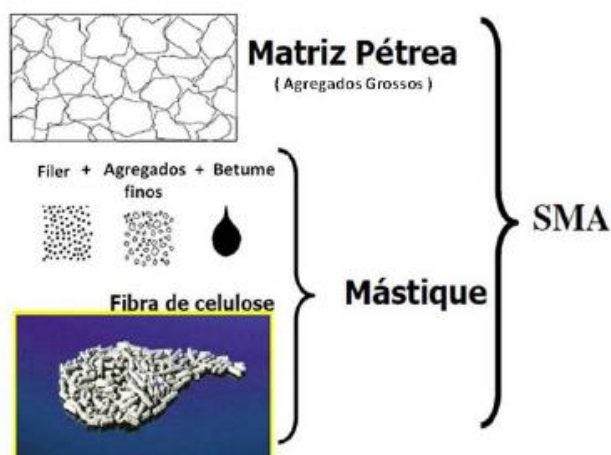


Figura 2.11 – Constituição típica de um SMA (EAPA (11))

2.4 APLICAÇÕES CORRENTES DA SOLUÇÃO SMA

As aplicações correntes desta solução de mistura sobretudo como camada de desgaste podem ser verificadas em aeroportos e estradas com elevado tráfego.

Normalmente uma camada de desgaste com uma mistura betuminosa tipo SMA poderá ser aplicada no pavimento sem necessidade de fresar a camada existente, a sua aplicação é bastante recomendada como medida de reparação de pavimentos existentes, sobretudo em zonas sensíveis como por exemplo em zonas de elevadas solicitações de carga como aeroportos, em locais onde hajam grandes pendentes, ou sobre obras de arte (tabuleiros de viadutos). Um bom exemplo desse âmbito de aplicação encontra-se descrito no seguinte documento: *“MISTURAS BETUMINOSAS DO TIPO SMA – A EXPERIÊNCIA DA MOTA-ENGIL ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO”*, disponível em mota-engil.com.



Figura 2.12 – Pavimento aeroportuário em SMA (matthadei.de, 2017)

2.4.1 Principais vantagens

As principais vantagens da utilização desta mistura, prendem-se com a sua boa estabilidade a elevadas e baixas temperaturas, ajudada pelo esqueleto mineral formado com agregados de elevada qualidade que aumenta o atrito interno e devido ao mastique rico em ligante resultando numa elevada resistência ao desgaste, a mistura SMA, pelo fato de ter um baixo índice de vazios torna-a impermeável e apresenta uma boa resistência ao envelhecimento, baixa sensibilidade à humidade e alta durabilidade. Como pavimento, comparando com os pavimentos tradicionais, tem vantagem na redução do borrimo de água, devido à textura da mistura, ou seja, há diminuição do “*spray*” de água em dias chuvosos e da mesma forma existe também uma diminuição no reflexo ofuscante noturno na superfície de rolamento, melhorando a visibilidade das sinalizações horizontais do pavimento. Verifica-se também uma redução do nível de ruído pois a granulometria descontínua da mistura SMA reduz consideravelmente a sua emissão, sendo o ruído do tráfego absorvido pela sua macro textura.

2.4.2 Principais desvantagens

As principais desvantagens da utilização desta mistura, verificam-se sobretudo pela sua trabalhabilidade muito difícil, pois os betumes modificados tornam a mistura bastante mais viscosa que os betumes tradicionais. O preço elevado devido à elevada percentagem de betume e necessidade de empregar fibras tornam o seu custo, comparando com os betumes tradicionais cerca de 50% maior. Outro fator importante é a sua alta taxa de arrefecimento, devido às altas temperaturas (acima de 160 °C) que a mistura betuminosa é executada, sendo que quando entra em contacto com a temperatura ambiente existe um decréscimo muito acentuado da temperatura. Também é exigida uma escolha criteriosa dos agregados, devido à descontinuidade da mistura terá de haver um maior controlo na seleção dos agregados pois, em regra geral, o seu fuso granulométrico é bastante exigente, sendo que por vezes um

agregado terá de ser fracionado em várias partes para se conseguir encaixar no fuso granulométrico, portanto haverá à partida um maior custo na aquisição dos agregados.

2.5 APLICAÇÕES PRÁTICAS

Uma camada de desgaste executada com SMA, com o projeto e produção de mistura em central corretas, bem como pavimentação adequada, tem excelentes características mecânicas devido ao elevado conteúdo de agregados grossos e a elevada percentagem de betume.

O SMA pode ser usado como camada de desgaste ou camada de regularização para estradas e outras superfícies de tráfego. Trata-se de um método de construção adotado recentemente em Portugal nas autoestradas, sendo até à data aplicada como medida apenas corretiva, como exemplo temos a VCI no Porto, representada na Figura 2.13.

Um SMA também pode ser aplicado em vias com menor movimento. Para estes casos, os tipos SMA 0/5 e 0/8 são especialmente adequados (Blazejowski,2016 (5)).



Figura 2.13 – Troço da VCI onde foi aplicada a solução de mistura SMA (Estradas, 2009)

Em Portugal, a adoção desta solução tem vindo a ser cada vez mais forte. A necessidade de manter o desempenho da rede viária desenvolvida nos últimos anos veio a obrigar a adotar soluções que passassem pela minoração dos custos de manutenção e manutenção da fiabilidade da solução construtiva.

Ao mesmo tempo a adoção da solução tem um impacto económico superior ao normal devido à percentagem superior de betume, do tipo de betume e, devido à seleção criteriosa dos agregados a empregar. Portanto, deve ser bem avaliada a necessidade da opção por este método.



Figura 2.14 – Aplicação de um pavimento SMA em estradas de médio tráfego (Highways maintenance,2009)

2.6 NORMAS APLICÁVEIS

A norma base para o estudo de formulação do SMA é definida com a EN 13108-5 (4).

As normas para cada componente ou parâmetro, em que se baseiam o estudo de formulação das misturas betuminosas tipo *Stone Mastic Asphalt (SMA)*, são as constantes na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Normas aplicáveis para cada parâmetro a ser analisado dado pela norma EN 13108-5 (4)

Designação	Componente a analisar	Norma
Análise granulométrica dos agregados	Agregados	EN 933-1
Índice de achatamento das partículas	Agregados	EN 933-3
Ensaio de equivalente de areia ⁽²⁾	Agregados	EN 933-8
Teor de finos. Ensaio do azul-de-metileno ⁽²⁾	Agregados	EN 933-9
Determinação da resistência ao desgaste. Micro-Deval	Agregados	EN 1097-1
Resistência à fragmentação. Ensaio de Los Angeles ⁽³⁾	Agregados	EN 1097-2
Massa volúmica e absorção de água	Agregados	EN 1097-6
Ensaio de Penetração	Betumes	EN 1426
Temperatura Anel e Bola	Betumes	EN 1427
Propriedades dos betumes em misturas betuminosas	Betumes	EN 12591

² Este ensaio não foi realizado no presente estágio.

Baridade máxima teórica	Mistura Betuminosa	EN 12697-5
Vazios na mistura de Agregados (VMA)	Mistura Betuminosa	EN 12697-8
Porosidade (Vm)	Mistura Betuminosa	EN 12697-8
Afinidade entre o agregado e betume ⁽³⁾	Agregado + Betume	EN 12697-11
Sensibilidade à água	Mistura Betuminosa	EN 12697-12
Escorrimento de betume (método de “Schellenberg”)	Mistura Betuminosa	EN 12697-18
Resistência à deformação permanente (“Wheel-Tracking”) ⁽³⁾	Mistura Betuminosa	EN 12697-22
Moldagem dos provetes	Mistura Betuminosa	EN 12697-30
Características Marshall	Mistura Betuminosa	EN 12697-34
Produção de misturas a quente	Mistura Betuminosa	EN 12697-35
Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de tráfego	Agregados	EN 13043
Misturas betuminosas – Especificação dos materiais	Mistura Betuminosa	EN 13108-1
Materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados para utilização em construção civil e construção de estradas ³	Filer Calcário	EN 13242
Especificação para betumes modificados com polímeros	Betume	EN 14023

Além das normas aplicáveis os ensaios foram enquadrados dentro dos seguintes documentos não normativos, mas de referência no âmbito nacional sendo o principal o Caderno de encargos das Infraestruturas de Portugal (CETO), Ep, Capítulos 14.03 e 15.03 Pavimentação, Setembro de 2014 e o como anexo a este documento, o caderno de encargos das Infraestruturas de Portugal (CETO), Ep: Clausulas técnicas especiais. Anexo I, P03 onde constam as normas especiais em termos de aplicação de misturas betuminosas a quente, datado de Setembro de 2014.

³ Este ensaio não foi realizado no presente estágio.

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DE UM SMA

3.1 ESTUDOS DE FORMULAÇÃO DA MISTURA

3.1.1 Formulação inicial

A formulação inicial de um pavimento SMA foi feita por Zichner ⁽⁴⁾, na época de sessenta como uma tentativa de resolver os problemas causados pelo uso de pneus pitonados. O uso do masticque era uma prática tendencial na época, mas com baixa percentagem de agregados grossos, cujo desgaste era bastante elevado devido às cargas dinâmicas que atuavam no pavimento (5).

Devido ao elevado custo de manutenção, Zichner teve como prioridade dimensionar um pavimento que fosse capaz de suportar cargas elevadas e ao mesmo tempo ter uma elevada durabilidade. Ao longo da sua formulação inicial constatou que, os agregados grossos conseguiam resistir bastante melhor às ações dinâmicas. Então, a ideia inicial do SMA consistia em criar um esqueleto mineral bastante forte em agregado grosso, preenchendo os espaços com um masticque (mistura de betume, filer e areia), sendo que a granulometria do agregado criado seria tipicamente uma mistura descontínua. Os trechos experimentais com a nova mistura consistiam em aplicar uma camada de masticque quente seguidamente pelo espalhamento de agregados de granulometria grossa e por último compactá-los com um cilindro de rasto liso. A relação em massa inicial entre masticque e agregado era 30/70, sendo que o masticque era formado por 25% de betume B80 ou B65 ⁽⁵⁾, 35% filer e 40% de areia (granulometria 0/2). Assim, a primeira mistura tipo SMA em larga escala teve as seguintes proporções descritas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Primeira composição de um SMA em larga escala

Componente	Betume B80	Filer	Agregado 0/2	Agregado 5/8
Percentagem	7,5 %	10,5 %	12,0 %	70,0 %

Como se pode verificar, não existe agregado de granulometria 2/5, sendo esta a razão pela qual a mistura é designada de descontínua.

⁴ O Dr.Zichner foi o engenheiro de nacionalidade Alemã que definiu os princípios básicos da invenção, na altura era responsável pelo laboratório central de construção de estradas em Strabag Bau AG.

⁵ A nomenclatura dos betumes B65 e B80 foram baseados na norma alemã (DIN) em que a classificação destes, era dado em função do da penetração a 25°C (pen), em que B65 seria 5,0 a 7,0 mm e B80 entre 7,0 e 10mm.

Características fundamentais de um SMA

A consequência da adoção deste tipo de mistura teve um grande problema: o escorrimento do ligante. Este é provocado pela grande quantidade de betume na mistura e pela existência de pouco material fino, logo, o betume que não está envolvido no mastique é drenado para fora através dos vazios do esqueleto mineral grosso. No início, como solução para evitar este fenómeno, foram adicionadas fibras de amianto⁽⁶⁾ como estabilizadoras de escorrimento. Após encontrar esta solução, a mistura poderia ser produzida em central, transportada e trabalhada de forma tradicional.

As misturas iniciais tiveram a seguinte denominação (Zichner, 1972):

- MASTIMAC – Relativas a misturas com espessura de 2 a 3 cm;
- MASTIPHALT – Relativas a misturas com espessura maior que 3 cm.

A formulação patenteada (US Patent Nº 3797951), é definida como uma mistura composta por 70% de agregados grossos, 12% de filer, 8% de betume e 10% de areia fina, sendo que também é referida a necessidade de adicionar estabilizantes, embora sem valor definido para a sua dosagem.

A patente tem na sua descrição as Figura 3.1 e 3.2 onde apresentam as fases após colocação e após acabamento respetivamente:

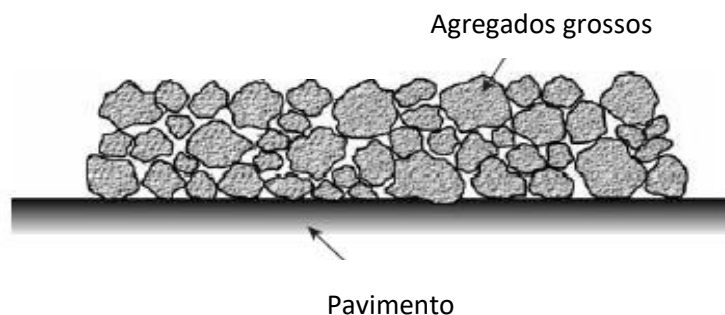


Figura 3.1 – Primeira fase da mistura de acordo com a patente após colocação (US Patent Nº 3797951)

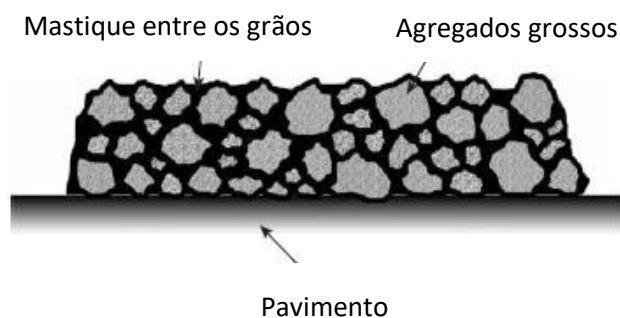


Figura 3.2 – Segunda fase da mistura de acordo com a patente após acabamento (US Patent Nº 3797951)

⁶ O Amianto foi proibido na união europeia a partir de 2005, pela diretiva 1999/77/CE, pois foi considerado um material carcinogéneo pela OMS (Organização mundial da saúde).

3.1.2 Evolução do SMA e métodos correntes

Desde a invenção do SMA, e pela sua popularidade, foram criadas outras misturas também designadas como SMA, mas com formulações bastante diferentes, ou seja, o princípio mantém-se o mesmo em relação à descontinuidade das misturas mas, a composição desta pode ser alterada significativamente.

Método preconizado pela Norma Europeia EN 13108-5

O método preconizado pela EN 13108-5 é aquele que se seguirá este trabalho, sendo o método normativo de referência na aplicação das misturas SMA nos países da União Europeia. Em linhas gerais, este método reúne alguns requisitos de outros métodos, sobretudo do “alemão” e “americano”.

As etapas de análise deste tipo de misturas serão descritas a partir do ponto 3.2.

Método “Alemão”

O método alemão é baseado na larga experiência da utilização do SMA na Alemanha. Este método, desde o início veio discutir a alteração das proporções em relação à formulação inicial proposta por Zichner.

As proporções apresentadas pelas normativas alemãs (*DAV publication*) em relação aos agregados estão na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Proporções de agregado grosso recomendados na norma alemã DAV (m/m)

Tipo de SMA	2/5 mm	5/8 mm	8/11 mm
SMA 0/8	2,5 partes	4,5 partes	---
SMA 0/8 S	2 partes	5,5 partes	---
SMA 0/11 S	1 parte	2 partes	4 partes

Legenda: S - Mistura para tráfego intenso

Verifica-se que a mistura não é muito descontínua, conforme a ideia inicial, uma vez que existem agregados em cada fuso granulométrico.

O método “alemão” tem os seguintes requisitos em termos de ensaio, segundo Blazejowski (5) ⁽⁷⁾:

1. Determinação de uma mistura de agregados, de acordo com a máxima dimensão do agregado;
2. Determinação de uma série de percentagens de betume por cada mistura;

⁷ Como os ensaios apresentados no método “alemão” se enquadram na norma 13108-5, não foram descritas as suas condições de ensaio nesta parte. Estas estão descritas no capítulo 4 (Ensaio laboratoriais).

Características fundamentais de um SMA

3. Ensaio Marshall (50 pancadas em cada face) por cada variante do SMA;
4. Determinação dos parâmetros volumétricos;
5. Seleção de uma mistura “ótima” cujos requisitos são os seguintes:
 - Os vazios nos provetes de ensaio variam entre 2,5% a 3,0%;
 - Os agregados devem estar completamente envolvidos com betume.
6. Ensaio de escorrimento pelo método de Schellenberg;
7. Ensaio “Whell tracking” test.

Método “Americano”

O método americano emergiu nos anos 90, após alguns investigadores terem verificado os benefícios do SMA aplicados nos países nórdicos e também pela experiência alemã.

O aspeto essencial da formulação de misturas neste método foi a introdução da ideia “*stone-to-stone contact*”, que define que os grãos ativos (grossos) são os responsáveis pela elevada resistência do SMA.

O método “americano” tem na sua formulação as seguintes etapas para dimensionamento:

1. Seleção de agregados: Os requisitos para a seleção de agregados são dados pelas normas AASHTO, que estabelece os critérios de correção quando a densidade dos agregados é diferente do intervalo estabelecido nas normas americanas.
2. Seleção de uma curva granulométrica: A composição adequada de uma mistura de agregados é um dos passos cruciais no processo de dimensionamento, que deve cumprir as condições seguintes:
 - A curva característica deve estar dentro dos limites do fuso granulométrico;
 - Terá de haver contacto entre agregado grosso, isto é, as partículas finas e o filer não interferem no “esqueleto” mineral, garantindo o princípio “*stone-to-stone contact*”;
3. Determinação de índice de vazios num agregado grosso compactado: Esta análise é fundamental para determinar o volume de vazios no “esqueleto” mineral da mistura, isto é, determina-se o espaço deixado para ser preenchido pelo filer, finos e betume. A análise deste parâmetro é feita pelo “*Dry-Rodded method*”;
4. Determinação da percentagem inicial de betume: O conteúdo mínimo de betume foi fixado em 6,0 %, mas deve ser ponderada uma percentagem inicial menor, afim de, verificar o mínimo ligante necessário para que a mistura se consiga realizar, ou seja, os vazios sejam preenchidos

com betume. No método “americano” ao contrário das normas europeias ⁽⁸⁾, se a densidade do agregado não for igual a 2,75, a sua correção irá ser feita através do aumento ou diminuição da percentagem de betume, em 0,1% em massa, ou seja, se a densidade for menor que 2,75, o incremento é positivo, acontecendo o contrário se a densidade for maior. Devem ser preparadas 3 misturas SMA, com percentagem de betume distinta mantendo a sua composição granulométrica, sendo que serão objeto de compactação, 4 recolhas da mesma mistura que posteriormente serão submetidos ao ensaio Marshall ⁽⁹⁾. Para o ensaio de determinação da baridade máxima teórica por cada percentagem, é feita apenas uma recolha para a sua desagregação;

5. Teste de mistura de agregados e mistura betuminosa:

Devem ser determinados os seguintes parâmetros:

- Baridade do provete compactado;
- Baridade máxima teórica da mistura;
- Teor de vazios no provete compactado;
- Valor de vazios no “esqueleto” mineral (VMA).

6. Seleção de mistura de agregado e percentagem ótima de betume pela Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Requisitos Marshall de um provete de SMA (*SMA Guidelines QIS 122*)

Propriedades	Requisitos	Notas
Percentagem mínima de betume (m/m)	6,0 %	Em função da massa volúmica do agregado
Porosidade (v/v)	≤ 4,0 %	Normalmente entre 3,5 a 4,0
VMA no “esqueleto” mineral (v/v)	≥ 17,0 %	17,5% a 18,0% (laboratório)
Estabilidade Marshall	≥ 6,2 kN	Valor Orientativo
Sensibilidade à água (%)	≥ 70,0 %	Norma AASHTO T283
Escorrimento de ligante (%)	≤ 0,3 %	Norma AASHTO T305

⁸ Na norma 12697-18 (relativamente à correção da densidade do agregado), esta faculta o intervalo 2,65-2,75 como valores de referência, e se existir necessidade de correção, esta deve ser feita recorrendo à correção da massa do agregado e não da massa de betume como acontece no método “americano”.

⁹ Os procedimentos e enquadramento normativo do ensaio Marshall estão descritos no capítulo 4.

3.2 PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS - RELAÇÕES VOLUMÉTRICAS FUNDAMENTAIS

A noção da relação massa-volume de misturas betuminosas compactadas é importante na elaboração de uma mistura betuminosa e também no momento de aplicação em obra. As medidas de volume de agregados e betume em laboratório ou em obra são difíceis de serem realizadas, e devido a este fato, as dosagens são feitas em relação à sua massa, sendo as propriedades volumétricas determinadas através de métodos de ensaios laboratoriais, em que com mais rigor se aferem as percentagens de cada componente. As misturas betuminosas possuem três componentes, agregados, betume e ar, sendo possível estabelecer relações entre as massas e os volumes destes, como se apresenta na Figura 3.3, sendo as abreviaturas apresentadas na Tabela 3.4.

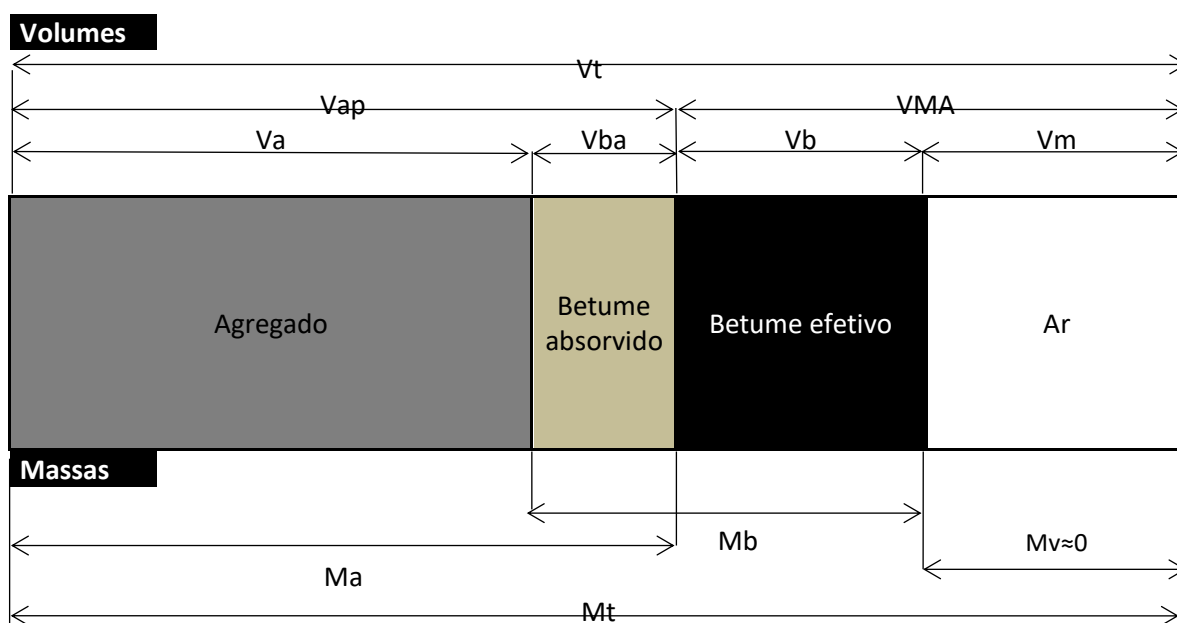


Figura 3.3 – Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (adaptado de Pavimentos,2009)

Tabela 3.4 – Abreviaturas adotadas na Figura 3.3 – Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (adaptado de Pavimentos,2009)

Abreviatura	Grandeza
Ma	Massa de agregado
Mb	Massa de betume
Mv	Massa de vazios (ar) (desprezável)
Mt	Massa total
Va	Volume de agregado
Vb	Volume de betume efetivo

Abreviatura	Grandeza
V _m	Volume de vazios ou Porosidade
V _{ba}	Volume de betume absorvido
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 o comportamento adequado da mistura betuminosa.

Dois parâmetros muito importantes são os vazios na mistura total ou o volume de vazios (V_m) 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. Inclui o volume de vazios e o volume de betume, expresso como uma percentagem do volume total, isto é, representa o volume da mistura substituindo o volume do agregado numa mistura (vazios com ar e betume).

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

A norma EN 12697-8 (12), descreve o procedimento de cálculo das duas características volumétricas fundamentais nas misturas betuminosas: O índice de vazios da mistura (V_m) e a percentagem de vazios do agregado mineral preenchido com betume (VFB).

O conhecimento destas características, pode ser importante na formulação da mistura ou como parâmetro a ser avaliado quando a mistura é compactada.

Relação básica:

$$V_a + V_b + V_v = 100\% \quad (3.1)$$

Sendo que o volume de vazios na mistura terá de ser: $VMA = V_b + V_v$

Determinação da Porosidade (Vm):

$$Vm = \frac{\rho m - \rho b}{\rho m} \times 100 (\%) \quad (3.2)$$

Onde:

Vm é o volume de vazios em percentagem, aferido a 0,1% (v/v);

pm é a baridade máxima teórica da mistura em (Mg/m³);

pb é a baridade do provete em (Mg/m³).

Determinação da percentagem de vazios no agregado mineral preenchido com betume (VFB):

$$VFB = \frac{B \times \frac{\rho A}{\rho B}}{VMA} \times 100 (\%) \quad (3.3)$$

Onde:

VFB é a percentagem de vazios no agregado mineral preenchido com betume, aferido a 0,1 % (v/v);

B é a percentagem de betume no provete, aferido a 0,1 % (v/v)

pm é a massa volúmica máxima da mistura em (Kg/m³);

VMA é o volume de vazios no agregado mineral aferido a 0,1% (v/v), de acordo com a equação (3.4)

Determinação do volume de vazios no agregado mineral:

$$VMA = Vm + B \frac{\rho b}{\rho B} \times 100\% \quad (3.4)$$

Onde:

VMA é o volume de vazios no agregado mineral aferido a 0,1% (v/v);

Vm é a porosidade em percentagem, aferido a 0,1% (v/v);

B é a percentagem de betume no provete aferido a 0,1% (v/v);

pb é a baridade do provete em (Mg/m³).

ρB é a massa volúmica do betume em (Mg/m³).

Tabela 3.5 – Características volumétricas para um SMA 8 (CETO (13))

Propriedades	Refª. Normativa	Unidade	Valores
Vazios na mistura de agregados (VMA)	EN 12697-8	%	VMA (mín) =14
Porosidade (Vm)	EN 12697-8	%	Vmín= 2,0 Vmáx= 5,0
Condições específicas do ensaio: EN 12697-8, Calculada com base na baridade máxima teórica, EN 12697-5, No cálculo da percentagem ótima de betume pelo procedimento A e EN 12697-6, No cálculo da baridade pelo procedimento B, (provete saturado com a superfície seca).			

3.3 AGREGADOS E FUSO GRANULOMÉTRICO PARA UM SMA

3.3.1 Caracterização dos agregados

A utilização de agregados, tem como objetivo a formação de um esqueleto pétreo que seja resistente à ação do tráfego, sendo a resistência dada pelo embricamento do agregado grosso. O agregado representa entre 90% a 95% em massa, de uma mistura betuminosa independentemente da sua classificação.

Os agregados podem ser classificados de várias formas: petrográfica, massa volúmica, baridade, modo de obtenção, origem e dimensão das partículas.

Granulometria

A determinação da granulometria é feita de várias formas, dependendo da sua dimensão. A análise granulométrica dos agregados é realizada através de peneiração conforme o método preconizado na norma NP EN 933-1 (14), que prescreve o método de peneiração por uma série de peneiros com abertura progressivamente decrescente. Para os agregados que constituem a mistura tipo SMA, utilizam-se os peneiros de aberturas ⁽¹⁰⁾ **11,2 mm, 8 mm, 5,6 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,125 mm e 0,063 mm**, após a implementação deste processo, verifica-se a massa retida em cada um dos peneiros e é avaliada a sua percentagem na composição final.

¹⁰ A granulometria dos agregados utilizados neste trabalho foram o 4/8 e o 0/4 (indicadas pelo fabricante e com marcação CE), logo os peneiros acima de 16 mm não foram utilizados.

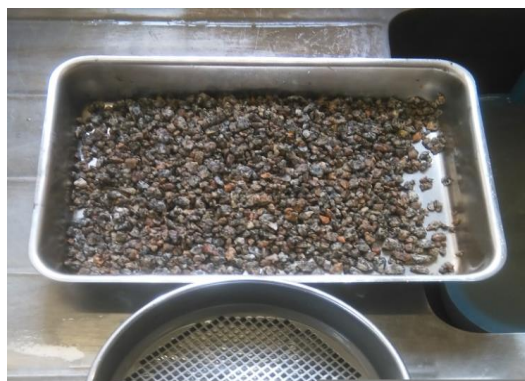


Figura 3.4 – Peneiração do agregado 4/8 lavado

Determinação das massas volúmicas

A determinação das massas volúmicas e absorção de água realiza-se em conformidade com a NP EN 1097-6 (15). Constam na mesma norma vários métodos ⁽¹¹⁾, cuja aplicabilidade depende da granulometria do agregado a estudar. Desta forma, denomina-se neste trabalho por método A, o procedimento para os agregados com dimensões entre 0,063 mm e 4 mm e por método B, a metodologia adequada a agregados com partículas entre os 4 mm e 31,5 mm.

3.3.2 Curva granulométrica base

Identificado o tipo de SMA (em relação à granulometria) que iria ser testado, procedeu-se à determinação na norma 13108-5 (4) das tabelas em função de D (neste caso: D=8 mm). A norma prevê que, para agregados para misturas betuminosas tipo SMA, a série de peneiros a utilizar será a série base+ 1 (Tabela 3.6) e juntamente com estes, ainda define um intervalo mais apertado pela Tabela 3.7, entre as percentagens mínimas e máximas dos peneiros série base e série 1.

Tabela 3.6 – Tabela Série Base+1 com as percentagens em função de D (adaptado da EN 13108-5 (4))

D	4	5 (5,6)	8	11 (11,2)	16	22 (22,4)
Peneiros (mm)	Material passado em cada peneiro, em percentagem de massa (%)					
1,4 D	100	100	100	100	100	100
D	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100
2	20 a 45	15 a 40	15 a 40	15 a 35	15 a 30	15 a 30
0,063	5,0 a 14,0	5,0 a 14,0	5,0 a 14,0	5,0 a 13,0	5,0 a 12,0	5,0 a 12,0

¹¹ O método C não foi abordado neste trabalho uma vez que a D é 8mm.

Tabela 3.7 – Limitação de percentagem de material passado em cada peneiro e peneiros adicionais (adaptado da EN 13108-5 (4))

Peneiro (aberturas em mm)	Intervalos de graduação em % a)
Peneiro característico da série entre 2 e D	10 a 25
Peneiro adicional característico da série entre 2 e D	10 a 25
Peneiro 2	5 a 15
Peneiro Característico entre 0,063 e 2	4 a 15
Peneiro adicional característico da série entre 0,063 e 2	4 a 15
Peneiro 0,063	2 a 6
a) O intervalo dado terá de respeitar os valores mínimos e máximos dados pela Tabela 3.6	

Fuso granulométrica dado pelo CETO

A composição de agregados para um SMA 8 e posterior fuso granulométrico foi determinada a partir da Tabela 3.8, de acordo com as normas CETO das Infraestruturas de Portugal, EP (13).

Como se poderá verificar, os requisitos dos agregados para um SMA 8, estão dados em função da norma e dentro dos intervalos preconizados. A partir da Tabela 3.8 apresentada, elabora-se o fuso granulométrico (Figura 3.5) para o fabrico de um SMA8.

Tabela 3.8 – Requisitos dos agregados de um SMA 8 dados pelo CETO das Infraestruturas de Portugal (13)

Peneiros Série Base + Série 1 (mm)	% Material passado
11,2 (11)	100
8	90 - 100
4	30 - 45
2	25 - 35
0,5	11 - 22
0,063	7 - 10

Fuso Granulométrico de um SMA 8 (CETO)

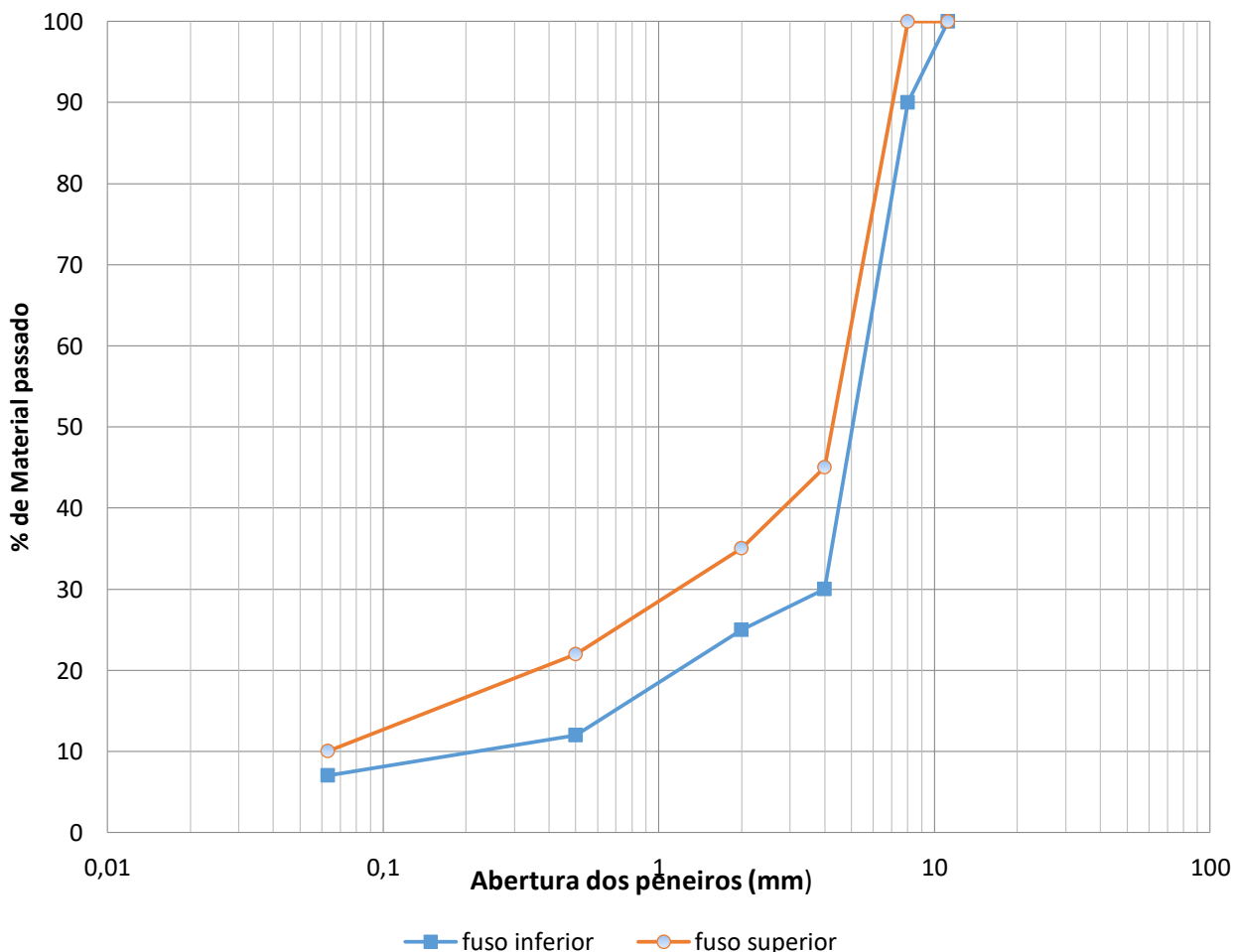


Figura 3.5 – Curvas granulométricas dadas pelo CETO

3.4 BETUME

O betume é o ligante mais usado em trabalhos de pavimentação rodoviária, para pavimentos flexíveis. O betume é um subproduto do crude de cor escura, obtido a partir da sua destilação, formado por uma mistura complexa de hidrocarbonetos e apresentando boas qualidades adesivas.

Este produto tem grande interesse no domínio da engenharia, pelas boas propriedades relacionadas com a aderência, impermeabilidade e grande durabilidade, que confere flexibilidade às misturas fabricadas com agregado mineral ou com misturas recicladas.

Os betumes devem apresentar características que cumpram os critérios estabelecidos nas especificações aplicáveis, como o CETO. Assim, de acordo com o documento referido o betume deve apresentar os requisitos e propriedades indicadas na tabela seguinte:

Tabela 3.9 – Requisitos do caderno de encargos para os betumes CETO da IP,ep (13)

Requisitos	Propriedades
Consistência a temperatura de serviço baixa	Ponto de fragilidade de Frass
Consistência a temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25°C
Consistência a temperatura de serviço alta	Temperatura de amolecimento anel e bola
Durabilidade e Resistência ao envelhecimento (RTFOT)	Varição máxima de massa Penetração retida a 25°C Aumento da temperatura de amolecimento
Outros Requisitos	Viscosidade cinemática Ponto de Inflamação

A segunda e terceira propriedade (penetração e temperatura de amolecimento), são as fundamentais na caracterização de um betume, relacionando-se diretamente com a sua consistência e as condições que este pode ser utilizado.

Os betumes utilizados no estudo de formulação no presente trabalho foram objeto de ensaios de temperatura anel e bola penetração a 25°C.

No caso das misturas do tipo SMA, a maior percentagem de betume, face às misturas tradicionais, contribui para um melhor preenchimento dos vazios da mistura de agregados, reduzindo o efeito de oxidação da mistura, assegurando uma maior durabilidade e maior resistência à fadiga do pavimento. No entanto, é pertinente avaliar a influência do envelhecimento do betume no desempenho das misturas betuminosas do tipo SMA.

De acordo com o exposto, este fenómeno, influencia significativamente o seu comportamento, aumentando a sua rigidez e viscosidade, reduzindo a ductilidade e adesividade entre o betume e os agregados. Associado a este, a flexibilidade da mistura diminui, tornando-se menos resistente às deformações, mais suscetível de fendilhar e apresentar por consequência fenómenos tipo “pele de crocodilo”.

Características fundamentais de um SMA



Figura 3.6 – Patologia tipo "Pele de crocodilo" devido às ações climáticas e perda de flexibilidade do betume (Ipe.ws, 2017)

O CETO (13) das infraestruturas de Portugal no ponto 2.2 descreve o seguinte:

“O ligante a utilizar será o definido em projeto.

A percentagem de ligante mínimo será de 6,0 % sobre a mistura, devendo ser justificado, mediante os correspondentes ensaios de laboratório, nomeadamente resultantes do estudo Marshall.

A determinação da percentagem ótima de ligante será obtida através do método Marshall (confirmada e/ou ajustada com ensaios posteriores)”.

Conclui-se através da Figura 3.7, que o betume sofre grande parte do seu envelhecimento durante os processos de fabrico, transporte e compactação. O processo de envelhecimento prossegue após conclusão dos trabalhos de aplicação da mistura betuminosa, essencialmente devido as ações climáticas (radiação solar e variações de temperatura).

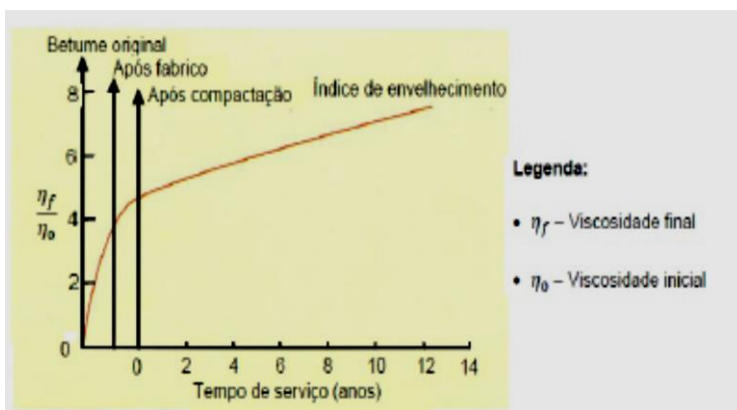


Figura 3.7 – Evolução do índice de envelhecimento ao longo do tempo (Shell, 2003)

3.4.1 Denominação de betumes

Os betumes, sejam eles modificados ou não, têm uma nomenclatura técnica independente do fabricante. Tipicamente nos betumes tradicionais é dada pelo intervalo mínimo e máximo dos valores da

penetração, exceto no caso dos modificados, para além da penetração, é referida a temperatura mínima anel e bola.

São definidas ainda as temperaturas orientativas de trabalho, como:

Ts – Temperatura a que a mistura deve ser fabricada ou produzida, ou seja, a junção entre o agregado, o betume e aditivos caso sejam necessários.



Figura 3.8 – Produção de mistura em central (motaengil.com, 2017)

Tc – Temperatura a que a mistura deve ser compactada, isto é, a temperatura em que a mistura deve ser colocada no local pelo camião na espalhadora momentos antes da passagem dos cilindros de compactação.



Figura 3.9 – Colocação em obra da mistura betuminosa (apresentando as três fases de aplicação)
(asfaltodequalidade.pt, 2017)

A título de exemplo, a Cepsa, a fornecedora dos ligantes betuminosos para este estudo, tem na sua gama de betumes, as mais variadas soluções, com aplicabilidade em praticamente todas as soluções de pavimentação. É importante referir que esta mesma empresa tem atividade contínua de investigação e desenvolvimento na área dos produtos betuminosos, tendo alguns produtos de última geração

Características fundamentais de um SMA

fornecidos pela empresa para a formulação das misturas betuminosas, sobretudo o mais recente betume de pavimentação: O RAF AV (designação comercial).



Figura 3.10 – Centro de investigação da CEPSA em Madrid (Cepsa, 2017)

Cada tipo de betume tem uma aplicação específica e com características técnicas diferentes.

A nomenclatura técnica da CEPSA e a sua gama de aplicação de tipo de betume é apresentada na Tabela 3.10:

Tabela 3.10 – Resumo técnico de betumes e aplicações recomendadas pela CEPSA

Nomenclatura técnica	Tipo	T _s ⁽¹²⁾	T _c ⁽¹³⁾	pen ⁽¹⁴⁾	Tab ⁽¹⁵⁾	Aplicações
10/20	Tradicional	170	165	10 a 20	60 a 76	Misturas de Alto Módulo
35/50	Tradicional	162	155	35 a 50	50 a 58	Misturas betuminosas a quente
50/70	Tradicional	155	150	50 a 70	46 a 54	Misturas betuminosas a quente
160/220	Tradicional	>100		160 a 220	35 a 43	Regas c/ gravilha e Misturas com reciclado quente
BT 35/50	Tradicional	135	125	35 a 50	50 a 58	Misturas Temperadas ou em tempos de colocação ou transporte prolongados
BT 50/70	Tradicional	135	125	50 a 70	46 a 54	Misturas Temperadas e em tempos de colocação ou transporte prolongados

¹² Ts - Temperatura aconselhada pelo produtor para a execução da mistura +/- 5°C

¹³ Tc - Temperatura aconselhada pelo produtor para a compactação da mistura +/- 5°C

¹⁴ Penetração, 25°C, 5s, agulha de 100 gr (Pen25) em décimos de mm.

¹⁵ Temperatura de amolecimento - Método anel e bola (Tab) em °C.

PMB 10/40-70	Modificado	175	165	10 a 40	> 70	Misturas de alto módulo e reforços
PMB 45/80-65	Modificado	165	160	45 a 80	> 65	Misturas Descontínuas (SMA), drenantes e resistentes à fadiga
PMB 45/80-75	Modificado	180	175	45 a 80	> 75	Misturas com elevada percentagem de vazios, anti Rodeiras e fissuras
BT PMB 45/80-65	Modificado	135	130	45 a 80	> 65	Misturas Temperadas e em tempos de transporte ou colocação prolongados
BT PMB 45/80-75	Modificado	140 185	135 180	45 a 80	> 75	Misturas de elevado desempenho, anti fissuras e rodeiras, elevada percentagem de vazios ou de elevado tempo de colocação ou transporte.
BBM 35/50	Borracha	175	170	35 a 50	> 65	Misturas de alto módulo e reforços, drenantes e zonas com temperaturas elevadas
BBM 35/50 PMB 25/55-65 C	Borracha e Modificado	175	170	35 a 50	> 65	Misturas drenantes, descontínuas e resistentes à fadiga, camadas de desgaste fortemente solicitadas
BMC 3C PMB 45/80-65-C	Borracha e Modificado	175	170	45 a 80	> 65	Misturas drenantes, descontínuas e resistente à fadiga e para camadas de desgaste fortemente solicitadas

3.4.2 Betumes tradicionais

Os betumes tradicionais são os mais usados em Portugal (sobretudo os tipos 35/50 e 50/70), são os mais indicados para misturas tipo “contínuas” do tipo AC. O uso contínuo deste tipo de solução prende-se com a boa trabalhabilidade e economia face aos betumes modificados.

3.4.3 Betumes modificados

Estes betumes conferem às misturas betuminosas uma maior resposta às ações do tráfego, maior resistência ao envelhecimento durante a utilização e aumento da eficácia na drenagem superficial.

Os betumes modificados são fundamentalmente uma mistura de betume com aditivos, entre os quais os mais utilizados (Shell, 2016 (16)):

- Elastómeros, tipo SBS (estireno-butadieno-estireno);
- Plastómeros, tipo EVA (etileno-acetato de vinilo);
- Resinas e endurecedores. (Normalmente usados em emulsões betuminosas – Misturas a frio).

Características fundamentais de um SMA

Em Portugal, um dos tipos de betumes modificados mais utilizados é aquele em que o aditivo é um elastómetro, sendo regularmente aplicado no fabrico de misturas betuminosas porosas destinadas à camada de desgaste.

O betume modificado deve apresentar o aditivo (polímeros) e o betume ligados entre si, formando duas fases contínuas. Caso a mistura seja realizada de forma inadequada, ou exista incompatibilidade química entre o aditivo e o betume, podem formar-se duas fases distintas, uma com predominância de betume e outra com predominância de aditivo. Em ambas as situações, as características do betume não serão as mais indicadas para a sua utilização.

Como referido anteriormente, um dos betumes modificado mais utilizado no fabrico de misturas betuminosas flexíveis é o betume com adição de elastómetro SBS. Esta solução permite um aumento do ponto de amolecimento anel e bola do betume e uma redução da penetração a 25 °C, favorecendo a flexibilidade e ductilidade a baixas temperaturas, uma vez que se está perante um betume mais flexível. Numa mistura betuminosa com a adição de polímero SBS, uma das principais funções do aditivo é aumentar a sua resistência à deformação permanente. Além disso, a utilização deste aditivo irá permitir obter um novo padrão na viscosidade do ligante em função da variação da temperatura, obtendo-se maior viscosidade, contribuindo para uma maior adesividade, durante o processo de fabrico, e melhor compactação da mistura betuminosa.

Nas misturas betuminosas do tipo SMA é normalmente utilizado o betume modificado pois apresenta vantagens ao nível da coesão e da adesividade, redução da deformação permanente e aumento da vida à fadiga, contribuindo para uma melhor preservação da macrotextura do pavimento.

3.5 INIBIDORES DE ESCORRIMENTO (ADITIVOS E FIBRAS)

A ocorrência de escorrimento de betume e/ou mástique betuminoso é um problema frequente nas misturas betuminosas do tipo SMA. O fato destas terem uma granulometria descontínua, com elevada percentagem de agregados grossos, e de terem geralmente percentagens de ligante relativamente altas, conduz a um aumento da suscetibilidade de escorrimento do ligante, durante o armazenamento, transporte e aplicação, o que poderia provocar heterogeneidades nas características da camada após aplicação, levando conseqüentemente à sua degradação precoce.

Considera-se geralmente que, as fibras não têm influência sobre o desempenho da mistura depois da compactação, embora possibilitem um maior conteúdo em ligante, o que gera uma película mais espessa em torno do agregado. Esta vantagem serve para aumentar a resistência ao desgaste da mistura betuminosa.

Num estudo realizado por Brown *et al.* (1997), para avaliar o efeito do tipo de estabilizador selecionado, foram submetidas a um ensaio de escorrimento cinco misturas equivalentes, com diferentes temperaturas alvo.

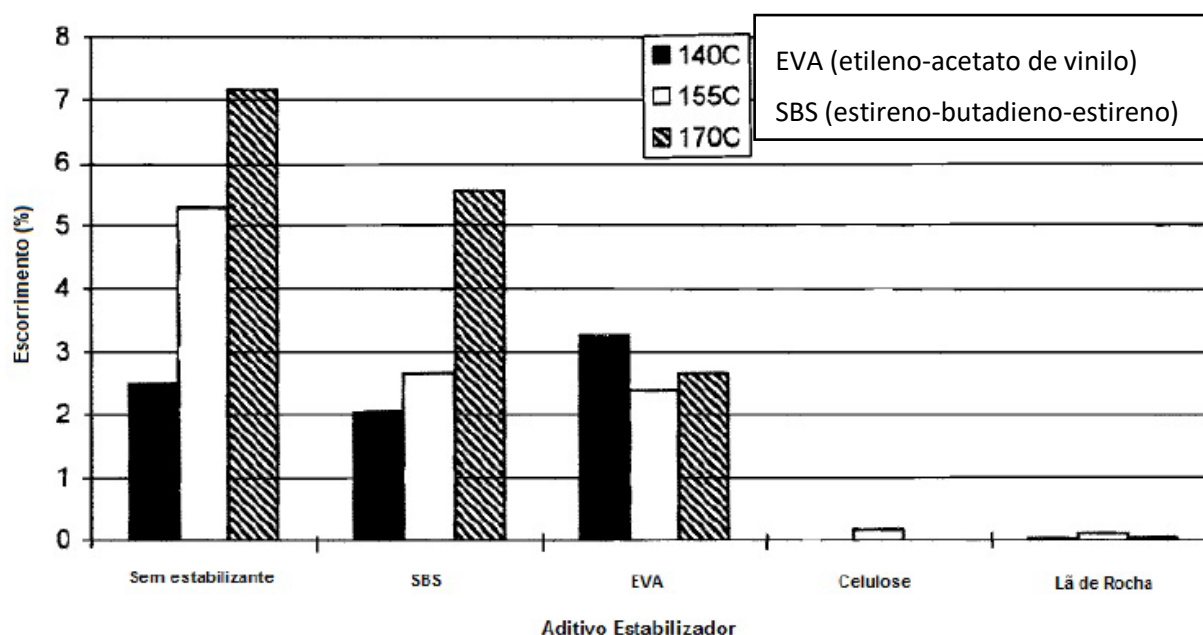


Figura 3.11 – Escorrimento em função de diferentes estabilizadores e temperaturas (Brown,1997)

A determinação do teor de fibras na mistura betuminosa baseia-se principalmente na experiência, encontrando-se várias publicações que sugerem os valores de 0,3% a 0,5%. Contudo, existem ensaios para verificar se as fibras são suficientes para inibir o escorrimento do ligante sendo os normalizados pela EN 12697-18 (1) através do método *Schellenberg*, ou pelo método do cesto¹⁶. É imprescindível o desenvolvimento destes ensaios, porque a dosagem do teor de fibras tem como objetivo a redução dos custos da produção da mistura, otimizando uma quantidade mínima para impedir o escorrimento.

O CETO (13) das infraestruturas de Portugal, refere no ponto 2.3 da sua redação o seguinte:

“Para assegurar a estabilidade do mástique betuminoso, atendendo ao acréscimo de ligante que permite conferir uma maior durabilidade e melhor desempenho a este tipo de mistura comparativamente com uma mistura do tipo AC, preconiza-se a aplicação de fibras celulósicas, que irão atuar como agente fixador do betume, nomeadamente durante o transporte e aplicação.

As fibras celulósicas deverão apresentar-se na forma de granulado composto por fibras recobertas de betume. A sua função é a de elemento estabilizante para misturas asfálticas de maior durabilidade e

¹⁶ O método *Schellenberg*, pode ser realizado com pequenas quantidades de mistura enquanto pelo método do cesto, é necessário uma maior massa de mistura e com maior tempo de realização de ensaio (Norma EN 12697-18)

Características fundamentais de um SMA

elevado desempenho. A percentagem do granulado de fibras deverá ser superior ou igual a 0,30 %, em peso, da mistura”.



Figura 3.12 – Escorrimento de ligante num SMA sem fibras (Daniela Antunes,2014)

3.5.1 Fibras celulósicas simples

A fibra de celulose tem a vantagem de ser mais económica, visto ser obtida com grande facilidade. Essas fibras podem ser utilizadas sem tratamento ou em forma de granulado (*pellet*), onde parte deste é composto por fibra e parte por betume, ou separadas do betume. As fibras quando não estão impregnadas com ligante não se conseguem dispersar adequadamente na mistura, devido as mesmas serem fortemente unidas, formando grânulos durante o processo de mistura e aumentando o tempo de mistura.



Figura 3.13 – Fibras de celulose simples (engenhariacivil.com, 2017)

Embora sejam definidas características físicas para as fibras, verifica-se que a sua dimensão pode condicionar a trabalhabilidade e homogeneidade da mistura.

3.5.2 Fibras celulósicas impregnadas com betume

As fibras impregnadas com betume são normalmente mais fáceis de transportar e conseguem ser colocadas na mistura sem qualquer preparação adicional.

Apresentam as seguintes vantagens:

- Dispersão rápida e completa;
- Inodora e livre de pó;
- Insensibilidade à humidade;
- Facilidade de dosagem;
- Produção de mistura mais homogénea.

A incorporação, em misturas betuminosas com elevado conteúdo de betume, como o caso do SMA, de fibras de celulose com ceras, assenta num duplo objetivo:

- Por um lado, garantir a estabilidade da mistura e a inexistência de escorrimento do ligante, o que de acordo com o referido anteriormente é conseguido com a adição de fibras de celulose;
- Por outro lado, influenciar a viscosidade do ligante, através da adição das fibras que contêm betume na sua composição.



Figura 3.14 – Fibras impregnadas com betume

3.5.3 Fibras têxteis

Um dos tipos de fibras têxteis comercializado em Portugal para aplicação em misturas betuminosas denominam-se *Asphalt +*, sendo um produto comercializado pela Fisipe. Estas fibras assumem um efeito ligante na mistura através da formação de uma rede coesiva tridimensional, que melhora as propriedades mecânicas e durabilidade dos pavimentos.

Características fundamentais de um SMA

As fibras acima referidas permitem uma temperatura de exposição até 220 °C (para curta duração) e são aconselhadas em proporções de dosagem na ordem dos 0,10 a 0,15% para aplicação em camadas drenantes e dos 0,15 a 0,30% para outras aplicações.



Figura 3.15 – Fibras Têxteis

A ideia de utilizar este tipo de inibidor surge numa tentativa de rentabilizar a solução SMA com um custo mais baixo.

3.5.4 Fibras de PVC

Foi idealizado no início do estudo de formulação a adição de aparas de PVC tendo sido adotada a mesma proporção dos restantes inibidores. No entanto esta solução viu-se impraticável devido às características plásticas deste material, sendo dada explicação mais detalhada no capítulo 5.



Figura 3.16 – Resíduos de PVC utilizados na formulação da mistura

3.6 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA

Os métodos de formulação de misturas betuminosas têm como objetivo determinar as proporções de agregados e betume, com o objetivo de obter um tipo de mistura económico e competitivo mas com as características mecânicas apropriadas à função a que este se destina.

Portanto deve ser feita uma avaliação completa às características da mistura, sendo as principais a seguir referidas:

3.6.1 Características Marshall

É um método empírico para a formulação da mistura betuminosa, sendo misturados os agregados e betume em percentagens definidas na norma EN 13108-1 (17). As percentagens de betume são alteradas para cada grupo de provetes numa taxa fixa de 0,5%.

As características Marshall são um requisito obrigatório para satisfazer os critérios definidos no caderno de encargos das Infraestruturas de Portugal.



Figura 3.17 – Execução da mistura

Neste ensaio, depois de ser feita a mistura existem duas fases distintas mas que podem ser feitas em contínuo:

Na 1ª fase é compactado a mistura com um compactador de impacto (Figura 3.18 a)) e através do banho de água (Figura 3.18 b)), em que se satura o provete, é determinada a baridade (ρ_m) e com o ensaio de compressão (esmagamento) (Figura 3.18 c)), são determinadas as forças de rotura (S) e a deformação correspondente (F).

Características fundamentais de um SMA



Figura 3.18 – a) Compactador de impacto; b) Banho de água; c) Ensaio de compressão

Na 2ª fase, a mistura betuminosa é totalmente desagregada, evitando que haja vazios nesta, sendo o procedimento descrito no capítulo 4. É determinada a baridade máxima teórica (ρ_{mv}) e, sendo relacionada com a baridade aparente referida no ponto anterior, são obtidos os valores da porosidade (V_m), volume de vazios na mistura (VMA) e vazios preenchidos por betume (VFB).



Figura 3.19 – Desagregação da mistura para o ensaio de determinação da baridade máxima teórica

Nesta fase é determinada a baridade máxima teórica (ρ_{mv}) e, sendo relacionada com a baridade aparente referida no ponto anterior, são obtidos os valores da porosidade (V_m), volume de vazios na mistura (VMA) e vazios preenchidos por betume (VFB), e dever ser verificados os valores previstos na Tabela 3.11

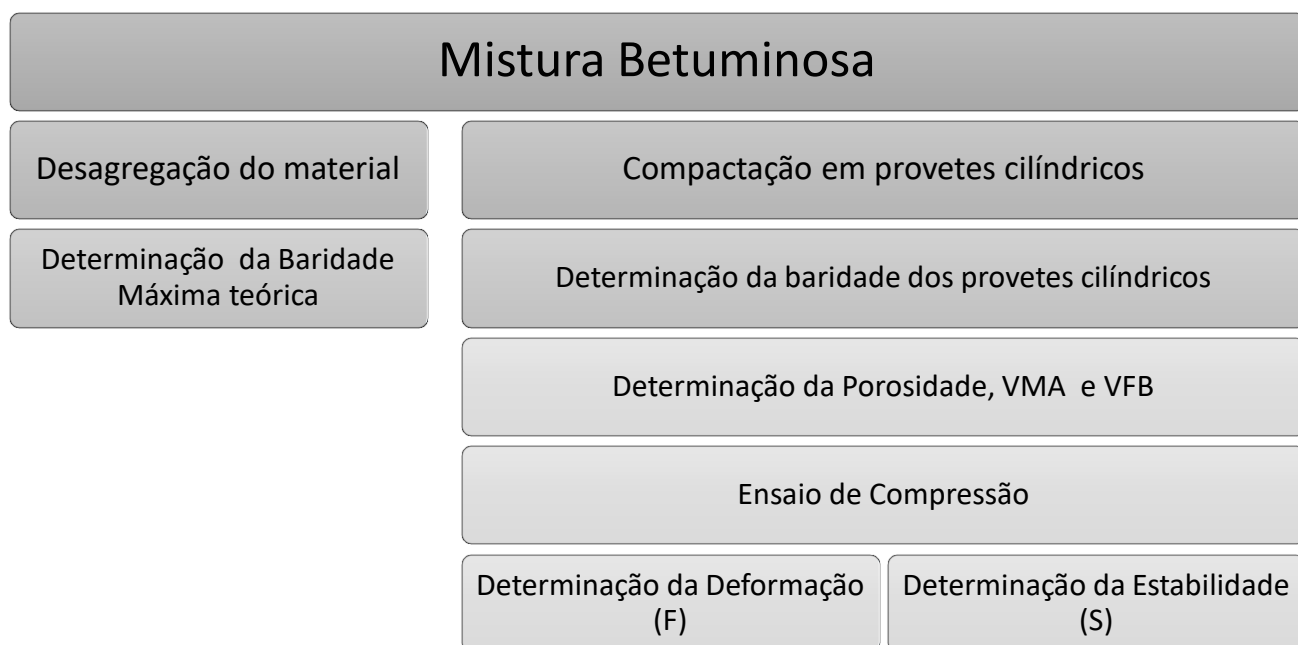


Figura 3.20 – Sequência de ensaios pelo método Marshall

Tabela 3.11 – Características Marshall para um SMA 8 (CETO (13))

Propriedades	Refª. Normativa	Unidade	Valores
Estabilidade Máxima	EN 12697-34	kN	S 17,5
Estabilidade Mínima	EN 12697-34	kN	S 7,5
Deformação Máxima	EN 12697-34	mm	F 4
Deformação Mínima	EN 12697-34	mm	F 2
Quociente Marshall	EN 12697-34	kN/mm	Qmin = 3
Condições específicas do ensaio: 50 pancadas em cada face de acordo com a norma EN 12697-34 (2)			

3.6.2 Determinação da sensibilidade à água (ITSR)

O indicador de sensibilidade à água está estabelecido na norma 12697-12 (3) e serve para determinar o quociente da resistência à tração indireta entre provetes que estão acondicionados em condições severas (ITS_w) comparando com condições menos severas (ITS_d). Esse quociente é denominado como ITSR.



Figura 3.21 – Ensaio à tração indireta

Tabela 3.12 – Requisitos para o Índice de sensibilidade à água, para um SMA 8 (CETO)

Propriedades	Refª. Normativa	Unidade	Valores
ITRS – Sensibilidade à água	EN 12697-12	%	Mínimo: ITRS 90 (90%)
Condições específicas do ensaio: 50 pancadas em cada face de acordo com a norma EN 12697-34 (2)			

3.7 DESEMPENHO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

As propriedades das misturas betuminosas são suscetíveis de sofrer alterações no seu desempenho, caso haja um desvio das propriedades que a compõem.

Na Tabela 3.13, apresentam-se as definições de cada propriedade juntamente com os fatores que as influenciam.

No âmbito deste estudo as propriedades fundamentais a ter em conta no estudo de formulação da mistura betuminosa tipo SMA, são a Estabilidade e a Flexibilidade. Na aplicação em obra, um aspeto a ter em conta é a sua trabalhabilidade, enquanto como a longo prazo, a mistura poderá ser avaliada por todos os parâmetros que contam na Tabela 3.13, à exceção da trabalhabilidade.

Tabela 3.13 – Fatores que afetam o desempenho das misturas betuminosas a quente

Propriedade	Definição	Fator desestabilizador
Estabilidade	Capacidade de resistir às deformações pelas cargas de serviço. Depende da fricção interna dos materiais e da sua coesão	Granulometria, Percentagem e rigidez do betume
Durabilidade	Resistência à degradação causado pelas cargas e pelos efeitos da exposição ao clima	Granulometria, Percentagem e rigidez do betume e Grau de compactação
Flexibilidade	Capacidade de deformação e adaptação das camadas a assentamentos das camadas inferiores	Granulometria, Percentagem de betume, Grau de compactação e Sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Resistência aos esforços repetidos sem fendilhação	Granulometria, Percentagem e rigidez do betume, Grau de compactação e Temperatura da mistura
Aderência	Resistência ao deslizamento e à derrapagem	Granulometria, Textura e tipo de agregado e Resistência ao polimento
Impermeabilidade	Estanquidade	Granulometria, Percentagem de betume e Grau de compactação
Trabalhabilidade	Facilidade de espalhamento e compactação	Granulometria, Percentagem e tipo de betume, Tipo de agregado e Aditivos

CAPÍTULO 4

ENSAIOS LABORATORIAIS (METODOLOGIA EXPERIMENTAL)

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos os ensaios realizados, articulados com as referências normativas e o CETO das infraestruturas de Portugal (13) , os procedimentos de cada ensaio realizado, sendo referidos ainda os equipamentos necessários para a sua execução.

O CETO (13) das Infraestruturas de Portugal, no ponto 3.2 sua redação, requer como obrigatório no estudo de formulação de misturas betuminosas o seguinte:

“Para a determinação da percentagem ótima em ligante, deverão realizar-se, em fase experimental (Estudo e Trecho Experimental) os seguintes ensaios de avaliação de desempenho:

a) Determinação da porosidade e de outras características de compacidade, de acordo com a norma EN 12697-8;

b) Ensaio de escorrimento de ligante pelo método Schellenberg, de acordo com a norma EN 12697-18.

c) Ensaio de avaliação da sensibilidade à água, ITRSR, de acordo com a norma EN 12697- 12;

d) Ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente, de acordo com a norma EN 12697-22.”

4.2 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS

As misturas betuminosas produzidas em laboratório estão enquadradas na norma EN 12697-35 (18) que define as condições laboratoriais a adotar no fabrico das misturas, em relação às temperaturas do agregado, betume e mistura e também em relação aos tempos de execução.

4.2.1 Componentes das misturas betuminosas

Agregados e filer

Os agregados e o filer representam cerca de 94% em massa da mistura betuminosa, sendo que os agregados são de proveniência granítica, constituídos por três granulometrias determinadas através de peneiração e o filer de origem calcária.

A ponderação de cada agregado foi distribuída de modo a conseguir cumprir o fuso granulométrico definido no CETO (13), na Figura 3.5.

A determinação da granulometria foi realizada através da execução de ensaios de peneiração, embora que no caso do filer calcário tivesse sido adotada a denominação declarada pelo produtor (ver fichas de produto), sendo que a granulometria obtida se encontra apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Agregados e filer da mistura betuminosa

% Passados no Peneiro	Agregado 1 (0/4)	Agregado 2 (4/8)	Agregado 3 (8/11,2)	Filer Calcário
16,00 mm	100 %	100 %	100 %	100 %
11,20 mm	100 %	100 %	100 %	100 %
8,000 mm	100 %	100 %	0 %	100 %
5,600 mm	96 %	43 %	0 %	100 %
4,000 mm	83 %	14 %	0 %	100 %
2,000 mm	63 %	8 %	0 %	100 %
1,000 mm	46 %	7 %	0 %	100 %
0,500 mm	32 %	6 %	0 %	100 %
0,250 mm	21 %	5 %	0 %	100 %
0,125 mm	13 %	3 %	0 %	99 %
0,063 mm	8,0%	3,0 %	0 %	83,5 %
% NA MISTURA	30 %	60 %	4 %	6 %



Figura 4.1 –Diferentes tipos de agregados e filer

Betumes

Os betumes têm a função de ligante entre os agregados e representam cerca de 6% da mistura betuminosa (consoante a dosagem). Neste trabalho, utilizaram-se três tipos de betumes distintos.

Tabela 4.2 – Betumes utilizados na formulação

Denominação do Betume	Tipologia
35/50	Tradicional
PMB 45/80-65 (ELASTER 14/60)	Modificado com polímeros SBS
PMB 45/80-75 (RAF AV)	Modificado com polímeros SBS

A percentagem mínima de betume pode ser definida nos documentos relacionados com a aplicação do produto e deve ser selecionado com uma aproximação de 0,1%, entre valores de 4,6% e 7,6% para uma mistura em que a densidade do agregado é aferida para estar no intervalo entre 2,65 e 2,75.

No entanto, segundo o CETO, para a formulação de uma mistura tipo SMA é definido a percentagem mínima de betume de 6,0%, sendo que as variações devem ter um intervalo de 0,5%.



Figura 4.2 – Betume modificado

Fibras

As fibras são utilizadas como aditivo estabilizador para evitar o escorrimento de parte da mistura (rica em betume de e agregado fino) quer durante o processo de fabrico, transporte e aplicação da mistura SMA, quer durante a sua vida útil em serviço. Se não forem adicionadas fibras, ou se forem adicionadas em doses inadequadas, provavelmente irão ser observados pontos de exsudação e de segregação no pavimento. Em termos de proveniência, as fibras podem ser de origem orgânica ou inorgânica, sendo as mais utilizadas as de origem orgânica, nomeadamente as fibras de celulose, devido à sua capacidade de absorção. Neste trabalho foram usados três tipos de fibras, cujas características principais e as percentagens em massa são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Fibras utilizadas na formulação das misturas betuminosas

FIBRAS	Características principais (Aplicabilidade nas misturas betuminosas)	Percentagem utilizada
Viatop Premium®	As fibras Viatop Premium®, são fibras de celulose impregnadas com betume especialmente designadas para aplicação em misturas betuminosas com elevada percentagem de betume	0,3 %
Sintéticas	O uso de fibras sintéticas (subproduto da industria têxtil), foi um dos intuitos deste estudo de formulação	0,3 %
PVC (aparas)	O PVC (subproduto da industria da construção) foi um dos intuitos deste estudo de formulação.	0,3 %

4.2.2 Produção das misturas em laboratório

A produção das misturas betuminosas em laboratório está enquadrada na norma EN 12697-35 (19), que define as condições a satisfazer em relação aos equipamentos e procedimentos de ensaio.

As misturas betuminosas são preparadas a uma temperatura de mistura de laboratório alvo dentro de um tempo que é limitado a fim de reduzir a degradação mecânica dos agregados e a degradação térmica do ligante.

Controlo da temperatura

Segundo a EN 12697-35 (19), a temperatura máxima da realização da mistura em laboratório deve ser 20°C superior em relação à temperatura de referência declarada pelo produtor em betumes não modificados. A temperatura alvo deve ser escolhida de modo a que a mistura tenha arrefecido para a temperatura de compactação, mas não deve ser superior à máxima temperatura.

As temperaturas foram controladas em estufa do LGMC e estabelecidas de acordo com o prescrito nas normas de produto de cada betume. Na Tabela 4.4, mostra-se as temperaturas de trabalho (mistura e compactação), a que foram sujeitos os componentes da mistura e na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Temperaturas de mistura e compactação

Betume	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura da Mistura (°C)		Temperatura Compactação (°C)	
		Selecionada	Ficha de produto	Selecionada	Ficha de produto
AC 35/50	185	162	160-165	155	150-160
PMB 45/80-65	180	170	160-170	165	155-165
PMB 45/80-75	190	182	175-185	175	170-180

Tabela 4.5 – Tempos e temperaturas de uso da estufa ventilada

Componentes	Tempo de aquecimento	Temperatura e observações
Agregados	24 horas	110 ± 5°C (Secagem do agregado)
Agregados + Filer	3 horas	A temperatura da mistura é dada em função de cada tipo de betume
Betume	1 hora	

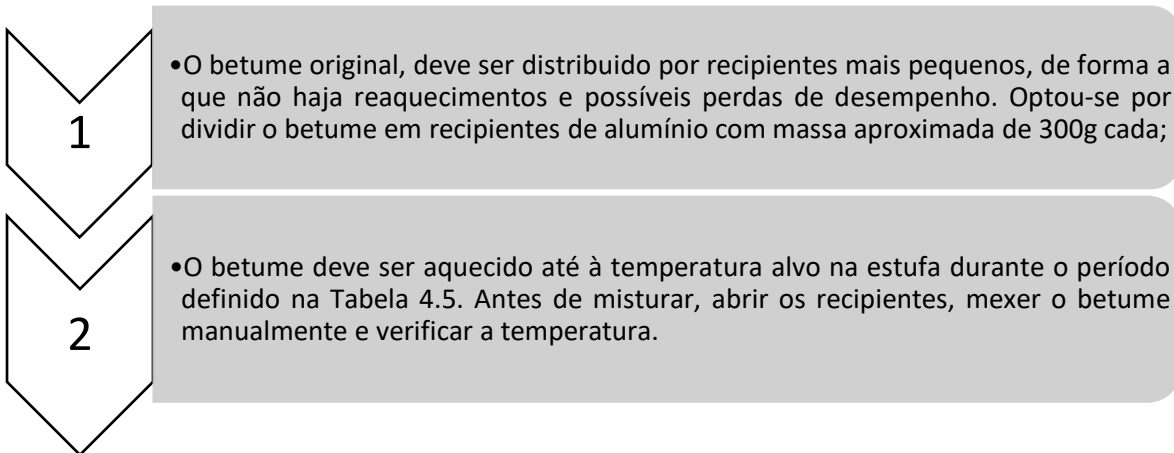
Preparação do agregado, filer e fibras

A sequência de preparação, tem a seguinte ordem:

- 1 •O agregado mineral deve consistir da mistura do agregado com as diferentes dimensões, em função da percentagem de betume a incluir na amostra;
- 2 •Os agregados e o filer, são pesados com uma exatidão de 0,1g. A quantidade medida deve corresponder à composição da mistura betuminosa e da massa do conjunto a ser produzido;
- 3 •Pesar as fibras com a mesma exatidão dos componentes minerais;
- 4 •Os agregados e o filler foram aquecidos na estufa até à temperatura da mistura definida na tabela 4.4 e consoante o tempo prescrito pela tabela 4.5

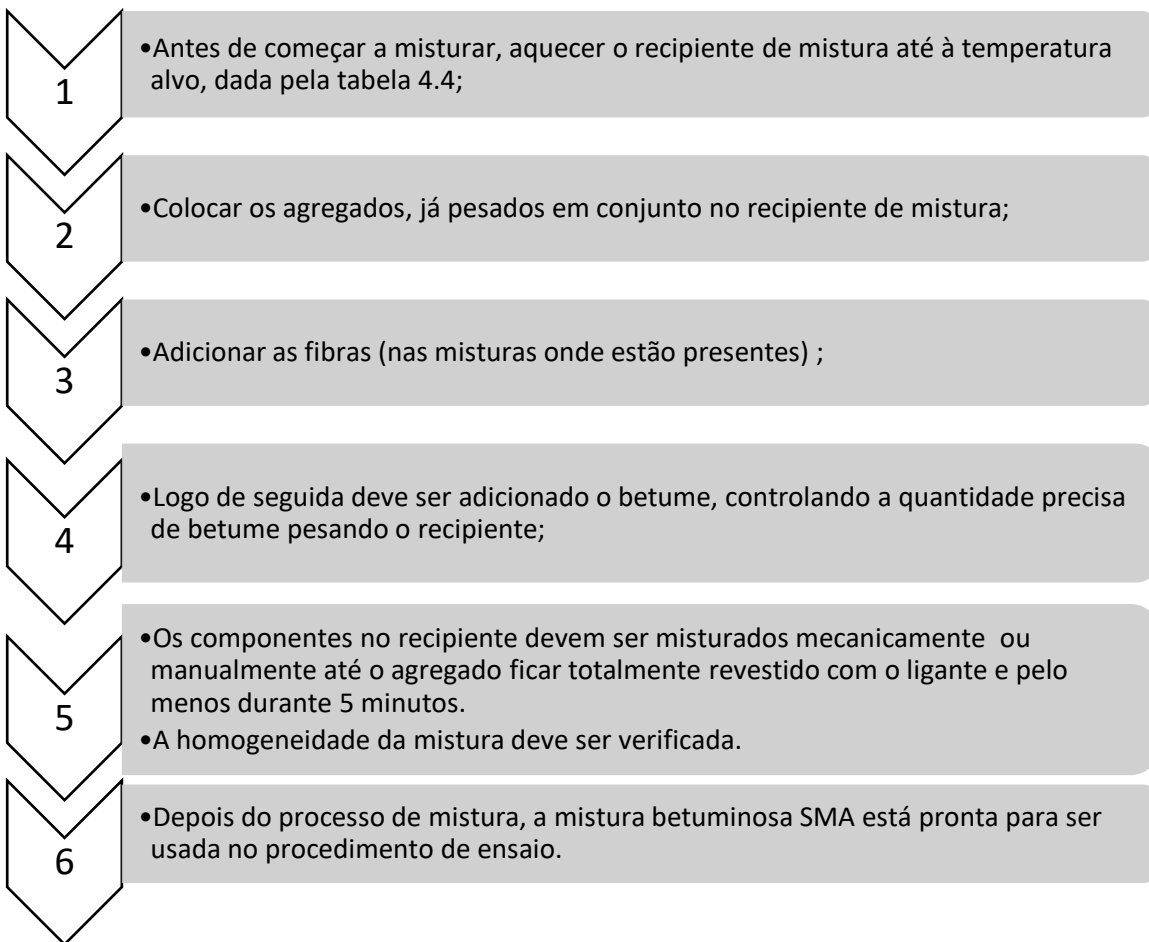
Preparação do betume

A sequência de preparação tem a seguinte ordem:



Sequência de mistura

A sequência da execução da mistura, tem a seguinte ordem:



Equipamento para a execução das misturas

Misturadora

Algumas misturas, tiveram de ser feitas recorrendo a um agitador mecânico, mas a maior parte, especialmente com massas totais abaixo dos 2kg, realizaram-se manualmente, e de acordo com os tempos prescritos na norma, garantindo que o agregado era devidamente envolvido com betume.



Figura 4.3 – Execução manual de uma mistura betuminosa

Estufa ventilada

A estufa utilizada para o aquecimento da mistura é programável com erro $\pm 1^{\circ}\text{C}$, com alcance máximo de 220°C . As temperaturas e tempos de aquecimento, em função de cada componente foram dados segundo a Tabela 4.5.



Figura 4.4 – Estufa ventilada do LGMC

Balança

Ensaio laboratoriais

A balança utilizada é digital tem alcance de 12kg com a precisão de +/- 0,1g. Todos os agregados e betumes foram pesados neste equipamento.

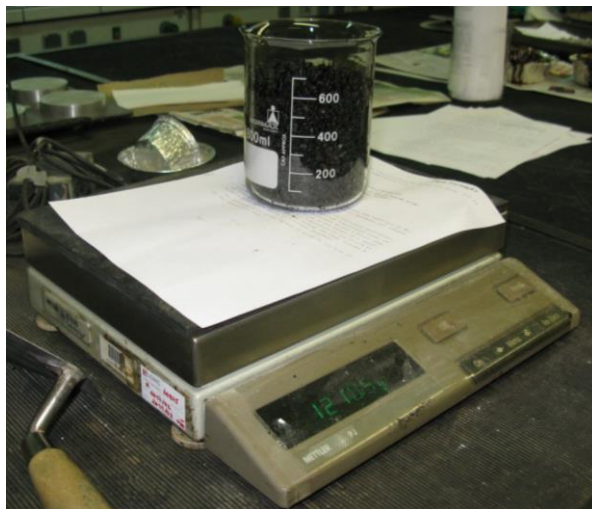


Figura 4.5 – Balança digital do LGMC

Manta térmica e recipiente de mistura

O recipiente de mistura é constituído em ferro, impedindo de se deformar em altas temperaturas e devido à ação dinâmica provocado pela misturadora enquanto, a manta térmica tem a função de manter a temperatura enquanto a mistura é executada.

Segundo a norma, a temperatura de mistura, não deve variar mais que 5°C da recomendação do fabricante, e o tempo de mistura (por meios mecânicos) deve ser de pelo menos 5 minutos a fim de obter uma mistura homogénea.



Figura 4.6 – Recipiente metálico e manta térmica

4.3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

4.3.1 Ensaio de penetração em Betume

Âmbito e enquadramento normativo

O ensaio de penetração de betume está descrito na norma EN 1426 (20). Este ensaio tem como objetivo determinar a consistência do betume por meio de uma agulha de referência que penetra verticalmente numa amostra de ligante segundo os padrões normalizados como demonstrado na Figura 4.8. O ensaio de penetração é uma reprodução em laboratório das condições normais de serviço, mas este é por si só um ensaio classificativo, não podendo ser interpretado como um ensaio de caracterização final uma vez que não determina a qualidade do ligante betuminoso (Alves,2011 (10)).



Figura 4.7 – Execução de ensaio de penetração em betume

Verifica-se que as classes elevadas de penetração são recomendadas para climas frios e classes baixas de penetração são recomendadas para climas quentes.

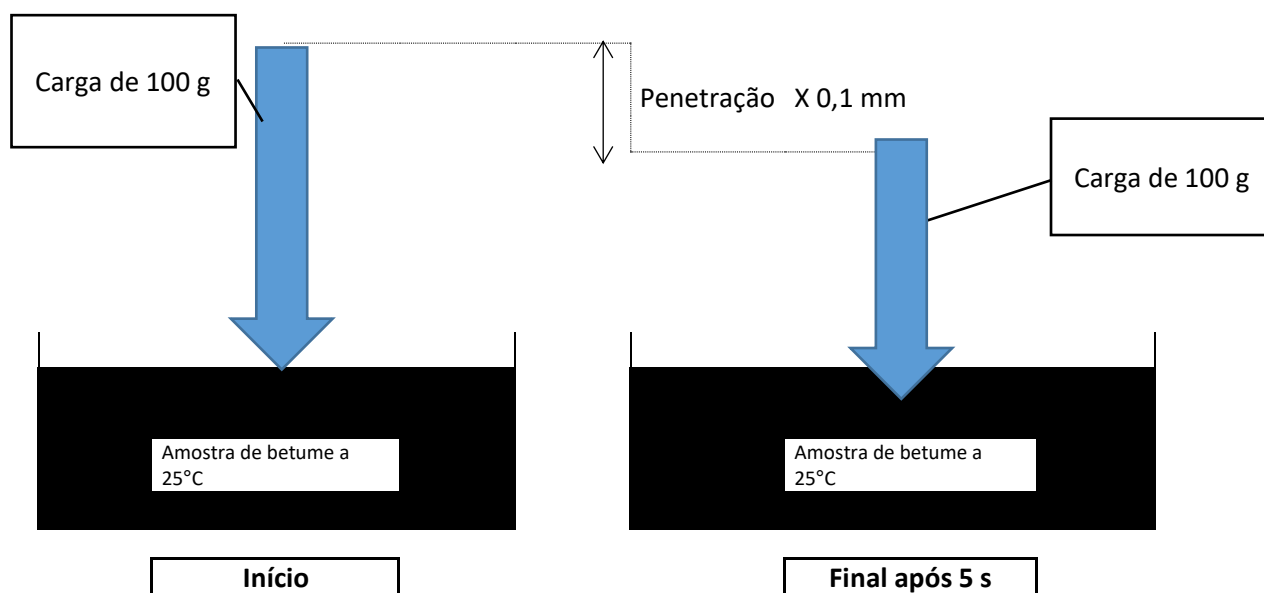


Figura 4.8 – Esquema de ensaio de penetração de betume

Procedimento de Ensaio

Na realização deste ensaio são utilizados os seguintes equipamentos devidamente calibrados:

- 3 Agulhas de Penetração;
- Penetrómetro com comparador (Figura 4.9);
- Estufa;
- Termómetro;
- Sonda de temperatura;
- Cronómetro;
- Banho termostático.



Figura 4.9 – Penetrómetro com comparador (petrodidatica.com, 2017)

A temperatura da amostra foi aumentada a 100°C + temperatura de amolecimento mínima esperada para betumes tradicionais. Enquanto para betumes modificados com polímeros, de acordo com a EN 14023 (21) a temperatura de preparação do provete será 180°C a 200°C . A temperatura de preparação do provete nunca deve exceder os 200°C independentemente da temperatura de amolecimento.

Permitir o arrefecimento do provete à temperatura ambiente (entre 15°C e 30°C), da seguinte forma:

- Para provetes <45mm profundidade – arrefecer entre 60 e 90 mín;
- Para provetes 45 a 60 mm profundidade – arrefecer entre 90 e 120 mín;
- Para provetes com volume > 180 ml – arrefecer entre 60 e 90 mín por cada 100ml de provete.

Colocar o provete em banho de água por igual período do arrefecimento e dar início ao ensaio.

As condições de ensaio são realizadas de acordo com a penetração esperada (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Condições de ensaio em função da penetração esperada

Penetração Esperada	Carga (g)	Temperatura (°C)	Duração (s)
Inferiores a 330 x 0,1 mm	100	25	5
Iguais ou superiores a 330 x 0,1 mm	100	15	5

Devem ser executadas pelo menos três medições válidas em três pontos diferentes da superfície do provete, a mais de 10 mm da margem do recipiente do provete e a mais de 10 mm das restantes medições. É usada uma agulha limpa para cada determinação, do ensaio de penetração.

Critérios de validação

Para ensaios realizados sob as condições de temperatura de 25°C, carga aplicada de 100g e duração de carga de 5 s, as três determinações serão aceitáveis se a gama de resultados obedecer aos valores da tabela abaixo.

Tabela 4.7 – Gama de validação de resultados do ensaio de penetração

Penetração (0,1 mm)	< 49	50 a 149	250 a 349	>350
Diferença entre a maior e menor determinação	2	4	6	8

Considerações

Apesar de a penetração ser um conceito abstrato, apresenta correlações com propriedades intrínsecas do betume, nomeadamente com a viscosidade. A relação entre as duas propriedades sob condições em que a penetração seja inferior a 330 x 0,1 mm (Tabela 4.6) é dada pela equação:

$$\eta = A \cdot P^{-b} \quad (4.1)$$

Onde: η e P designam respetivamente a viscosidade dinâmica (em Pa.s) e a penetração (em décimas de mm). Foi proposto por Duriez e Arrambide (21) para o coeficiente A o valor 8×10^6 para betumes moles (classe 180/220) e 10^7 para betumes mais duros (classe de 40/50). O valor de b é 1,93 para todos os tipos de betume.

O índice de penetração é dado através da equação 4.2:

$$I_{pen} = \frac{20Tab + 500 \log(\text{pen}25) - 1955,55}{Tab - 50 \log(\text{pen}25) + 120,15} \quad (4.2)$$

Onde:

Pen25 é a penetração em milímetros a 25°C;

Tab é a temperatura de amolecimento anel e bola (°C).

(Neste trabalho não se determinou o índice de penetração (Ipen))

4.3.2 Ensaio de determinação de temperatura anel e bola

Âmbito e enquadramento normativo

O ensaio de determinação temperatura anel e bola está descrito na norma EN 1427 (23). Este ensaio tem como objetivo determinar a temperatura a qual o betume atinge uma certa consistência. O princípio baseia-se em moldar dois discos horizontais em betume e aquece-los num banho líquido com uma taxa de evolução de temperatura controlada (entre 4,4°C e 5,6°C por minuto), sendo que cada um deles suporta uma esfera de aço. A determinação da temperatura de amolecimento é calculada pela média das temperaturas em que cada esfera cai a uma altura de 25,0mm±0,4mm.



Figura 4.10 – Ensaio de determinação de temperatura anel e bola

Os banhos líquidos e temperaturas iniciais foram determinados em função da temperatura de amolecimento como é demonstrado na tabela seguinte:

Tabela 4.8 – Definição do banho líquido em função da temperatura de amolecimento

Líquido do Banho	Temperatura Esperada (°C)	Temperatura Inicial (°C)	Varição do Resultado (°C)
Água	Entre 30 e 80	5	±0,2
Glicerina	Entre 80 a 150	30	±0,5

Procedimento de Ensaio

Na realização deste ensaio são utilizados os seguintes equipamentos:

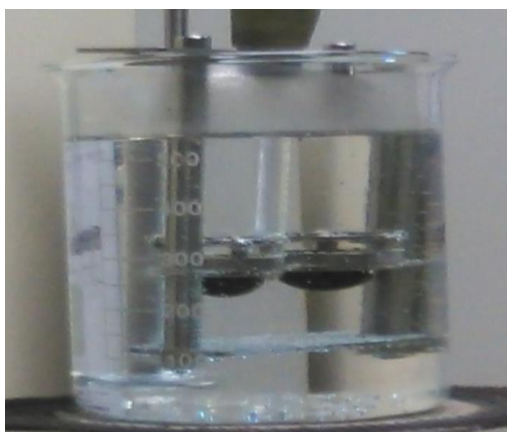
- Conjuntos anéis e bolas;
- Cronómetro;
- Estufa;
- Agitador;
- Termómetro ($\leq 80^{\circ}\text{C}$);
- Termómetro ($> 80^{\circ}\text{C}$).

Sendo escolhido o banho líquido a partir dos requisitos da Tabela 4.8, o ensaio é executado da seguinte forma:

Para estabelecer a temperatura inicial de ensaio, colocar o banho em água gelada ou num aparelho termostático, para o arrefecer até $(5\pm 1)^{\circ}\text{C}$ (quando o banho é de água), ou aquecê-lo lentamente até atingir $(30\pm 1)^{\circ}\text{C}$ (quando o banho é de glicerina), temperaturas que devem ser mantidas durante um mínimo de 15 minutos e no máximo 20 minutos com o dispositivo colocado.

Quando se inicia o aquecimento e a agitação da água, verificar temperatura do líquido. Se não se encontra nos limites estabelecidos, se isso não acontecer, o ensaio não deve ser continuado.

Quando água é usada como banho, os 3 primeiros minutos são para ajustar a taxa de aumento da temperatura em entre $4,4^{\circ}\text{C}$ e $5,6^{\circ}\text{C}$ por minuto. Quando a glicerina é usada como banho a temperatura entre 30°C e 60°C serve para ajustar a taxa de aumento da temperatura entre $4,4^{\circ}\text{C}$ e $5,6^{\circ}\text{C}$ por minuto e a temperatura deve estar em $(60\pm 1)^{\circ}\text{C}$ após 6 min de ensaio.



a) Início do ensaio



b) Final do ensaio, quando a bola envolvida com a membrana toca a placa inferior

Figura 4.11 – a) e b) Execução de ensaio de determinação de temperatura anel e bola

Ensaio laboratoriais

Critério de validação

Após os 3 primeiros minutos (em água) ou a partir dos 60°C (em glicerina), a temperatura deve aumentar entre 4,4°C e 5,6°C cada minuto medido, e o aumento da temperatura no final do ensaio deve estar entre $\pm 1^\circ\text{C}$ do número de minutos (em decimais) $\times 5^\circ\text{C}$, caso contrário, o ensaio deve ser descontinuado.

Para cada ensaio anel e bola, registrar a temperatura indicada pelo dispositivo de temperatura, no instante que a bola atinge a plataforma inferior.

Se a diferença entre as duas temperaturas exceder 1°C para pontos de amolecimento inferiores a 80°C ou exceder 2°C para pontos de amolecimentos superiores a 80°C , o ensaio deve ser repetido. Também se deve repetir o ensaio, se a bola rasgar a membrana de ligante betuminoso que a envolve antes de tocar a placa inferior ou verificando-se um descolamento parcial do ligante betuminoso da bola.

Considerações

Verifica-se que o ponto de amolecimento representa a capacidade resistente de um betume às temperaturas elevadas e a deformações permanentes, sendo que os betumes mais duros e modificados têm ponto de amolecimento maiores, e por consequente, tornam-se betumes mais resistentes na mistura betuminosa.

4.3.3 Ensaio de determinação da curva granulométrica dos agregados

Âmbito e enquadramento normativo

A norma 933-1 (14) estabelece o método de referência para determinação da curva granulométrica dos agregados lavados por via de peneiração com dimensão nominal até 90mm, não incluindo os fileres.

Procedimento de Ensaio

Neste ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Peneiros de ensaio de acordo com a norma EN 933-2 (24);
- Estufa ventilada;
- Equipamentos de lavagem;
- Balanças com exatidão a 0,1g;
- Tabuleiros e escovas.

A amostra deve obedecer aos requisitos da norma NP EN 932-2 (25), de modo a obter a massa mínima de provete. Os agregados situam-se no fuso 0/8, através do quadro 1 apresentado na norma EN 933-1 (14), temos: D=8mm corresponderá uma massa de provete mínima de 0,6 kg.

O provete segundo a norma é aquecido a uma temperatura de 110 ± 5 °C até alcançar massa constante⁽¹⁷⁾. O agregado foi deixado a arrefecer durante 24h e após este tempo foi pesado e determinada a massa **M1**.

A amostra é lavada e agitada sobre um peneiro de 0,063 mm previamente molhado em ambas as faces. Nesta fase passa-se à lavagem do agregado, sendo que se dá como terminada quando a água fica isenta de partículas finas, ou seja, passa através do peneiro e sai límpida. O material retido é então seco à mesma temperatura anterior e após esta secagem é determinada a sua massa **M2**.

É constituída uma coluna de peneiros de ordem decrescente em relação à abertura, definidos pela norma EN 13108-5 (4) pela Tabela 3.6 e pela Tabela 3.7 em que a amostra é vertida e logo de seguida peneirada, sendo que cada massa retida em cada peneiro é pesada e registada como **Rn**. O fundo do peneiro (passados no peneiro 0,063), é registado como **P** (finos).



Figura 4.12 – Material retido num peneiro a ser preparado para a determinação da sua massa

Critério de validação

O ensaio terá de ser repetido se a soma $\Sigma(R_i+P)$ varie mais que 1% de M2, sendo

R_i a soma da massa de material retido em cada peneiro (**R₁,..., R_{n-1},R_n**)

¹⁷ Considera-se Massa constante como a massa determinada por pesagens consecutivas de com pelo menos 1h de intervalo em que a massa não varia mais que 0,1%.

Considerações

O resultado é dado sobre a forma de uma curva granulométrica onde, a massa retida em cada peneiro é definida como uma percentagem em relação à massa inicial seca.

A percentagem de finos **f** (passados no peneiro 0,063) é dada pela equação:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde:

M1 – é a massa seca do provete de ensaio em quilogramas

M2 – é a massa seca do material retido no peneiro 0,063 em quilogramas

P – é a massa retida no fundo após peneiração em quilogramas

4.3.4 Ensaio de determinação da massa volúmica do agregado

Âmbito e enquadramento normativo

A determinação das massas volúmicas e absorção de água realiza-se em conformidade com a NP EN 1097-6 (15). Constam na mesma norma vários métodos, cuja aplicabilidade depende da granulometria do agregado a estudar. Desta forma, denomina-se neste trabalho por **método A**, o procedimento previsto na norma para os agregados com dimensões entre 0,063 mm e 4 mm, por **método B** a metodologia adequada a agregados com partículas entre os 4 mm e 31,5 mm e por **método C**¹⁸ o procedimento a aplicar em agregados com dimensões entre 31,5 mm e 63 mm.⁽¹⁹⁾

Procedimento de Ensaio

Na realização deste ensaio são utilizados os seguintes equipamentos:

- Equipamentos de lavagem;
- Balanças com exatidão a 0,1g;
- Tabuleiros e escovas;
- Picnómetro;
- Molde troncocónico;
- Panos absorventes.

¹⁸ O método C não foi abordado neste trabalho uma vez que a Dimensão máxima nominal é 8mm.

¹⁹ A separação dos agregados por granulometrias já foi descrita no subcapítulo anterior – Análise granulométrica.

Método A (Picnómetro) Dimensão do agregado abaixo dos 4 mm

É designado método A, o procedimento de determinação das massas volúmicas e absorção de água para agregados cujas dimensões compreendem o intervalo de 0,063mm e 4mm. Este método é definido na norma como o método do picnómetro. Anteriormente à realização do ensaio, a amostra de agregado foi reduzida a uma massa igual ou superior a 1kg pelo procedimento definido na EN 932-2 (25). O provete é lavado sobre o peneiro de 4mm e 0,063mm e é deixado imerso em água durante um período de $(24 \pm 0,5)$ h.



Figura 4.13 – Picnómetro com água após remoção de ar

Após o período de imersão, o provete é colocado no interior do picnómetro com água, onde o ar é removido. Posteriormente faz-se transbordar o picnómetro por adição de água e este é selado para impossibilitar a entrada de ar no seu interior (Figura 4.13). O picnómetro é seco por fora, e depois é determinada a massa **M2** e a temperatura da água (t).

A água do picnómetro é retirada e o provete é colocado sobre um tabuleiro distribuído numa camada uniforme, expondo-o a uma corrente de ar por forma a eliminar a humidade superficial visível, sendo remexido para garantir uma secagem homogénea. Após esse passo, o provete é colocado no interior de um molde troncocónico de metal sobre a base de um tabuleiro. De seguida compacta-se levemente o provete com um pilão em 25 pancadas segundo a norma EN 932-2 (26).



Figura 4.14 – Colocação e compactação do provete no molde troncocónico (Gameiro, (26))

Após a retirada do molde, se o provete mantiver a sua forma troncocónica, prossegue-se com o processo de secagem até que o cone de agregado se deforme após desmoldagem



Figura 4.15 – Forma do provete após desmoldagem (Gameiro, (26))

O provete saturado com superfície seca é definido como **M1**, resultante do processo anterior e após secagem a (110±5) °C até massa constante – determinação de **M4**. É determinado o peso do picnómetro com água - **M3**.

Com os valores registados durante o procedimento é possível calcular as seguintes variáveis:

- Massa volúmica do material impermeável das partículas (**pa**)

$$\rho_a = \frac{M_1}{\frac{(M_4 - (M_2 - M_3))}{\rho_w}} \tag{4.4}$$

- Massa volúmica das partículas secas em estufa (**prd**)

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{\frac{(M_1 - (M_2 - M_3))}{\rho_w}} \tag{4.5}$$

- Massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca (**pssd**)

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{\frac{(M_1 - (M_2 - M_3))}{\rho_w}} \tag{4.6}$$

- Absorção de água

$$\rho_{sd} = \frac{100 \times (M1 - M4)}{M4} \quad (4.7)$$

(M1, M2, M3 e M4 estão supracitados) e ρ_w dado pela equação 4.10

Método B Dimensão do agregado entre os 4 mm e os 31,5 mm

O método B tem aplicabilidade em agregados com dimensões entre 4mm e 31,5mm. De acordo com a respetiva norma, a determinação das massas volúmicas e absorção de água deste tipo de agregados, realiza-se recorrendo ao picnómetro também utilizado no método A, embora com algumas diferenças no que diz respeito ao seu procedimento (26).

Em concordância com o método anterior, a massa de agregado é reduzida pelo procedimento descrito na EN 932-2 (24) a uma massa superior a um valor mínimo que varia consoante a máxima dimensão do agregado. Lava-se o provete sobre o peneiro de 31,5mm e 4mm e deixa-se o mesmo imerso em água durante um período de $(24 \pm 0,5)$ h.



Figura 4.16 – Absorção de água pelo procedimento B (Gameiro (26))

Em relação ao método A, a diferença será fase da eliminação da água superficial, uma vez que o provete é transferido para cima de um pano, de forma a absorver as partículas de água. Transfere-se o provete com a superfície seca para um tabuleiro, regista-se a sua massa antes e depois de seco a (110 ± 5) °C até massa constante como procedido no ponto anterior.

As equações para a determinação das variáveis são as mesmas que no procedimento A.

4.3.5 Ensaio de escorrimento de ligante (Método de Schellenberg)

Âmbito e enquadramento normativo

A norma europeia EN 12697-18 (1) apresenta dois métodos para determinar o escorrimento do ligante. O método do cesto e o método de Schellenberg. Neste trabalho, foi adotado o segundo método.

Ensaio laboratoriais

O método de Schellenberg descreve um método para determinar a escorrimento de ligante de misturas betuminosas. É aplicável a misturas betuminosas não porosas. Pode ser utilizado quer para determinar a quantidade de material perdido por escorrimento após 1h à temperatura de ensaio, quer através do resíduo retido num copo do qual se verteu o conteúdo.

Procedimento de Ensaio

Neste ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Estufa com sistema de ventilação fechado;
- 3 Copos graduados com capacidade superior a 800 ml (base= 100 ± 5 mm) marcados
- Balança com precisão $\pm 0,1$ g;
- Caixas metálicas;
- Termómetro (alcance 200 °C);
- Peneiro abertura 1mm;
- Cronómetro.

Em primeiro lugar, foram verificadas as massas volúmicas dos agregados e adaptados para os valores referentes na norma. No caso da densidade do agregado sair fora do intervalo prescrito na Tabela 4.9, teria de ser feita uma correção de forma que o volume de agregado fosse equivalente a 1 kg de agregado prescrito na mesma tabela.

Tabela 4.9 – Determinação da massa de agregado para o ensaio de Schellenberg

Massa do provete requerida da norma	Intervalo de densidade do agregado
$1000 \pm 0,1$ g	2,65 a 2,75

São numerados três copos de vidro e colocados na estufa à temperatura de ensaio determinada em função do tipo de betume de acordo com a norma EN 12697-35 (19), resumida na Tabela 4.10, por um período mínimo de 15 minutos sendo determinada a sua massa de seguida - determinação de **W1**.

Tabela 4.10 – Temperaturas a definir para o ensaio de Schellenberg

Tipo de betume	Temperatura a colocar na estufa (°C)
Tradicional	Temperatura da mistura + 25
Modificado	Temperatura da mistura + 15

De acordo com a norma de ensaio EN 12697-35 (18), cada lote de agregados foi misturado com a quantidade definida de betume, sendo os inibidores de escorrimento (fibras), incorporados na mistura betuminosa de acordo com as definições do fabricante. Logo de seguida é retirado cada copo numerado da estufa e, transferido o provete para o copo como exemplificado na Figura 4.17. É pesado o conjunto com exatidão de 0,1g – determinação de **W2**.

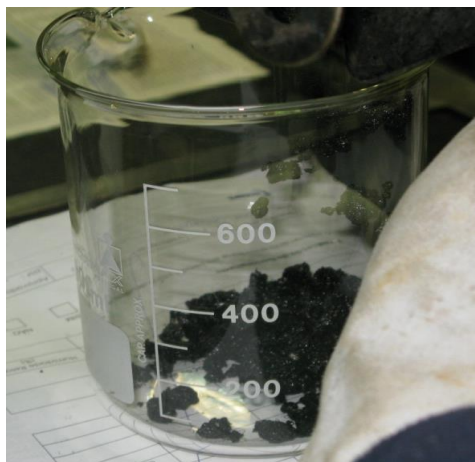


Figura 4.17 – Transferência do provete para o copo numerado

Após (60 ± 1) min, o primeiro copo é retirado da estufa e é medida a temperatura do provete. Todos os primeiros copos são rejeitados, pois apenas servem para validar a temperatura, sendo apenas determinadas as massas dos segundos e terceiros provetes.



Figura 4.18 – Massa de betume vertida do copo

Os restantes copos são removidos da estufa após cumprindo o tempo previsto (60 ± 1) min. Imediatamente após a remoção dos copos da estufa, cada um deles é invertido durante (10 ± 1) s para uma bandeja metálica revestida por papel como visto na Figura 4.18. Após o arrefecimento, os copos com o resíduo, são pesados com exatidão de 0,1g – massa **W3**.

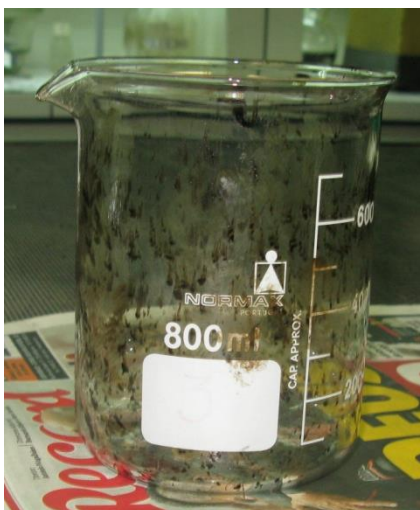


Figura 4.19 – Resíduo retido no copo

Critério de validação

No caso o resíduo conter mais de 0,5% da mistura inicial em massa, e é obvio que o resíduo pode não ser apenas betume escorrido, mas também argamassa betuminosa e/ou partículas de agregados, neste caso, o resíduo deve ser lavado com solvente no peneiro de 1mm. O material retido no peneiro é lavado e seco com exatidão de 0,1g – massa **W4**.

Na avaliação de diferentes percentagens de betume, os ensaios devem ser iniciados pela percentagem menor em betume (nos modificados a 6%) e deve ser repetido todo o procedimento com incrementos de 0,3% em massa de betume.

A determinação do material escorrido **D** e o resíduo **R** (em percentagem) é dada pelas equações:

$$D = 100 \times \frac{(W3 - W1 - W4)}{(W2 - W1)} \quad (4.8)$$

$$R = 100 \times \frac{(W4)}{(W2 - W1)} \quad (4.9)$$

Considerações

O ensaio de escorrimento de betume avalia a suscetibilidade da mistura betuminosa “perder” o betume durante o seu tempo de serviço. Avalia também o efeito de drenagem na variação de finos na mistura, de adição de fibras inibidoras de escorrimento e no tipo de betume utilizado.

Segundo o caderno de encargos das Infraestruturas de Portugal (13), a percentagem de escorrimento **D** do betume máximo é de 0,3%.

4.3.6 Ensaio de determinação da baridade das misturas betuminosas

Âmbito e enquadramento normativo

A norma 12697-6 (27) estabelece o método de referência para determinação da baridade dos provetes das misturas betuminosas.

A **Baridade** é definida 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. Para uma determinada mistura betuminosa, a baridade tem influência no desempenho dessa mistura betuminosa (resistência mecânica e módulo de rigidez), pelo que é uma medida indireta da sua “qualidade”. (Lopes, (7)).

Existem quatro métodos de ensaio para a determinação da baridade de uma mistura:

Tabela 4.11 – Tipos de ensaios de baridade segundo a EN 12697-6 (27)

Método	Designação	Aplicabilidade
A	Seca	Para provetes com superfície muito fechada
B	Saturado com superfície seca	Para provetes com superfície fechada
C	Selado	Para provetes com superfície aberta ou grosseira
D	Por dimensões	Para provetes com forma regular: Cilindros e Prismas

No presente trabalho apenas se trabalhou com o método **B** e devido às características da mistura, (conforme a aplicabilidade dada na Tabela 4.11).

Procedimento de Ensaio

Para o método **B**, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- Balança, com uma resolução de 0,1 g, capaz de pesar a o provete imerso em água;
- Banho de água, com uma temperatura uniforme com uma exatidão de $\pm 1,0$ °C (deve possuir uma rede metálica para permitir a circulação de água à volta do provete);
- Termómetro, com resolução de $\pm 1,0$ °C;
- Paquímetro;
- Panos secos e papel absorvente.



Figura 4.20 – Banho de água e balança

Método B: Baridade – provete saturado com a superfície seca (SSD)

A sequência de ensaio tem a seguinte ordem de execução:

- 1 •Determinação da massa do provete seco (**M1**).
- 2 •Determinação da temperatura da água de ensaio (**T1**)
- 3 •O provete é imerso no banho de água a uma temperatura **T1**. O provete é saturado durante um período aproximadamente de 30 minutos.
•*Geralmente, o período de saturação é de pelo menos 30 min mas não deverá ser superior a 3h*
- 4 •É determinada a massa do provete saturado quando imerso (**M2**), sendo que a leitura só deve ser feita quando este esteja completamente estável, isto é, não apresentem variações na leitura.
- 5 •O provete é removido do banho de água e seca a sua superfície com um pano húmido
- 6 •É determinada, através de pesagem ao ar, a massa do provete saturado com a superfície seca (**M3**).



Figura 4.21 – Colocação dos provetes em banho de água (etapa 3) e determinação da massa do provete saturado com a superfície seca (etapa 6)

Método D: Baridade pelo método geométrico

Para a determinação da baridade geométrica em provetes regulares, tivemos de recorrer à determinação das suas dimensões segundo a norma EN 12697-29 (28):

- 1
 - Realização de 4 medições igualmente espaçadas à altura.
 - *Os locais destas medições devem-se encontrar marcadas no provete. A medição à altura deve-se realizar aproximadamente a 10 mm (para dentro) do bordo do provete*
- 2
 - Realização de:
 - 2 medições ao diâmetro perpendiculares entre si no topo do provete;
 - 2 medições ao diâmetro perpendiculares entre si no centro do provete;
 - 2 medições ao diâmetro perpendiculares entre si na base do provete.
- 3
 - Determinação da massa do provete seco (m_1)



Figura 4.22 – Determinação das dimensões dos provetes

Critério de validação

Durante o período de saturação a temperatura é registada 3 vezes. A temperatura de ensaio será a que resulta da média destas 3 (a variação da temperatura das 3 leituras não pode ser superior a 2,0 °C. No caso de ser superior a 2,0°C, repetir o ensaio).

A dimensão dos provetes deverá ser:

$$b= 101\pm 3 \text{ mm e } h= 63,5 \pm 3 \text{ mm}$$

Para obtenção dos resultados das baridades pelos dois métodos acima descritos, teremos de calcular pelas seguintes expressões:

- Determinação da densidade da água (ρ_w) a uma temperatura t

$$\rho_w = 1,00025205 + \left(\frac{7,59t - 5,32t^2}{10^6} \right) \quad (4.10)$$

Onde:

ρ_w é a densidade da água à temperatura de ensaio arredondada a $1 \cdot 10^{-4}$

T é a temperatura da água na execução do ensaio em °C

- Determinação da baridade do provete com a superfície seca (ρ_{ssd}) (Método B)

$$\rho_{ssd} = \frac{(m_1)}{(m_3 - m_2)} \times \rho_w \quad (4.11)$$

Onde:

ρ_w é a densidade da água à temperatura de ensaio em arredondada a $1 \cdot 10^{-4}$

m_1 é a massa do provete seco em gramas (gr)

m_2 é a massa do provete submerso em água em gramas (gr)

m_3 é a massa do provete saturado com a superfície seca em gramas (gr)

ρ_{ssd} é a densidade do provete com superfície seca em arredondada a $1 \cdot 10^{-4}$

- Determinação da densidade do provete pelas dimensões (ρ_{bdim}) (Método D)

(Para provetes cilíndricos)

$$\rho_{bdim} = \frac{(m_1)}{\left(\frac{\pi}{4} \times h \times d^2\right)} \times 1000 \quad (4.12)$$

Onde:

m₁ é a massa do provete seco em gramas (gr)

h é a altura do provete em milímetros (mm)

d é o diâmetro do provete em milímetros (mm)

Considerações

A determinação da baridade da mistura betuminosa é um requisito fundamental para a avaliação da mistura betuminosa e está diretamente ligado com a determinação das características Marshall (Figura 3.20)

4.3.7 Ensaio de determinação da Baridade máxima teórica

Âmbito e enquadramento normativo

A norma EN 12697-5 (12) descreve três métodos para determinar a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa:

Tabela 4.12 – Tipos de ensaios de baridade segundo a EN 12697-5 (12)

Método	Designação	Aplicabilidade
A	Volumétrico	O volume da amostra é medido com o auxílio de um picnómetro, com o deslocamento da água na amostra
B	Hidrostático	O volume da amostra é calculado a partir do princípio da hidrostática (<i>o volume é calculado através da massa de água deslocada quando o corpo é imerso – impulso</i>)
C	Matemático	É calculada a partir da sua composição (percentagem de ligante, percentagem de agregados e percentagem de fibras) e respetivas massas volúmicas

Procedimento de Ensaio

No corrente trabalho, foi adotado o método **A (volumétrico)**

Na realização deste ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Banho Termostático;
- Balança;
- Estufa;
- Cronómetro;
- Unidade digital com sonda de temperatura;
- Vacuómetro;

Ensaio laboratoriais

- Picnómetro;
- Agitador mecânico;
- Peneiro 5,6 mm.



Figura 4.23 – Agitador mecânico (à esquerda), picnómetro (centro) e Sistema de vácuo (à direita)



Figura 4.24 – Banho Termostático

A execução do ensaio envolve duas fases distintas: 1ª: Desagregação da amostra e 2ª: Ensaio

1ª Fase: Desagregação da amostra

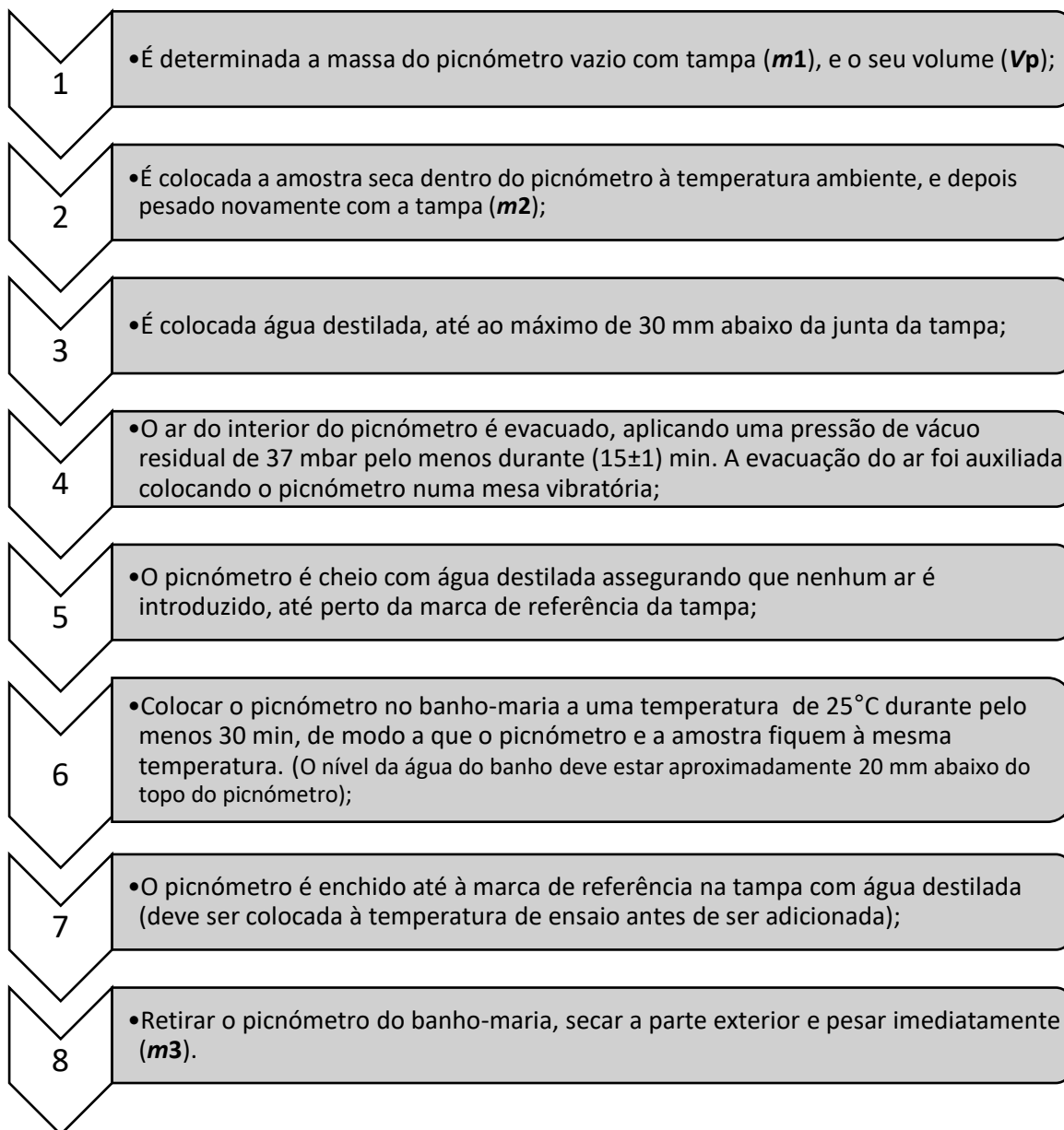
A mistura é seca a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ até à massa constante e arrefecida até ser possível o seu manuseamento.

A mistura deve ser convenientemente desagregada reduzindo a partículas individuais ou a aglomerados de partículas com tamanho máximo de 6 mm. Por forma a avaliar os aglomerados de partículas utiliza-se um peneiro de abertura 5,6 mm procedendo-se a uma inspeção visual antes de realizar o ensaio, de modo a verificar que se encontra livre de impurezas. O provete terá no mínimo a massa de 250g e pelo

menos 50 vezes a maior dimensão do agregado, neste caso, para um SMA8 o mínimo de massa será de 400g.

2ª Fase: Ensaio

A sequência de ensaio tem a seguinte ordem de execução:



Critério de validação

A fórmula de cálculo da baridade máxima teórica ρ_{mv} , é dada pela equação seguinte:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{1000 \times (V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w})} \quad (4.13)$$

Onde:

Ensaio laboratoriais

ρ_{mv} – é baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada pelo procedimento volumétrico, em quilogramas 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 $0,1 \text{ quilogramas por metro cúbico (kg/m}^3)$ com uma precisão de $0,1 \text{ kg/m}^3$, de acordo com a expressão:

$$\rho_w = 1,00025205 + \left(\frac{(7,59t - 5,32t^2)}{(10^6)} \right)$$

(4.10)

Considerações

A determinação da baridade máxima teórica (**BMT**) é um requisito fundamental para a determinação da porosidade (**Vm**) e dos vazios na mistura de agregados (**VMA**) como referido no ponto 0 na mistura betuminosa. Os limites da porosidade estão definidos no CETO das infraestruturas de Portugal estando também presentes na Tabela 3.5 deste trabalho.

4.3.8 Ensaio de Marshall

Âmbito e enquadramento normativo

Este ensaio aplica-se a provetes cuja mistura betuminosa tenha sido realizada de acordo com a EN 12697-35 (19) e compactados de acordo com a EN 12697-30 (29).

As características de Marshall são o ensaio mais importante na avaliação da mistura betuminosa e tem como objetivo a determinação da percentagem ótima em betume.

O valor da estabilidade Marshall (S) corresponde à força máxima a que um provete resiste a 60°C . Esta força é aplicada por uma prensa, depois do provete ser colocado entre as duas meias canas de aço de um estabilómetro, e o conjunto colocado entre os pratos da prensa. A velocidade de aproximação dos pratos é $(50 \pm 2) \text{ mm/min}$. A deformação Marshall (F) corresponde ao encurtamento diametral do provete, ocorrido desde o início do ensaio até ao momento de rotura.

Procedimento de Ensaio

Na realização deste ensaio foram usados os seguintes equipamentos:

- Paquímetro;

- Banho Termostático;
- Prensa Marshall;
- Estabilômetro;
- LVDT;
- *Software* Marshall.

Foram moldados 4 provetes para cada percentagem de betume, sendo que os ensaios têm um limite de 32h após desmoldagem. A baridade e as dimensões dos provetes são determinadas segundo o método preconizado no ponto 4.3.6.

Os provetes são colocados num banho de água a $(60\pm 1)^\circ\text{C}$ por um período de tempo superior a 40 min e inferior a 60 min. Os provetes devem estar pousados sobre uma prateleira perfurada com uma altura de 25 mm e devem ter um mínimo de 25 mm de água acima do topo dos provetes.

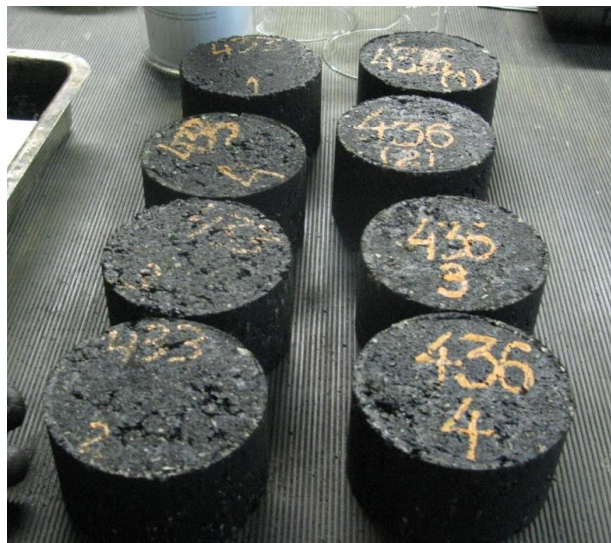


Figura 4.25 – Provetes antes de serem colocados no banho termostático

O estabilômetro é aquecido a $(60\pm 1)^\circ\text{C}$, por um período mínimo de 40 minutos em banho de água, podendo ser colocado juntamente com os provetes.

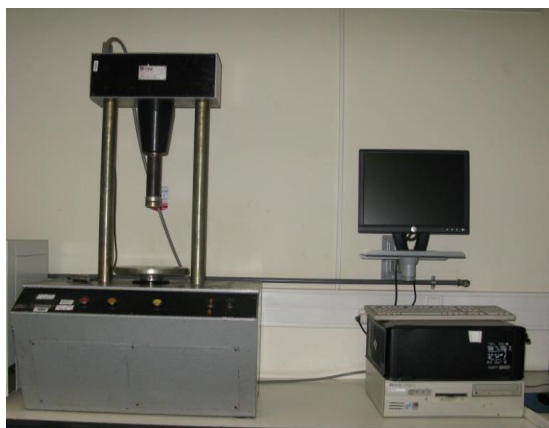


Figura 4.26 – Prensa Marshall (antes da colocação do estabilómetro)

O provete é removido do banho de água e colocado no estabilómetro tendo o cuidado de verificar se o provete se encontra centrado. O conjunto (estabilómetro+ provete) é colocado na prensa Marshall, sendo que antes de qualquer provete ser ensaiado, o estabilómetro deve ser limpo. Pode ser usado um solvente para a limpeza e um *spray* de silicone de modo evitar que os provetes fiquem agarrados ao estabilómetro.

O ensaio consiste na aplicação de carga no provete de modo a alcançar uma taxa constante de deformação de (50 ± 2) mm / min, até que a leitura máxima é obtida no dispositivo de medição de carga. É gravada a carga indicada no *software*. Este procedimento é realizado num período máximo de 40 s após a remoção do provete do banho de água.

Os ensaios de estabilidade e de deformação num grupo de quatro provetes, é feita avaliação dos provetes para a deformação tangencial, deformação, deformação total e estabilidade.

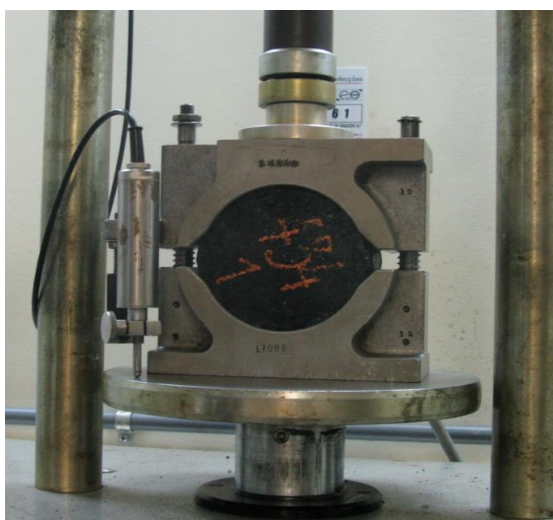


Figura 4.27: Realização de um ensaio Marshall

Critério de validação

Só podem ser sujeitos ao ensaio Marshall os provetes que respeitem as dimensões (referidas em 4.3.6) e que respeitem a esquematização de ensaio definida no ponto anterior.

Os valores de referencia Marshall o CETO das infraestruturas de Portugal encontram-se descritos na sua totalidade na Tabela 3.11.

Considerações sobre a determinação da percentagem ótima de betume

Na determinação da percentagem ótima de betume, para cada propriedade determinada sobre os provetes compactados, são calculados os valores médios dos quatro provetes fabricados com a mesma percentagem de betume. Essas médias são representadas num gráfico que relaciona a percentagem de betume com cada variável determinada.

Em cada gráfico obtido, traça-se uma curva que melhor se ajuste aos pontos representados. A percentagem ótima de betume definida no CETO das Infraestruturas de Portugal (13), para a mistura em tem nos requisitos a seguinte redação: *A percentagem “ótima” de betume será a que resulta da média dos valores das percentagens de betume que conduzem ao valor máximo da baridade da mistura betuminosa compactada (EN 12697-6); ao valor médio dos limites da porosidade (EN 12697-8), definidos nos quadros; ao valor máximo correspondente à estabilidade Marshall (EN 12697-34), e ao valor médio dos limites da deformação Marshall,*

4.3.9 Ensaio de determinação de Índice de sensibilidade à água

Âmbito e enquadramento normativo

O ensaio de Sensibilidade à água segundo a norma EN 12697-12 (3) determina o efeito da saturação da água nas misturas betuminosas e define vários equipamentos e métodos para a determinação desta característica. Neste trabalho foi preconizado o método A.

Foram preparados 6 provetes cilíndricos e determinam-se as respetivas baridades e dimensões, por forma a estabelecer dois subgrupos de ensaio, o seco e o húmido. Entre estes dois subgrupos as baridades não devem diferir mais de 15kg/m^3 e as espessuras mais de 5mm.

Procedimento de Ensaio

Os provetes, foram moldados através do compactador de impacto, com pedestal de madeira, de acordo com a EN 12697-30 (29).



Figura 4.28 – Compactador de impacto com pedestal de madeira

Sobre os provetes, efetuaram-se os ensaios de baridades e mediram-se os provetes de acordo com o ponto 4.3.6. Após um período de estabilização entre de 16h e 24h os provetes são agrupados em dois grupos análogos, cujas médias das alturas não pode variar mais que 5 mm e a média das baridades não pode variar mais que $0,015 \text{ Mg/m}^3$. Um dos grupos será designado por grupo **Imerso** e o outro por grupo **Seco**. Inicia-se o acondicionamento dos provetes:

Grupo Imerso: Foram colocados os provetes dentro de um banho de água destilada (20 ± 5) °C com uma prateleira perfurada. O nível da água deverá está no mínimo 20 mm acima do topo dos provetes. Sela-se o banho de água com os provetes no seu interior e aplica-se vácuo até atingir os de (67 ± 3) hPa. O vácuo deve ser aplicado lentamente, (10 ± 1) min, de modo a evitar a expansão anormal dos provetes. Mantêm-se os provetes em vácuo durante (30 ± 5) min. Retira-se o vácuo lentamente de modo a retomar a pressão atmosférica. Deixa-se os provetes imersos durante outros (30 ± 5) min. Calcula-se o volume destes provetes de acordo com um dos métodos estabelecidos pela EN 12697-6 (27). No caso de aumentarem mais de 2 % em volume rejeitam-se os provetes. Coloca-se os provetes em banho de água a (40 ± 1) °C por um período de 68 a 72h. Findo este tempo retira-se os provetes do banho de água de (40 ± 1) °C e colocam-se num banho de água a (15 ± 2) °C por um período mínimo de 2 horas.

Grupo Seco: Mantêm-se os provetes em laboratório, numa superfície plana à temperatura ambiente de (20 ± 5) °C, durante o período de tempo semelhante ao do grupo Imerso. Coloca-se os provetes à temperatura de ensaio (15 ± 2) °C, durante um mínimo de 2h, de uma das seguintes formas:

- Em banho de água, protegendo o provete da água através do uso de saco de plástico ou outro tipo de proteção adequado à água;

- Em estufa com refrigeração apropriada. Neste caso é necessário ter um provete “dummy”, por outras palavras, um provete onde se pode incorporar uma sonda de temperatura.

Crítério de validação

Após o acondicionamento de ambos os grupos, é determinada a tensão de rotura por tração indireta em todos os provetes: É colocado o provete no estabilómetro e leva-se à rotura.



Figura 4.29 – Ensaio de tração indireta

Regista-se o valor de máxima tensão obtido. Após a rotura, observar o provete e registar o seguinte:

- Tipo de rotura;



Figura 4.30 – Verificação do tipo de rotura à tração indireta

- Presença de agregado fraturado ou esmagado;



Figura 4.31 – Verificação de agregado fraturado

Ensaio laboratoriais

- Superfície revestida no agregado exposto.

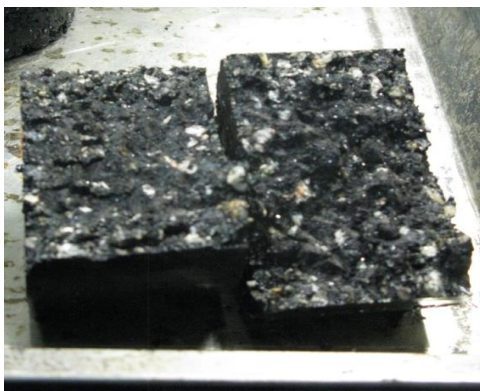


Figura 4.32 – Verificação da superfície revestida com betume no agregado exposto

A verificação da sensibilidade à água da mistura betuminosa é dada pelo quociente entre a resistência à tração indireta dos provetes imersos (**ITS_w**) e a resistência à tração indireta dos provetes acondicionados em condições menos severas (**ITS_d**), é o indicador da resistência à sensibilidade da água (**ITSR**), sendo aplicável a seguinte equação:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \tag{4.14}$$

Sendo a percentagem mínima segundo a Tabela 3.12 de 90%.

O cálculo da tensão indireta e a verificação do tipo de rotura está definido pela norma 12697-23_(31)

O tipo de rotura é avaliado segundo a Figura 4.33, sendo que existem três tipos de rotura possíveis:

Tipo a) – Linha de rotura clara

Tipo b) – Linha de rotura deformada

Tipo c) – Linha de rotura combinada

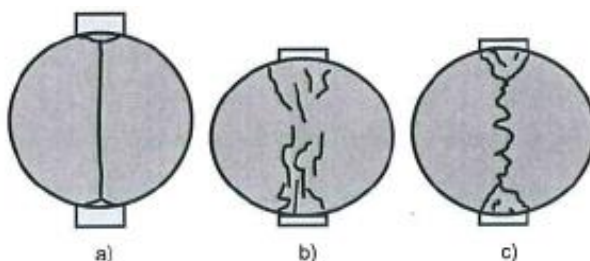


Figura 4.33 – Avaliação do tipo de rotura à tração indireta, segundo a EN 12697-23 (31).

O cálculo da tensão indireta (**ITS**) é dado pela média dos resultados dos ensaios de acordo com a seguinte expressão:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (4.15)$$

Sendo:

ITS é a resistência à tensão indireta em gigapascal (GPa), arredondada às 3 casas decimais;

P é a carga máxima aplicada em quilonewton (kN), arredondada às 3 casas decimais;

D é o diâmetro do provete em milímetros (mm), arredondados a 0,1mm;

H é a altura do provete em milímetros (mm), arredondados a 0,1 mm.

Considerações

O ensaio da sensibilidade à água permite avaliar a resistência de uma mistura betuminosa sujeita a condições normais de humidade e temperatura comparando a com condições extremas desses dois fatores. É um requisito obrigatório a ser segundo o CETO das infraestruturas de Portugal.

4.3.10 Ensaio de determinação da Resistência conservada

Âmbito e enquadramento normativo

O método de avaliação da sensibilidade à água que é preconizado no caderno de encargos das Infraestruturas de Portugal (13) é baseado no método 104 da norma Americana MIL-STD-620A.

Procedimento de Ensaio

Este ensaio é baseado na comparação entre forças de rotura Marshall de dois grupos de provetes que são previamente acondicionados de forma diferente:

Grupo 1: 4 provetes cilíndricos imersos em água a 60°C durante cerca de 35 min.

Grupo 2: 4 provetes cilíndricos imersos em água durante 24 h a 60°C.

Após o período de acondicionamento de cada grupo de provetes é determinada a força de rotura de cada provete através do ensaio Marshall referido em 3.6.1 e é calculado o respetivo valor médio: força de rotura média F1 dos provetes do Grupo 1 e força de rotura média F2 dos provetes do grupo 2 (APORBET, 1998). É determinado o índice de resistência conservada segundo a seguinte equação:

$$IRC = \frac{F2}{F1} \times 100 (\%) \quad (4.16)$$

4.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os ensaios realizados para a avaliação do desempenho da mistura betuminosa, foram os necessários para a sua caracterização completa de uma mistura betuminosa, sendo que por motivos de indisponibilidade do laboratório não foi possível executar o ensaio “Wheel tracking”, apesar do CETO (13), o requerer como um ensaio fundamental. No entanto, em alguns ensaios houve a necessidade de repetição, devido à obtenção de valores fora do esperado ou pela má execução da mistura. Na tabela seguinte, resumem-se os ensaios executados, o seu número, o ponto onde este é descrito neste trabalho e as observações respetivas a cada um.

Tabela 4.13 – Número de ensaios realizados e observações

Denominação do ensaio	Ponto	Nº	Observações
Penetração em Betume	4.3.1	3	Um ensaio por cada tipo de betume
Temperatura Anel e Bola	4.3.2	3	Um ensaio por cada tipo de betume
Análise Granulométrica	4.3.3	2	Um por cada tipo de agregado
Densidade do agregado	4.3.4	2	Um por cada tipo de agregado
Escorrimento Schellenberg	4.3.5	9	Um por cada combinação de percentagem de betume, tipo de betume e adição de estabilizadores
Baridades	4.3.6	16	Por cada mistura betuminosa: Ensaio Marshall: 4 provetes; ITRS: 6 provetes; Ensaio IRC: 8 provetes x 2 ensaios
Baridade Máxima Teórica	4.3.7	11	Um por cada mistura betuminosa (desagregação da mistura)
Estabilidade e deformação Marshall	4.3.8	44	Quatro por cada mistura betuminosa
ITRS	4.3.9	3	Um por mistura betuminosa (Um para o PMB 45/80-65 com 6,0% de betume e dois para o PMB 45/80-75 com 6,0% e 6,5% de betume)
IRC	4.3.10	2	Um por cada tipo de betume (modificado e com a mesma percentagem de betume)

Para cada ensaio, foi adotada a metodologia prescrita nos procedimentos de ensaio seguido no LGMC, que derivam da estrita interpretação das normas aplicáveis a cada um destes.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DO ESTUDO EXPERIMENTAL

5.1.1 Penetração de betume

Resultados Obtidos

Os betumes usados na formulação e mediante o procedimento prescrito em 4.3.1, apresentaram os resultados constantes na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultado dos ensaios de penetração de betume

Betume	CEPSA 35/50	CEPSA PMB 45/80-65	CEPSA RAF 45/80-75
1ª Leitura	46 x (0,1 mm)	48 x (0,1 mm)	66 x (0,1 mm)
2ª Leitura	44 x (0,1 mm)	48 x (0,1 mm)	67 x (0,1 mm)
3ª Leitura	44 x (0,1 mm)	48 x (0,1 mm)	68 x (0,1 mm)
Média	45 x (0,1 mm)	48 x (0,1 mm)	67 x (0,1 mm)

Validação de resultados

Os resultados são validados segundo o procedimento de ensaio descrito em 4.3.1, em que, para cada tipo de betume, está estabelecido um limite mínimo e máximo da profundidade da penetração da agulha, de acordo com a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Validação de resultados do ensaio de penetração

Betume	CEPSA 35/50	CEPSA PMB 45/80-65	CEPSA RAF 45/80-75
Valor mínimo	35 x (0,1 mm)	45 x (0,1 mm)	45 x (0,1 mm)
Valor máximo	50 x (0,1 mm)	80 x (0,1 mm)	80 x (0,1 mm)
Média determinada	45 x (0,1 mm)	48 x (0,1 mm)	67 x (0,1 mm)
Validação	Conforme	Conforme	Conforme

Pela Tabela 5.2, verifica-se que todos os betumes estão conforme o parâmetro definido pelo produtor.

5.1.2 Temperatura anel e bola

Resultados Obtidos

Os betumes usados na formulação e mediante o procedimento prescrito em 4.3.2, apresentaram os resultados constantes na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado dos ensaios da temperatura anel e bola para cada betume usado na formulação

Betume	CEPSA 35/50 (°C)	CEPSA PMB 45/80-65 (°C)	CEPSA RAF 45/80-75 (°C)
1ª Esfera	55,0	67,4	81,4
2ª Esfera	55,0	67,0	81,0
Média	55,0	67,2	81,2

Validação de resultados

Os resultados são validados segundo o procedimento de ensaio descrito em 4.3.2, em que, para cada tipo de betume, está estabelecido um limite mínimo da temperatura de amolecimento anel e bola conforme na Tabela 5.4

Tabela 5.4 – Validação de resultados do ensaio de temperatura anel e bola

Betume	CEPSA 35/50 (°C)	CEPSA PMB 45/80-65 (°C)	CEPSA RAF 45/80-75 (°C)
Valor mínimo	50,0	65,0	75,0
Média determinada	55,0	67,2	81,2
Líquido do ensaio	Água	Água	Água e glicerina
Validação	Conforme	Conforme	Conforme

Pela Tabela 5.4, verifica-se que todos os betumes estão conforme o parâmetro definido pelo produtor.

5.1.3 Propriedades do agregado

Resultados Obtidos

Na sequência da recepção dos agregados, estes foram sujeitos a análise à sua massa volúmica e índice de achatamento.

Tabela 5.5 – Análise granulométrica: Massa volúmica e índice de achatamento

Massa Volúmica	Agregado 0/4	2,66 Mg/m³
Massa Volúmica	Agregado 4/8 e 8/11,2	2,63 Mg/m³
Índice de Achatamento	Agregado 4/8	Classificação Normativa: FI 6

5.1.4 Composição da curva granulométrica

Resultados Obtidos

Para a determinação da percentagem dos diferentes agregados, teve em conta o fuso granulométrico preconizado pelo caderno de encargos das Infraestruturas de Portugal (13), que se encontra neste trabalho na Tabela 3.5.

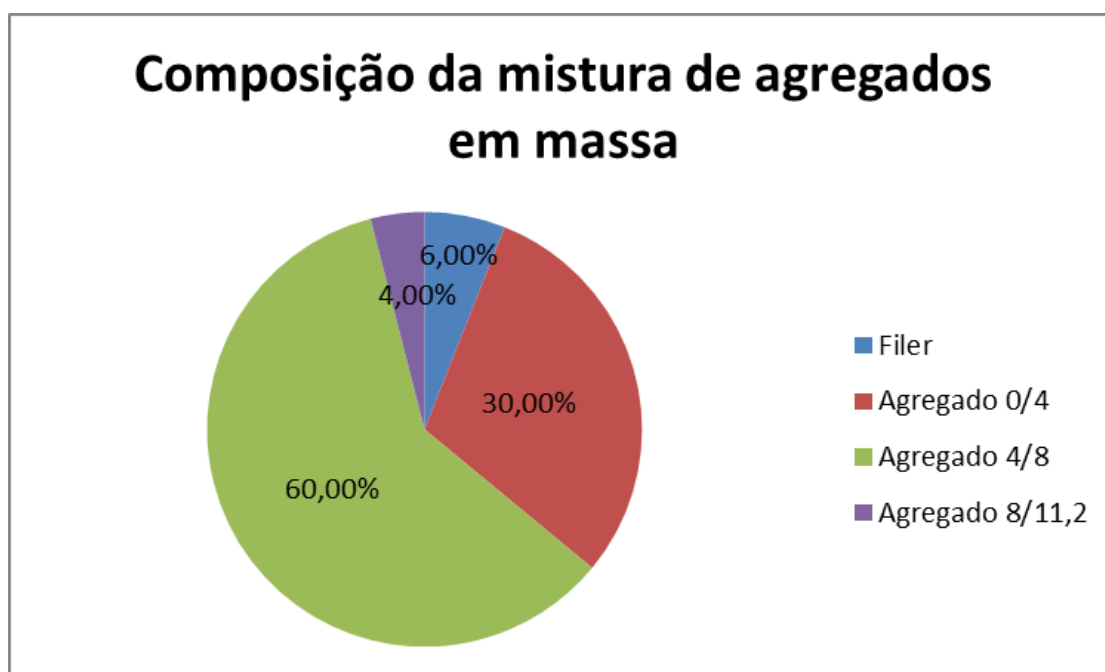


Figura 5.1 – Composição em massa da mistura de agregados e filler

Tabela 5.6 – Composição de cada percentagem de agregado na mistura final

Peneiro (mm)	Filer		0/4		4/8		8/11,2		Curva da Mistura
	% Passados	6,0%	% Passados	30,0%	% Passados	60,0%	% Passados	4,0%	
16	100	6	100	30	100	60	100	4	100
11,2	100	6	100	30	100	60	100	4	100
8	100	6	100	30	100	60	0	0	96
5,6	100	6	96	29	43	26	0	0	61
4	100	6	83	25	14	8	0	0	39
2	100	6	63	19	8	5	0	0	30
1	100	6	46	14	7	4	0	0	24
0,5	100	6	32	10	6	4	0	0	19
0,25	100	6	21	6	5	3	0	0	15
0,125	99	6	13	4	3	2	0	0	12
0,063	83,5	5,0	8,0	2,4	3,0	1,8	0,0	0,0	9,2

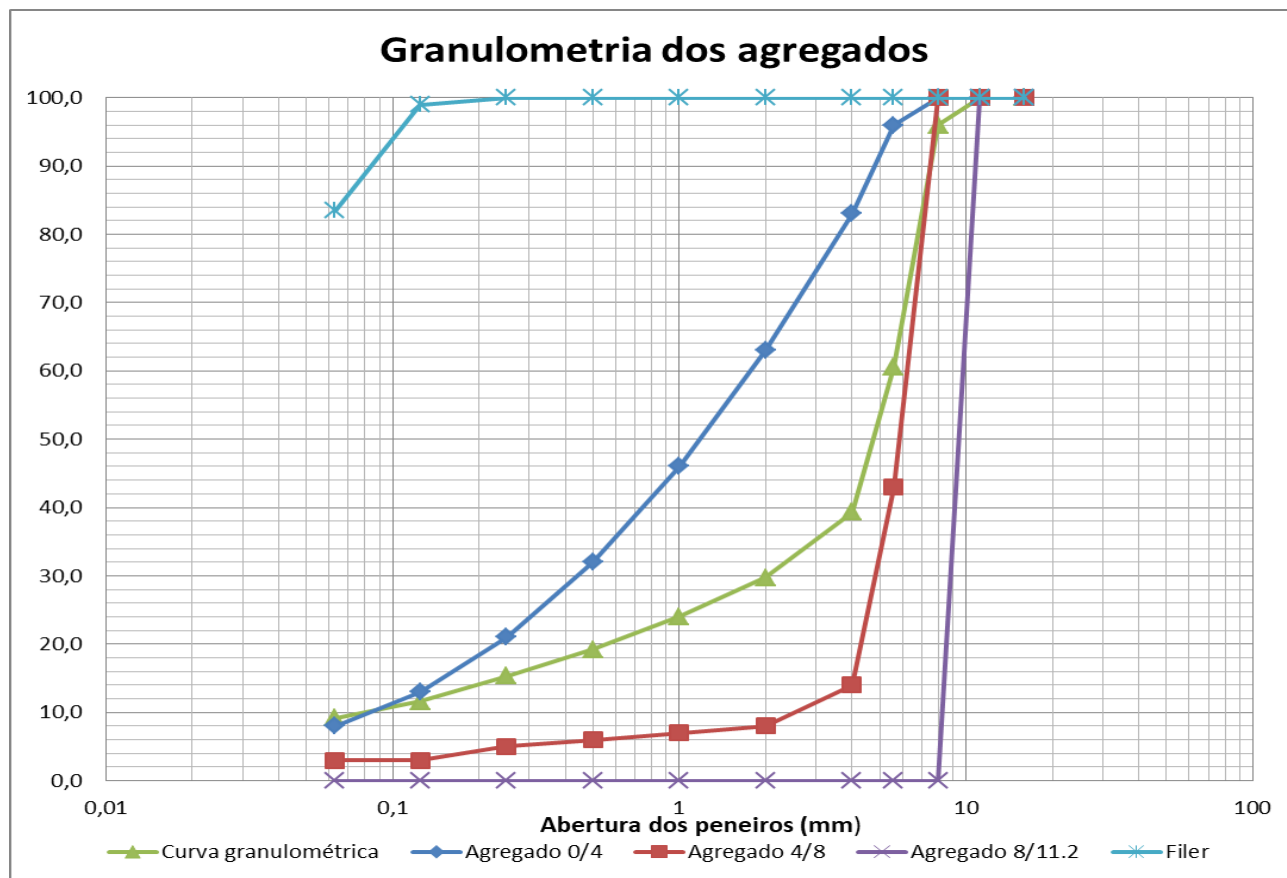


Figura 5.2 – Curvas granulométrica a partir dos agregados, filer e mistura de agregados

5.1.5 Ensaio de escorrimento do ligante

Resultados Obtidos

O ensaio de escorrimento de ligante, foi executado de acordo com o capítulo 4.3.5 e são apresentados os resultados na Tabela 5.7

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio pelo método de Schellenberg

Betume	% Betume	% Fibras	% Escorrido	Validação (<0,3%)
35/50	6,0	SEM FIBRAS	0,28	VERIFICA
PMB 45/80-65	6,0	SEM FIBRAS	0,11	VERIFICA
PMB 45/80-65	6,0	0,3 VIATOP	0,09	VERIFICA
PMB 45/80-65	6,3	0,3 VIATOP	0,07	VERIFICA
PMB 45/80-65	6,6	0,3 VIATOP	0,10	VERIFICA
PMB 45/80-65	6,0	0,3 SINTÉTICAS	0,07	VERIFICA
PMB 45/80-65	6,3	0,3 SINTÉTICAS	0,07	VERIFICA
PMB 45/80-65	6,6	0,3 SINTÉTICAS	0,07	VERIFICA
PMB 45/80-65	6,0	0,3 PVC	0,11	VERIFICA
PMB 45/80-75	6,0	SEM FIBRAS	0,09	VERIFICA

Validação de resultados

Todos os ensaios conseguiram verificar a taxa máxima de escorrimento de ligante (0,3%), sendo que no caso do betume 35/50, uma percentagem maior que 6,0% poderia não verificar o critério do escorrimento máximo admissível. Em relação à adição de fibras de PVC, verificou-se que estas ficaram à superfície e não envolvidas no agregado não tendo sido possível a sua homogeneização na mistura. No caso do betume RAF 45/80-75, com uma percentagem de 6,0%, mesmo sem adição de fibras, verificou-se que existia uma percentagem de escorrimento bastante inferior ao PMB 45/80-65 com 0,3% de fibras com a mesma percentagem.

5.1.6 Determinação da percentagem ótima de betume (PMB 45/80-65)

A percentagem ótima de betume foi determinada segundo o ponto 0 para uma mistura betuminosa produzida com as temperaturas recomendadas pelos produtores do ligante betuminoso. Os resultados dos ensaios realizados durante o método de formulação com o betume modificado ELASTER PMB 45/80-65, para cada percentagem e betume estudado, estão representados na Tabela 5.8 e figuras seguintes.

Tabela 5.8 – Resultados do ensaio Marshall, em função da percentagem de betume PMB 45/80-65

Parâmetro	% Betume	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Baridade Máxima Teórica (ρ_m)	Mg/m ³	2,418	2,420	2,394	2,378
Baridade dos provetes compactados (ρ_b)	Mg/m ³	2,333	2,356	2,337	2,345
Vazios na mistura de agregados (VMA)	%	15,9	16,2	17,2	17,3
Porosidade (Vm)	%	3,5	3,9	2,4	1,4
Estabilidade Marshall (S)	kN	15,7	16,8	15,0	13,6
Deformação Marshall (F)	mm	2,8	3,8	5,0	4,2

Para a determinação da percentagem ótima de betume estão representados graficamente cada um dos parâmetros a ter em conta no estudo de formulação.

Resultados Obtidos

Ensaio de baridade dos provetes compactados (ρ_b)

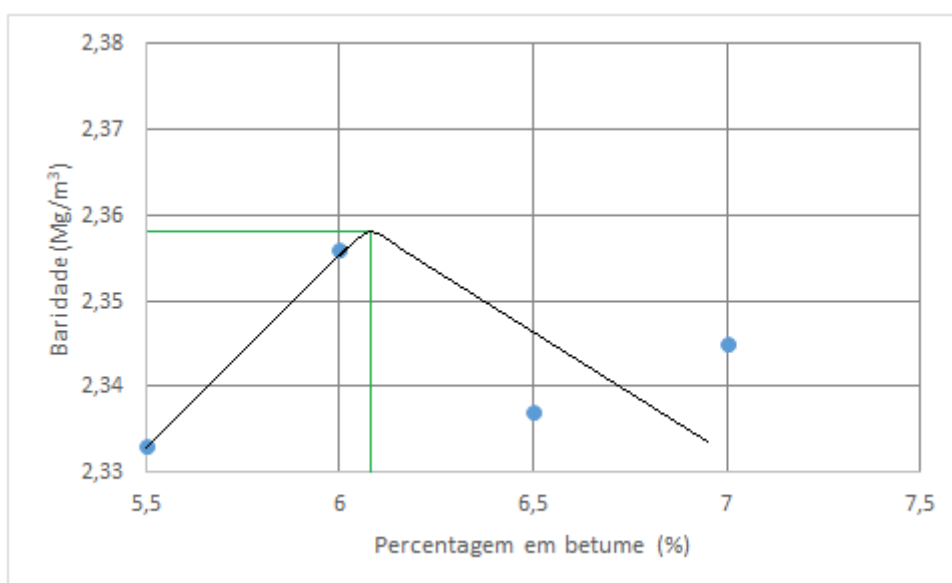


Figura 5.3 – Gráfico do ensaio de baridade com o betume PMB 45/80-65

A baridade máxima verifica-se com uma percentagem de betume de 6,1% com $\rho_{b,max}$ de 2,358 Mg/m³

Ensaio de baridade máxima teórica (ρm)

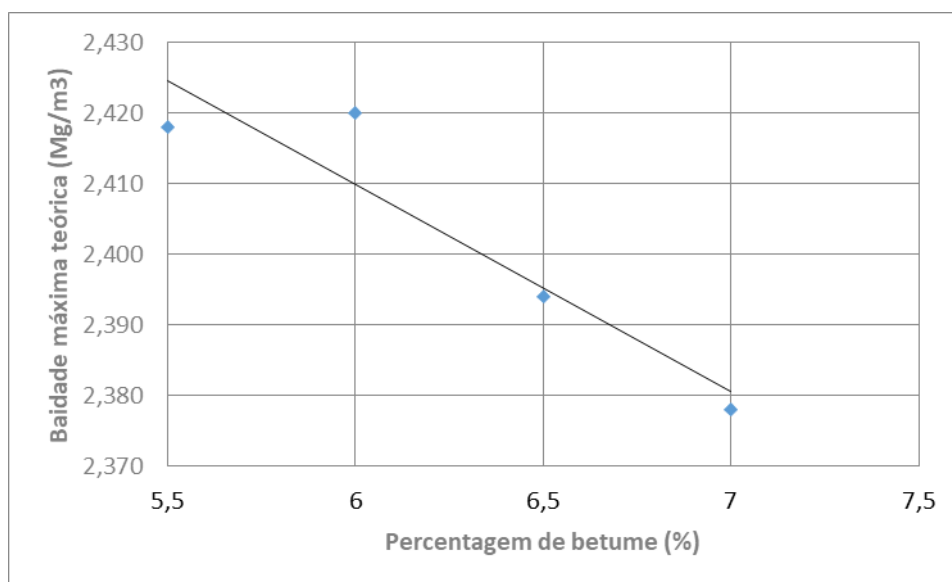


Figura 5.4 – Gráfico do ensaio de baridade máxima teórica com o betume PMB 45/80-65

Este parâmetro não entra para a determinação da percentagem ótima de betume.

Porosidade (Vm)

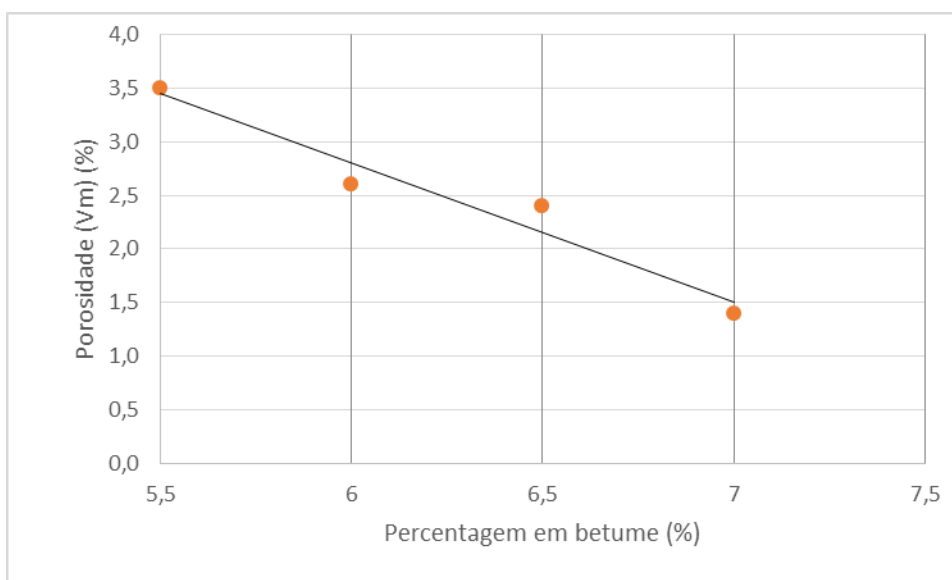


Figura 5.5 – Gráfico do ensaio de determinação da porosidade com o betume PMB 45/80-65

(Segundo o CETO das infraestruturas de Portugal, a porosidade será o valor médio entre limites (neste caso entre 2% e 5%, sendo adotado o valor 3,5%), neste caso, a porosidade média verifica-se com uma percentagem de betume de 5,5%

Vazios na mistura de agregados (VMA)

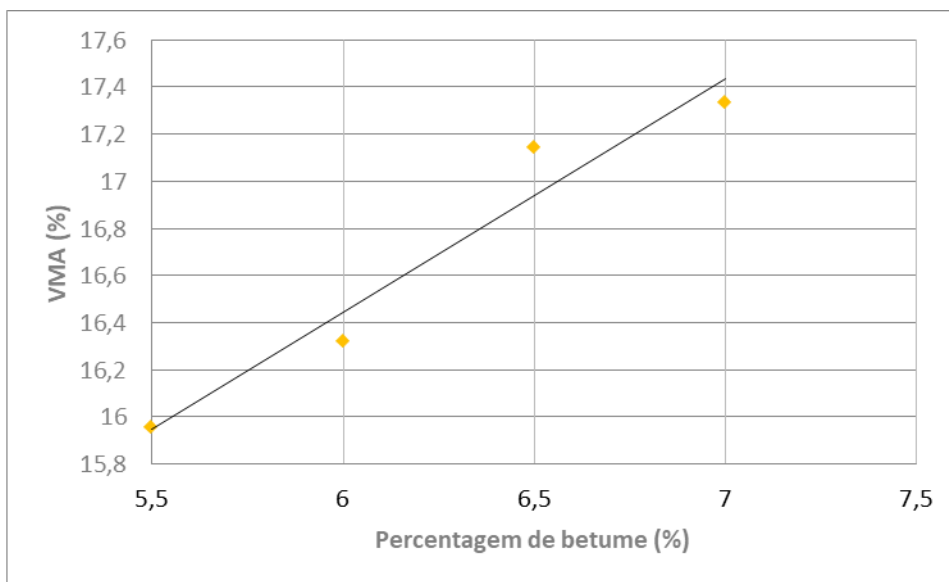


Figura 5.6 – Gráfico do ensaio de determinação do volume máximo do agregado mineral com o betume PMB 45/80-65

Este parâmetro não entra na determinação da percentagem ótima de betume, mas deverá satisfazer o requisito do CETO das Infraestruturas de Portugal, que define que este valor deve ser superior a 14%.

Estabilidade Marshall (S)

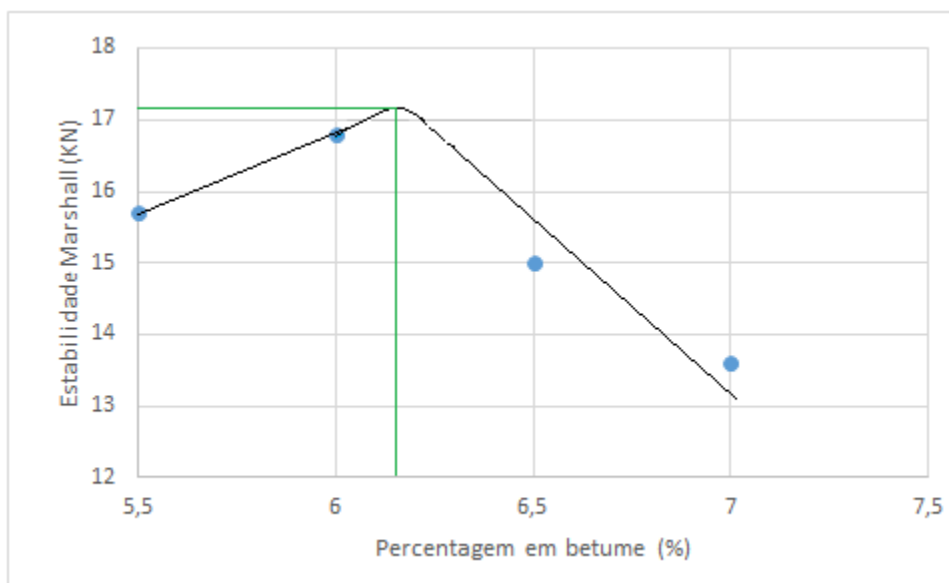


Figura 5.7 – Gráfico do ensaio de determinação da estabilidade Marshall com o betume PMB 45/80-65

A estabilidade Marshall máxima verifica-se com uma percentagem de betume de 6,2% com 17,2 kN.

(Segundo o CETO das Infraestruturas de Portugal, este valor deve ser superior a 7,5 kN)

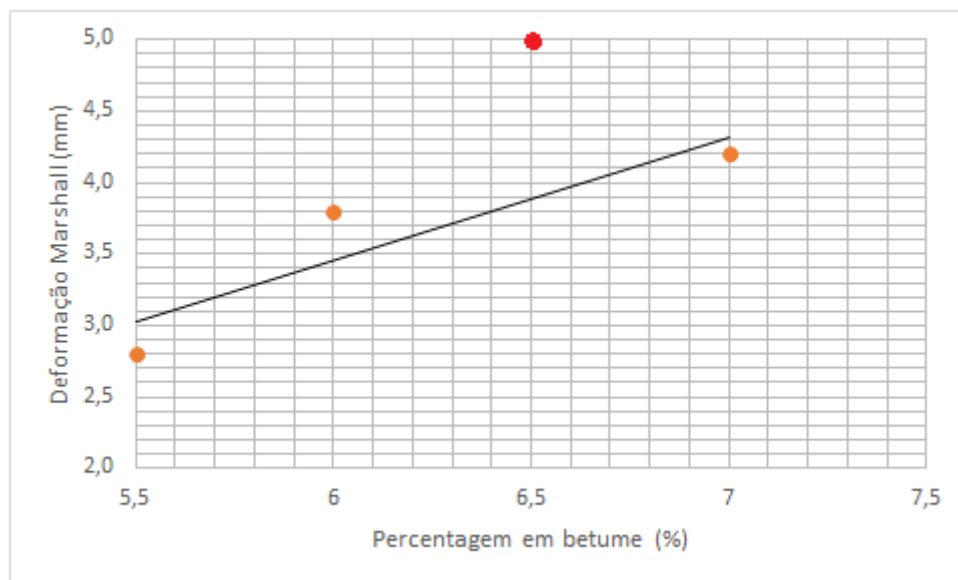
Deformação Marshall (F)

Figura 5.8 – Gráfico do ensaio de determinação da deformação Marshall com o betume PMB 45/80-65

A deformação Marshall média verifica-se com uma percentagem de betume de 5,5%.

(Segundo o CETO das Infraestruturas de Portugal, este valor deve ser estar entre 2mm e 4 mm, logo apenas foi considerado o valor médio dentro deste intervalo, considerados para 3,0mm)

Nota: Não foi considerada na elaboração da reta de aproximação, o valor de deformação para o ensaio com percentagem de betume 6,5%, pois este estava fora dos valores previsíveis.

Determinação da percentagem ótima de betume:

$$P_{optima} = \frac{\rho_b + V_m + S + F}{4} = \frac{6,1\% + 5,5\% + 6,2\% + 5,5\%}{4} = 5,8\%$$

Tabela 5.9 – Parâmetros determinados através das figuras 5.3 a 5.8, para a percentagem ótima de betume (PMB 45/80-65), determinadas através das retas de aproximação

Parâmetro		5,8%
Baridade Máxima Teórica (ρ_m)	Mg/m ³	2,415
Baridade dos provetes compactados (ρ_b)	Mg/m ³	2,346
Vazios na mistura de agregados (VMA)	%	16,3
Porosidade (V_m)	%	3,0
Estabilidade Marshall (S)	kN	16,5
Deformação Marshall (F)	mm	3,3

5.1.7 Determinação da percentagem ótima de betume (PMB 45/80-75)

A percentagem ótima de betume foi determinada segundo o ponto 0 para uma mistura betuminosa produzida com as temperaturas recomendadas pelos produtores do ligante betuminoso. Os resultados dos ensaios realizados durante o método de formulação com o betume modificado RAF PMB 45/80-75, para cada percentagem e betume estudado, estão representados na Tabela 5.10 e figuras seguintes.

Tabela 5.10 – Resultados do ensaio Marshall, em função da percentagem de betume PMB 45/80-75

Parâmetro	% Betume	5,5%	6,0%	6,5%
Baridade Máxima Teórica (ρ_m)	Mg/m ³	2,424	2,407	2,386
Baridade dos provetes compactados (ρ_b)	Mg/m ³	2,362	2,357	2,350
Vazios na mistura de agregados (VMA)	%	15,2	15,8	16,3
Porosidade (Vm)	%	2,6	2,1	1,5
Estabilidade Marshall (S)	kN	15,6	13,8	14,1
Deformação Marshall (F)	mm	2,8	3,5	3,4

Para a determinação da percentagem ótima de betume estão representados graficamente cada um dos parâmetros a ter em conta no estudo de formulação.

Resultados Obtidos

Ensaio de baridade dos provetes compactados (ρ_b)

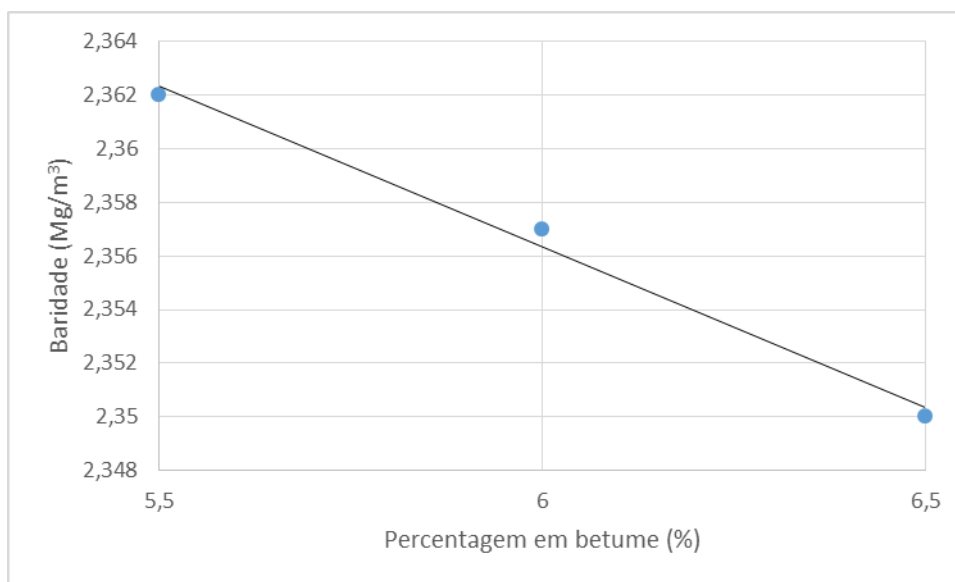


Figura 5.9 – Gráfico do ensaio de baridade com o betume PMB 45/80-75

Valor não determinável

Ensaio de baridade máxima teórica (ρm)

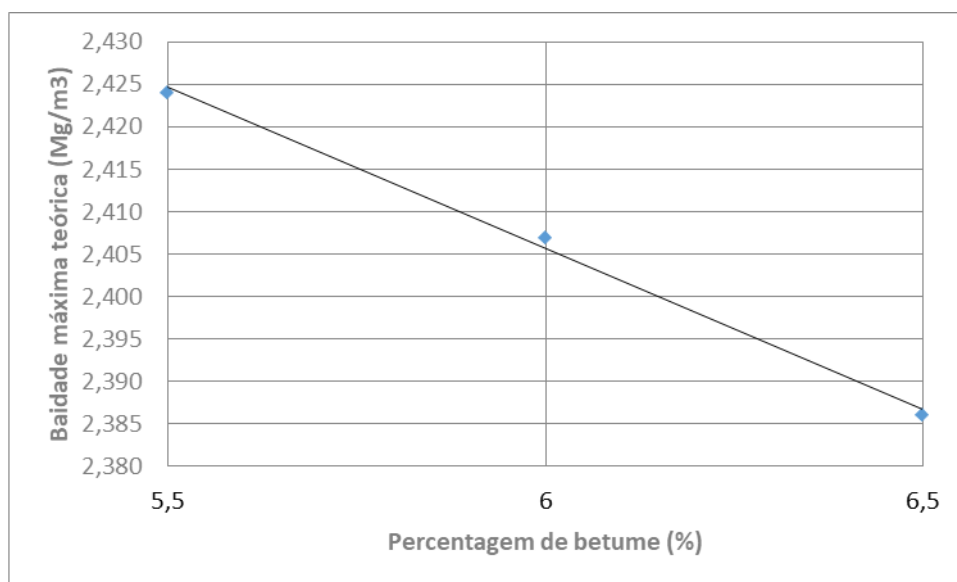


Figura 5.10 – Gráfico do ensaio de baridade máxima teórica com o betume PMB 45/80-75

Este parâmetro não entra para a determinação da percentagem ótima de betume.

Porosidade (Vm)

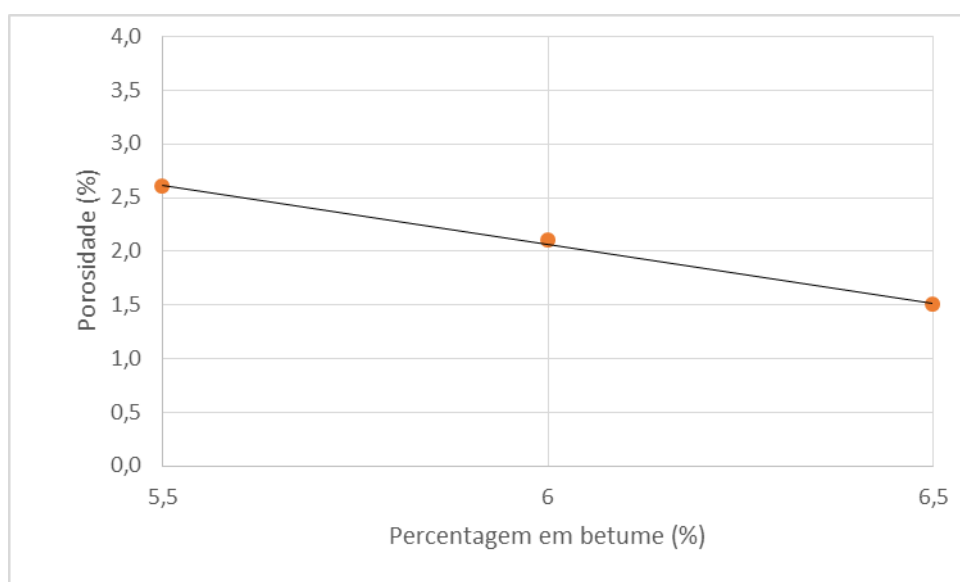


Figura 5.11 – Gráfico do ensaio de determinação da porosidade com o betume PMB 45/80-75

(Segundo o CETO das infraestruturas de Portugal, a porosidade será o valor médio entre limites (neste caso entre 2% e 5%, sendo adotado o valor 3,5%.

Valor não determinável, pois não atinge a porosidade média.

Vazios na mistura de agregados (VMA)

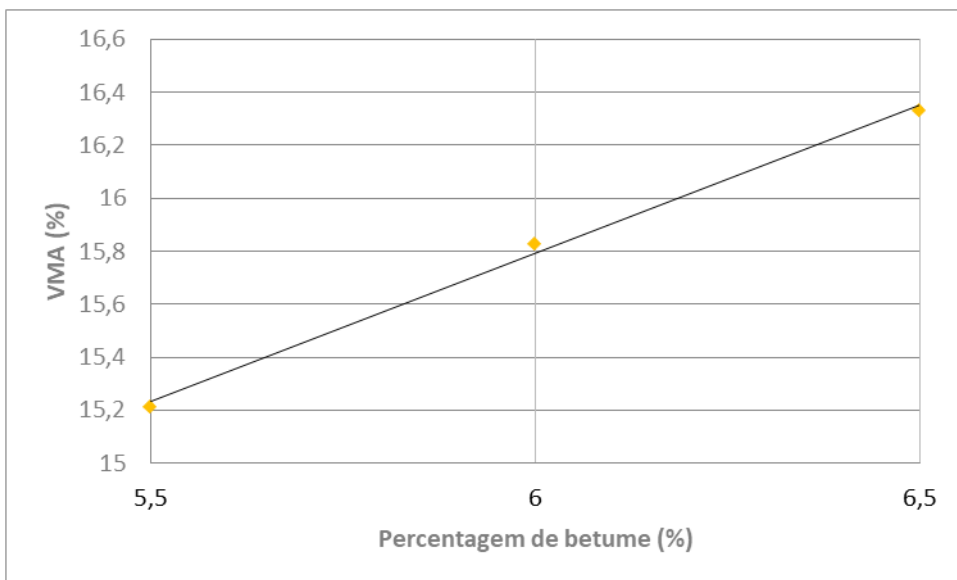


Figura 5.12 – Gráfico do ensaio de determinação do volume máximo do agregado mineral com o betume PMB 45/80-75

Este parâmetro não entra na determinação da percentagem ótima de betume, mas deverá satisfazer o requisito do CETO das Infraestruturas de Portugal, que define que este valor deve ser superior a 14%.

Estabilidade Marshall (S)

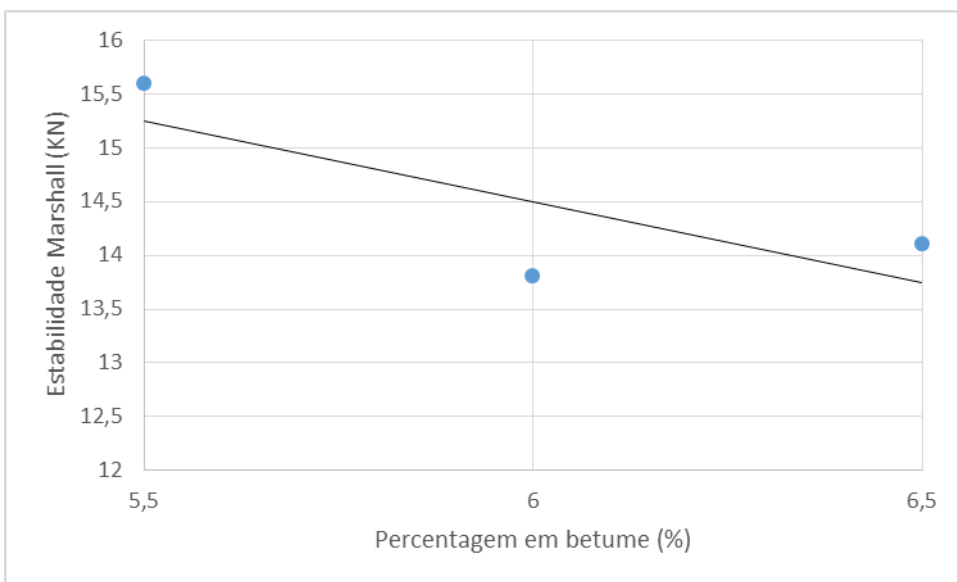


Figura 5.13 – Gráfico do ensaio de determinação da estabilidade Marshall com o betume PMB 45/80-75

Valor não determinável

(Segundo o CETO das Infraestruturas de Portugal, este valor deve ser superior a 7,5 kN)

Deformação Marshall (F)

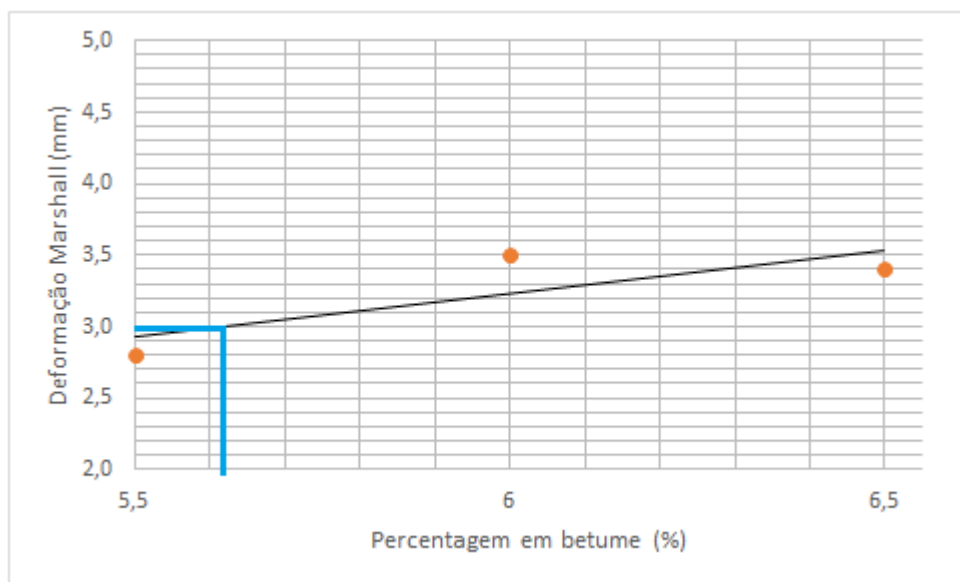


Figura 5.14 – Gráfico do ensaio de determinação da deformação Marshall com o betume PMB 45/80-75

Valor da deformação média (F) = 5,6 %

(Segundo o CETO das Infraestruturas de Portugal, este valor deve estar entre 2mm e 4 mm, logo apenas foi considerado o valor médio dentro deste intervalo, considerados para 3,0mm)

Determinação da percentagem ótima de betume

$$P_{optima} = F = 5,6\%$$

Tabela 5.11 – Parâmetros determinados através das figuras 5.9 a 5.14, para a percentagem ótima de betume (PMB 45/80-75), determinadas através das curvas de aproximação

Parâmetro		5,6%
Baridade Máxima Teórica (ρ_m)	Mg/m ³	2,420
Baridade dos provetes compactados (ρ_b)	Mg/m ³	2,360
Vazios na mistura de agregados (VMA)	%	15,3
Porosidade (V_m)	%	2,5
Estabilidade Marshall (S)	kN	15,1
Deformação Marshall (F)	mm	3,0

5.1.8 Índice de sensibilidade à água (ITRS)

Resultados Obtidos

Realizou-se o ensaio de determinação do índice de sensibilidade à água para os dois betumes com as mesmas percentagens de **6,0%** de betume.

Análise e discussão de resultados

Os resultados (determinação do ITRS e do tipo de rotura estão descritos nas tabelas 5.12 a 5.15)

Determinação do índice de sensibilidade à água para o PMB 45/80-65 (6,0%)

Tabela 5.12 – Resultados dos ensaios de tração indireta e determinação do índice de sensibilidade à água

Resultados	Valores	Unidades
ITSD – Tração indireta dos provetes secos (média)	2667,014	kPa
ITSw – Tração indireta dos provetes imersos (média)	2641,504	kPa
ITRS – Resistência conservada em tração indireta (ITSw/ITSD)	99,0	%

Tabela 5.13 – Determinação do tipo de rotura à tração indireta

(Classificação segundo 3.6.2)	Tipo de Rotura	Agregado fraturado ou esmagado?	Superfície revestida no agregado exposto?
Provetes imersos	CLARA	SIM	SIM
Provetes secos	COMBINADA	SIM	SIM

Determinação do índice de sensibilidade à água para o PMB 45/80-75 (6,0%)

Tabela 5.14 – Resultados dos ensaios de tração indireta e determinação do índice de sensibilidade à água

Resultados	Valores	Unidades
ITSD – Tração indireta dos provetes secos (média)	1771,196	kPa
ITSw – Tração indireta dos provetes imersos (média)	1699,246	kPa
ITRS – Resistência conservada em tração indireta (ITSw/ITSD)	95,9	%

Tabela 5.15 – Determinação do tipo de rotura à tração indireta

(Classificação segundo 3.6.2)	Tipo de Rotura	Agregado fraturado ou esmagado?	Superfície revestida no agregado exposto?
Provetes imersos	COMBINADA	SIM	SIM
Provetes secos	COMBINADA	SIM	SIM

5.1.9 Índice de Resistência conservada

Para a determinação do índice de resistência conservada os provetes embora com betumes diferentes tiveram como percentagem fixa de **6,1%** (percentagem ótima de betume inicialmente determinado para a mistura com o ELASTER PMB 45/80-65), sendo o ensaio executado consoante o descrito no ponto 4.3.10

Resultados Obtidos

Tabela 5.16 – Resultado dos ensaios de resistência conservada para os dois betumes

BETUME ELASTER 14/60 (PMB 45/80-65)			BETUME RAF AV (PMB 45/80-75)		
Tempo	Nº Provete	Força (kN)	Tempo	Nº Provete	Força (kN)
35 minutos	1	14,756	35 minutos	3	15,605
35 minutos	3	14,721	35 minutos	4	17,358
35 minutos	7	14,000	35 minutos	7	17,458
35 minutos	8	14,197	35 minutos	8	16,241
MÉDIA 35 min	F1	14,419	MÉDIA 35 min	F1	16,666
24 horas	2	15,309	24 horas	1	16,255
24 horas	4	16,550	24 horas	2	16,331
24 horas	5	14,360	24 horas	5	16,317
24 horas	6	15,238	24 horas	6	15,928
MÉDIA 24 h	F2	15,114	MÉDIA 24 h	F2	16,211

Segundo a Tabela 5.16, é determinado o índice de resistência conservada recorrendo à equação:

$$IRC = \frac{F2}{F1} \times 100 (\%) \quad (4.16)$$

Logo, para o Betume PMB 45/80-65, temos um índice de resistência conservada de:

$$IRC = \frac{15,114}{14,419} \times 100 = \underline{\underline{104\%}}$$

Para o betume RAF AV 45/80-75, temos um índice de resistência conservada de:

$$IRC = \frac{16,211}{16,666} \times 100 = \underline{\underline{97\%}}$$

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS

Todos os ensaios foram executados em laboratório, em ambiente controlado, tendo em conta as normativas internas do LGMC e respeitando em toda a sua extensão as normas a estas aplicáveis.

A análise dos resultados será feita em relação à mistura betuminosa completa, ou seja, não serão abordados os resultados dos ensaios às características do betume e à granulometria do agregado.

5.2.1 Ensaio de Escorrimento

Da análise do ensaio de escorrimento segundo a norma 12697-18 (1) pelo método de Schellenberg, para cada betume, com ou sem fibras, verificou-se que todas os ensaios respeitaram a máxima percentagem permitida para o escorrimento (0,3%), dada pelo CETO das Infraestruturas de Portugal (13), embora que num betume tradicional sem adição de fibras, o escorrimento tivesse muito próximo desse limite (0,28%).

O estabilizador, ou inibidor de escorrimento utilizado, foram as fibras celulósicas VIATOP durante toda a sequência de ensaios com a mesma percentagem em massa de 0,3%, pois seria útil assegurar que este não seria o fator preponderante no dimensionamento da mistura, mas sim o betume utilizado e a sua percentagem na mistura.

No entanto, na realização deste ensaio foram tentadas alternativas à utilização das fibras celulósicas impregnadas com betume (Viatop), substituindo-as por aparas de PVC. No entanto, verificou-se que estas últimas apresentaram resultados não satisfatórios pela razão que o PVC apresenta um ponto de amolecimento de cerca de 180°C e ao contrário das fibras sintéticas e celulósicas não possuem vazios no seu interior de modo a absorver o betume, que torna incompatível a execução das misturas. Verificou-se também que estas fibras não se misturaram com o betume, ficando à superfície da mistura como é visto na Figura 5.15, embora retivesse algum betume na sua superfície. Após esta constatação, não seria viável a execução de misturas betuminosas com este material.

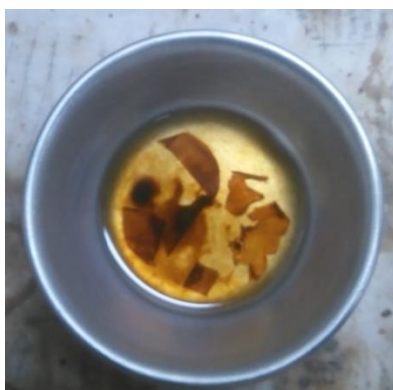


Figura 5.15 - Aparas de PVC recuperadas da mistura betuminosa

A mesma substituição foi feita por fibras sintéticas, e neste caso conseguiram-se resultados um pouco melhores que a solução anterior (ver Tabela 5.7), pois existe uma maior capacidade de retenção pois é criada uma espécie de distribuição tridimensional do betume pelas fibras conforme pode ser visto na Figura 5.16 mas da mesma forma que anterior, optou-se por prosseguir para os ensaios seguintes utilizando apenas fibras Viatop.



Figura 5.16 - Fixação do betume nas fibras sintéticas

5.2.2 Ensaio de determinação de Baridades e Baridade Máxima teórica

Através dos ensaios de determinação de baridade (método B) segundo a EN 12697-6 (27) e baridade máxima teórica, pela EN 12697-5 (12) obtemos através desses parâmetros, os valores dos vazios no agregado (VMA) e a porosidade (Vm), segundo as expressões estabelecidas no ponto 3.2.

Na análise destes parâmetros verificou-se que no ensaio de determinação das baridades, em algumas misturas existiu uma variação bastante pronunciada em relação aos valores esperados, levando a que estes tivessem de ser repetidos, em dois casos pela má execução da mistura. No primeiro, pela não adição das fibras na fase de mistura e no segundo pelo provete não respeitar as dimensões previstas segundo o ponto 4.3.6.

No ensaio de determinação da baridade máxima teórica, não houve nenhum problema a reportar, mas para manter a fiabilidade dos resultados, sempre que se verificou alguma repetição no ensaio de determinação de baridades, este também foi repetido com a nova mistura.

Os valores determinados destes parâmetros encontram-se na Tabela 5.17 e Tabela 5.18.

Tabela 5.17 – Resultados dos ensaios de determinação das baridades

Tipo de Betume	Betume (%)	Média das baridades (Mg/m ³)
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	5,5	2,333
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	6,0	2,356
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	6,5	2,337
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	7,0	2,345
RAF AV PMB 45/80-75	5,5	2,362
RAF AV PMB 45/80-75	6,0	2,357
RAF AV PMB 45/80-75	6,5	2,350

Tabela 5.18 – Resultados dos ensaios de determinação das baridades máximas teóricas (BMT)

Tipo de Betume	Betume (%)	Média das BMT (Mg/m ³)
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	5,5	2,418
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	6,0	2,420
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	6,5	2,394
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	7,0	2,378
RAF AV PMB 45/80-75	5,5	2,424
RAF AV PMB 45/80-75	6,0	2,407
RAF AV PMB 45/80-75	6,5	2,386

5.2.3 Ensaio Marshall

O ensaio Marshall, em cada mistura betuminosa teve como objetivo determinar as características principais da mistura, sendo elas a estabilidade (S) e a deformação (F), tendo em atenção o quociente $Q=S/F$

Este ensaio apresentou resultados bastante díspares na mesma mistura, tendo lugar a repetições na execução das mesmas quando não foram satisfeitos cumulativamente os seguintes critérios, prescritos na norma EN 12697-34 (2):

- A variação máxima da deformação (V_{fm}) entre provetes não deverá exceder **20%** e,

- A variação máxima da estabilidade (Vsm) entre provetes não deverá exceder **15%**.

Os valores médios da estabilidade (S), deformação (F) e quociente (Q) estão descritos na Tabela 5.19 (foram omitidos, nesta tabela os ensaios que não satisfizeram as condições acima referidas).

Tabela 5.19 – Resultados dos ensaios Marshall

Tipo de Betume	Betume %	Sm (kN)	Fm (mm)	Q=S/F
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	5,5	15,7	2,8	5,6
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	6,0	16,8	3,8	4,4
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	6,5	15,0	5,0	3,0
Elaster 14/60 PMB 45/80-65	7,0	13,6	4,2	3,2
RAF AV PMB 45/80-75	5,5	15,6	2,8	5,6
RAF AV PMB 45/80-75	6,0	13,8	3,5	3,9
RAF AV PMB 45/80-75	6,5	14,1	3,4	4,1

5.2.4 Ensaio de determinação do índice de sensibilidade à água

A determinação da sensibilidade à água, de acordo com a norma EN 12697-12 (3), fez-se com apenas duas²⁰ misturas com a mesma percentagem de betume (**6,0%**), com os diferentes betumes.

Para o betume ELASTER 14/60 PMB 45/80-65, obteve-se um ITRS com valor 99,0% e para o betume RAF AV PMB 45/80-75, obteve-se um valor de 95,9%. Segundo o CETO (13), as misturas têm para este parâmetro o valor mínimo de 90%, logo verifica-se que ambas cumprem o requisito.

5.2.5 Ensaio de determinação da resistência conservada

O ensaio de determinação da resistência conservada obedece à normativa militar MIL-STD-620A. O ensaio foi realizado comparando as mesmas percentagens de betume (**6,1%**) para os dois tipos de betume²¹.

Para o betume ELASTER 14/60 (PMB 45/80-65), obteve-se um IRC com valor 104,0% e para o betume RAF AV (PMB 45/80-75), obteve-se um valor de 97,0%. Segundo o CETO (13), as misturas têm que cumprir o parâmetro de valor mínimo 80%. Logo verifica-se que ambas cumprem o requisito. No

²⁰ Foi entretanto realizado o ensaio ITRS com o betume RAF AV PMB 45/80-75 com 6,5% de betume, cujos resultados constam nos relatórios em anexo. Contudo apenas se fará descrição das misturas com 6,0%.

²¹ No momento de realização do ensaio, não havia informação da percentagem ótima, tendo sido adotado o valor de 6,1%.

Análise e discussão de resultados

entanto, no primeiro betume ensaiado, o resultado obtido revelou um resultado anormal, uma vez que não é plausível que uma mistura betuminosa apresente melhor comportamento em condições extremas que em condições normais.

5.3 COMENTÁRIOS EM RELAÇÃO AOS REQUISITOS DO CADERNO DE ENCARGOS DAS INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL, EP

O caderno de encargos das infraestruturas de Portugal (13), obriga a um estudo de formulação completo da mistura betuminosa, que em alguns aspetos não se conseguiu cumprir devido a condicionantes do laboratório.

O CETO refere que para a determinação da percentagem ótima em betume, devem ser produzidos em laboratório cinco misturas com percentagens diferentes com uma variação entre estas de 0,5%. Nos trabalhos realizados, para o Elaster 14/60 (PMB 45/80-65) produziram-se 4 misturas (5,5%, 6,0%, 6,5% e 7,0%), para o RAF AV (PMB 45/80-75), produziram-se 3 misturas (5,5%, 6,0% e 6,5%).

Não foi executado o ensaio de pista (*Wheel-tracking*), descrito na norma EN 12697-22 cujo estudo não foi abordado nesta tese.

5.3.1 Enquadramento dos resultados dos ensaios com os requisitos do CETO e verificação da percentagem ótima de betume

Tabela 5.20 – Enquadramento dos resultados com os requisitos do CETO das infraestruturas de Portugal

QUADRO COMPARATIVO			ELASTER 14/60 PMB 45/80-65				RAF AV PMB 45/80-65			VERIFICAÇÃO PERCENTAGEM ÓTIMA CALCULADA	
Requisito	Limite	Valor	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	PMB 45/80-65 (5,8%)	PMB 45/80-75 (5,6%)
Estabilidade (S) (KN)	Max	17,5	15,7	16,8	15,0	13,6	15,6	13,8	14,1	16,5	15,1
	Min	7,5									
Deformação (F) (mm)	Max	4	2,8	3,8	5,0	4,2	2,8	3,5	3,4	3,3	3,0
	Min	2									
Quociente Marshall (Q) (Kn/mm)	Min	3	5,6	4,4	3,0	3,2	5,6	3,9	4,1	5,0	5,0
Vazios na mistura de agregado (VMA) (%)	Min	14	15,9	16,3	17,2	17,3	15,2	15,8	16,3	16,3	15,3
Porosidade (Vm) (%)	Max	5	3,5	2,6	2,4	1,4	2,6	2,1	1,5	3,0	2,5
	Min	2									
Índice de Resistência conservada IRC (%)	Min	80	IRC para 6,1%: 104%				IRC para 6,1%: 97%			Não determinado	
Sensibilidade à água (ITRS) (%)	Min	90	ITRS para 6,0%: 99 %				ITRS para 6,0%: 96 %			Não determinado	
Escorrimento de Betume (%)	Max	0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	Não determinado	

5.3.2 Análise comparativa

Verifica-se que existem parâmetros que não são verificados de acordo com os requisitos:

Na mistura com o betume **Elaster 14/60** (PMB 45/80-65), verificam-se as seguintes não conformidades:

- A deformação máxima com as percentagens de 6,5% e 7,0%, em betume excedem a deformação máxima admitida (4mm).
- A porosidade mínima (2%) com a percentagem de betume de 7,0% não é verificada.

Análise e discussão de resultados

- O caderno de encargos define como percentagem mínima de betume na mistura de 6,0%, mesmo que os restantes parâmetros sejam verificados, como é o caso da mistura com 5,5% de betume.
- Para a determinação do Índice de resistência conservada, a mistura revelou melhor desempenho a condições extremas que a condições normais (ITRS=104%).

Na mistura com o betume **RAF AV** PMB 45/80-75, verificam-se as seguintes não conformidades:

- A porosidade mínima (2%) com a percentagem de betume de 6,5% não é verificada.

Os restantes parâmetros, verificam integralmente os requisitos do caderno de encargos (CETO) das Infraestruturas de Portugal, embora não se avaliasse nenhuma mistura ao ensaio de pista.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal, o estudo de misturas betuminosas a quente tipo *SMA*, tentando sobretudo compreender o seu funcionamento e a sua aplicabilidade no âmbito dos pavimentos rodoviários e aeroportuários.

Através deste estudo, compreendendo alguns conceitos adquiridos pela literatura da especialidade, conseguimos então entender a razão da sua aplicabilidade e as suas diferenças em relação às misturas betuminosas convencionais. Verifica-se que o *SMA* é, uma mistura descontínua na sua granulometria (ao contrário das misturas tradicionais), o que permite um melhor imbricamento entre os agregados que compõem a mistura betuminosa, contribuindo assim para uma matriz mineral mais consistente. A utilização de betumes modificados, vem contribuir para o seu bom desempenho pois, a elevada percentagem de betume na mistura, requer que este tenha uma maior viscosidade e com propriedades essencialmente elásticas ou plásticas. Adicionalmente, para que a mistura seja estável, isto é, não ocorra exsudação do betume, existe a necessidade de empregar materiais com capacidade de absorção do ligante para garantir a sua estabilidade, ou seja, logo devem ser adicionados materiais que garantam que o betume se fixe na mistura betuminosa. Outra da grande vantagem da utilização deste tipo de solução para pavimentos rodoviários e aeroportuários, embora não estudada neste trabalho, é sua reduzida deformabilidade quando solicitado a cargas elevadas, e a sua durabilidade que proporcionam um maior tempo de vida útil e menor custos associados à sua manutenção.

Neste trabalho pretendeu-se sobretudo, estudar o comportamento da mistura betuminosa, variando alguns dos seus componentes principais. Optou-se por manter a granulometria da mistura de agregados para todas as misturas executadas. Então, variou-se o tipo de estabilizadores, mantendo a sua percentagem em massa nas misturas, e também variou-se o tipo de betume utilizado, mas neste caso com várias percentagens de betume em massa, com o objetivo principal de determinar a percentagem ótima de betume para cada tipo estudado.

No estudo dos estabilizadores de drenagem, estudaram-se três soluções: Fibras celulósicas impregnadas com betume, fibras sintéticas e aparas de PVC. No seu estudo, cada uma apresentou diferentes resultados nas misturas que foram realizadas. Verificou-se que as aparas de PVC não funcionavam na mistura pois pela sua composição, praticamente maciça, são incapazes de absorver betume para o seu

Conclusão

interior, sendo que a sua absorção se limitava á sua superfície, sendo que esta opção foi descartada logo nos primeiros ensaios (escorrimento). A utilização de fibras sintéticas revelou melhor desempenho que a anterior, pois estas formam uma estrutura tridimensional onde o betume é retido e distribuído pelas fibras. Por último, estudou-se a aplicação de fibras impregnadas com betume comerciais, cujos resultados foram melhores que os dois anteriores nos ensaios de escorrimento, sendo que estas foram escolhidas para a formulação das misturas betuminosas com diferentes tipos e percentagens de betume. Também é importante referir que os betumes modificados por si só têm alguma capacidade de fixação de betume na mistura derivado à presença de estabilizadores na sua composição.

Nos ensaios de determinação da estabilidade e deformação Marshall, apenas se variou o tipo e percentagem de betume, tendo como objetivo determinar a percentagem ótima de betume.

Em análise dos resultados obtidos, constata-se que embora o caderno de encargos das infraestruturas de Portugal (CETO) defina uma percentagem mínima de betume nas misturas betuminosas SMA8 de 6,0%, verifica-se que, com percentagens mais baixas, os parâmetros de deformação, estabilidade, VMA e porosidade, comprem integralmente os requisitos deste documento. Da mesma forma, apurou-se que para percentagens acima de 6,5%, ambas as misturas já não verificam os limites mínimos de porosidade, logo pode-se concluir que é desaconselhável o uso de percentagens de betume acima deste valor.

Em termos de execução da mistura betuminosa, deve ter-se sempre em conta as condições em que se realiza a mistura (temperatura e humidade), sendo que a temperatura é um fator essencial para que esta se realize corretamente sendo esta definida pelo fabricante para cada tipo de betume. Também é recomendado que após a execução da mistura e imediatamente antes da compactação, esta deverá ser esquartelada, para que na moldagem dos provetes não hajam grandes variações da composição do agregado nos provetes a serem compactados evitando assim elevadas discrepâncias nos ensaios.

Um fator a ter em conta e apesar de não ser quantificável, é a trabalhabilidade das misturas, pois verifica-se que com betumes modificados com percentagens baixas, existiu uma maior dificuldade de homogeneizar a mistura, logo a trabalhabilidade da mistura é mais difícil com essa gama de percentagens. Este ponto é bastante importante quando a mistura é aplicada em obra.

É de referir, a dificuldade em se trabalhar com misturas betuminosas com betume modificados em laboratório, em que resultaram alguns valores anormais. Verificou-se ainda, nalguns ensaios, sobretudo na determinação das baridades e estabilidade Marshall, grandes diferenças entre valores, que obrigou a omitir os resultados e a repetir os ensaios. Da mesma forma foram obtidos resultados não razoáveis para o índice de resistência conservada (IRC).

Como principal conclusão, sobre a avaliação de desempenho das diferentes misturas betuminosas, que compreendeu a variação de alguns componentes da mistura, conclui-se que para cada tipo de betume utilizado, as percentagens ótimas de betume foram distintas:

- Para o Elaster 14/60 PMB 45/80-65, a percentagem determinada foi de **5,8%**;
- Para o RAF AV PMB 45/80-75, a percentagem determinada foi de **5,6%**.

Os resultados da determinação de percentagem ótima de betume revelam-se abaixo dos valores correntes e normais. Tais resultados merecem uma nova análise e ensaios adequados, para confirmação.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como desenvolvimentos futuros, que foram surgindo ao longo da execução deste trabalho, propõe-se como complemento a este estudo, a realização de ensaios de repetição deste tipo de misturas, bem como o estudo de formulação de misturas betuminosas tipo SMA, com menores percentagens de betume, incidindo sobretudo no betume RAF AV (PMB 45/80-75), ou outros de gama superior. Propõe-se também o estudo de misturas SMA com agregados reciclados e com outros tipos de fibras com capacidade de retenção de betume.

Deve ser fortemente considerado um novo método de ensaio que não apresente tantas discrepâncias entre provetes da mesma mistura como acontece no ensaio Marshall. Adicionalmente, deveria ser estudado o efeito da diminuição da temperatura da mistura e do betume.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. EN 12697-18: *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 18: Binder drainage*. CEN. 2012.
2. EN 12697-34, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 34: Marshall Test*. CEN. 2012.
3. EN 12697-12 – *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. CEN. 2008.
4. EN 13108-5, *Bituminous mixtures - Part 5 :Stone mastic asphalt*. CEN. 2016.
5. EAPA. European Asphalt Pavement Association. [Online] [Citação: 25 de Maio de 2017.] <http://www.eapa.org/>.
6. Blazejowski, Krzysztof. *Stone matrix asphalt: theory and practice*. New York : CRC, press, 2011. ISBN 978-1-4398-1971-5.
7. Branco, Fernando et al. *Pavimentos Rodoviários*. Lisboa : Alamedina, 2016. ISBN 9789724026480.
8. Fonseca, Pedro Lopes. *Propriedades volumétricas de misturas betuminosas*. Universidade do Porto : Tese de Mestrado, 2011.
9. Almeida, J.C.G.R. *Análise Estrutural de Pavimentos Rígidos pelo Método dos elementos finitos*. Instituto Superior Técnico : Tese de Mestrado, 1986.
10. Lopes, Óscar Moreira. *Misturas betuminosas - determinação das características para o cálculo de pavimentos*. Universidade do Porto : Tese de Mestrado, 2009.
11. Alves, Luis Ricardo Rosas. *Ligantes Betuminosos e a normalização europeia*. Universidade do Porto : Tese de Mestrado, 2011.
12. EN 12697-5: *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5:Determination of the maximum density*. CEN. 2003.
13. *Pavimentação - Condições especiais. Infraestruturas de Portugal, Ip*. Lisboa : IP, 2014. Capítulos 14.03 e 15.03.
14. NP EN 933-1: *Ensaios de propriedades dos agregados, Parte 1: Análise granulométrica pelo método da Peneiração*. IPQ. 2012.
15. NP EN 1097-6: *Determinação da massa volúmica e absorção da água*. IPQ. 2012.
16. Hunter, Dr.Robert N.et all. *Shell Bitumen handbook*. UK : Shell, 2016. 978-0-7277-5837-8.

Referências bibliográficas

17. EN 13108-1, *Bituminous mixtures, Material specifications - Part 1: Asphalt concrete*; **CEN**. 2016.
18. EN 12591, *Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens*. **CEN**. 2016.
19. EN 12697-35, *Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing*. **CEN**. 2016.
20. EN 1426, *Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration*. **CEN**. 2016.
21. EN 14023, *Bitumen and bituminous binders - Specification framework for polymer*. **CEN**. 2016.
22. **Arrambique, M. Duriez et J. Liants Hydrocarbonés**. França : Dunod, 1954.
23. EN 1427, *Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point – Ring and ball method*. **CEN**. 2015.
24. NP EN 933-2: *Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão das aberturas*. **IPQ**. 2012.
25. NP EN 932-2: *Métodos de redução de amostras laboratoriais*. **IPQ**. 2008.
26. **Gameiro, Ana Filipa**. *Produção de Misturas Betuminosas com betume modificado: Compactabilidade e comportamento mecânico*. Fct,Lisboa : Tese de Mestrado, 2013.
27. EN 12697-6: *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*. **CEN**. 2016.
28. EN 12697-29, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen*. **CEN**. 2012.
29. EN 12697-30, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 30: Specimen preparation by impact compactor*; **CEN**. 2012.
30. EN 12697-23, *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. **CEN**. 2003.
31. **JP. Pfeiffer, Van Dormael**. The rheological properties of asphaltic bitumen. *Journal of the institute of petroleum technologists*. 1936.
32. **Pimentel, Carlos Alberto**. *Formulação de misturas betuminosas a quente: contribuição para um novo método de formulação*. Lisboa : FCT, 2013.

ANEXOS

Anexo nº1 – Ficha de produto Betume Cepsa 35/50

Anexo nº2 – Ficha de produto Betume Cepsa Elaster 14/60 PMB 45/80-65

Anexo nº3 – Ficha de produto Betume Cepsa RAF AV PMB 45/80-75

Anexo nº4 – Ficha de produto Filer Eurocálcio

Anexo nº5 – Ficha de produto Fibras Viatop Premium®

Anexo nº6 – Resumo dos resultados obtidos em cada ensaio

Anexo nº7 – Ensaio de Escorrimento pela EN 12697-18, pelo método de Schellenberg (Resumo)

CEPSASFALT 35/50

DEFINIÇÃO

Betume asfáltico para pavimentação, de acordo com as especificações da EN 12591 para o betume 35/50.

ESPECIFICAÇÕES:

Características	Unidade	Norma	Min.	Máx.
Betume original				
Penetração (25 °C; 100g; 5s)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Índice de penetração	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	50	58
Temperatura de fragilidade Fraass	°C	EN 12593	-	-5
Solubilidade	%	EN 12592	99,0	-
Temperatura de inflamação	°C	EN 2592	240	-
Resistência ao envelhecimento a 163 °C (EN 12607-1)				
Varição de massa	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetração retida (25 °C; 100g; 5s)	% p.o.	EN 1426	53	-
Δ Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	11

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABALHO:

- Temperatura da mistura (°C): 160 - 165
- Temperatura de armazenamento e de utilização do ligante (°C): 160 - 165
- Temperatura de compactação (°C): 150 - 160

Anexo nº2 – Ficha de produto Betume Cepsa Elaster 14/60 PMB 45/80-65

ELASTER 14/60 (PMB 45/80-65)**DEFINIÇÃO**

Betume asfáltico modificado com polímeros, obtido por reação química entre o ligante base e polímeros do tipo elastomérico, que cumpre as especificações da norma UNE EN 14023 para um betume PMB 45/80-65.

ESPECIFICAÇÕES:

Características	Unidade	Norma	Mín.	Máx.
Betume original				
Penetração (25 °C; 100g; 5s)	0,1 mm	EN 1426	45	80
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	65	
Temperatura de fragilidade Fraass	°C	E 12593	-	-15
Estabilidade ao armazenamento:		EN 13399		
• Diferença de temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	5
• Diferença de penetração	0,1 mm	EN 1426	-	9
Recuperação elástica a 25 °C	%	EN 13398	70	-
Temperatura de inflamação	°C	EN 2592	235	-
Força-Ductilidade, a 10 °C (Tração a 50 mm/min)	J/cm ²	EN 13589 EN 13703	3	-
Durabilidade – Resistência ao envelhecimento EN 12607-1				
Varição de massa	%	EN 12607-1	-	1
Penetração (25 °C; 100g; 5s)	% p.o.	EN 1426	60	-
Δ Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	10
Diminuição da temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	5

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABALHO:

- Temperatura da mistura (°C): 160 - 170
- Temperatura de armazenamento e de utilização do ligante (°C): 160 - 170
- Temperatura de compactação (°C): 155 - 165
- Temperatura máxima de aquecimento (°C): 180

ELASTER RAF AV (PMB 45/80-75)

DEFINIÇÃO

Betume asfáltico modificado com polímeros, obtido por reação química entre o ligante base e polímeros do tipo elastomérico, que cumpre as especificações da norma UNE EN 14023 para um betume PMB 45/80-75.

ESPECIFICAÇÕES:


Características	Unidade	Norma	Min.	Máx.
Betume original				
Penetração (25 °C; 100g; 5s)	0,1 mm	EN 1426	45	80
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	75	
Temperatura de fragilidade Fraass	°C	E 12593	-	-15
Estabilidade ao armazenamento:		EN 13399		
• Diferença de temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	5
• Diferença de penetração	0,1 mm	EN 1426	-	13
Recuperação elástica a 25 °C	%	EN 13398	80	-
Temperatura de inflamação	°C	EN 2592	235	-
Força-Ductilidade, a 10 °C (Tração a 50 mm/min)	J/cm ²	EN 13589 EN 13703	3	-
Durabilidade – Resistência ao envelhecimento EN 12607-1				
Varição de massa	%	EN 12607-1	-	1
Penetração (25 °C; 100g; 5s)	% p.o.	EN 1426	60	-
Δ Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	10
Diminuição da temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	5

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABALHO:

- Temperatura da mistura (°C): 175 - 185
- Temperatura de armazenamento e de utilização do ligante (°C): 175 - 185
- Temperatura de compactação (°C): 170 - 180
- Temperatura máxima de aquecimento (°C): 190

Anexo nº4 – Ficha de produto Filer Eurocálcio

Características essenciais (Essential Features)		Especificações técnicas harmonizadas (Harmonized technical specifications)		
		EN 12620:2002+A1:2008	EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004	EN 13139:2002 + EN 13139/AC:2004
Tipo de agregado (Type Aggregate)		Filer (Filer)	Filer (Filer)	Filer (Filer)
Qualidade dos Finos – Azul metileno Fines Quality - Methylene blue		MB5 2g/kg (VI)	MB,10 (C)	NR Nil
REQUISITOS FÍSICOS (PHYSICAL REQUIREMENTS)	Massa Volúmica das partículas (Particle Density)	2,69±0,05 Mg/m ³ (VD)	2,69±0,05 Mg/m ³ (VD)	2,69±0,05 Mg/m ³ (VD)
	Teor de Humidade (Water content)	NA	<0,5 (VL)	NA Nil
	Vazios do filer seco compactado (Rigden) (Voids of dry compacted filler (Rigden))	NA	NPD	NA Nil
	"Variação da temperatura anel e bola" (Delta ring and ball of filler aggregate)	NA	NPD	NA Nil
	Solubilidade na Água (Water solubility)	NA	NPD	NA Nil
	Susceptibilidade à Água (Water susceptibility)	NA	NPD	NA Nil
	"Número de betume" Bitumen number of added filler	NA	NPD	NA Nil
	Superfície Específica - Método Blaine Blaine specific surface	NA	NPD	NA Nil
	Durabilidade: Reactividade Álcali-Silica Alkali-silica reactivity	0,01% (VI)	NA	0,01% (VI)
	Resistência ao gelo-degelo Resistance to freezing and thawing	NA	NA	NA Nil
	Estabilidade Volumétrica (Volum stability)	<0,075% (VL)	NA	NA Nil
REQUISITOS QUÍMICOS (CHEMICAL REQUIREMENTS)	Teor de Cloretos Chlorides	<0,001% (VL)	NA	<0,001% (VL)
	Sulfatos solúveis em ácido Acid soluble sulfates	AS _{0,2} (C)	NA	AS _{0,2} (C)
	Enxofre total (Total Sulfur)	<0,04% (VL)	NA	<0,04% (VL)
	Teor de húmus Constituents which alter the rate of setting and hardening of mortar	*mais claro (VD) Pale	NA	*mais claro (VD) Pale
	Teor de Carbonato (Calcium carbonate content)	CO ₂	44±1% (VI)	NA
CaCO ₃		97±3% (VI)		



**Fibras Projectadas
Pela Natureza**

VIATOP PREMIUM

C/ Venezuela, 103 planta 4
08019 Barcelona
Tel.: 34 -933 262 888
Fax: 34 -933 262 889
E-mail: info@jrsiberica.com
www.jrsiberica.com

FIBRAS DE CELULOSE, GRANULADAS

➤ **Definição**

Grânulos constituídos por uma mistura de fibras naturais de celulose com betume, que podem ser utilizados como aditivo para modificar misturas betuminosas, de modo a melhorar as suas características, aumentando a sua durabilidade e o seu desempenho.

➤ **Características do produto**

Características do granulado:

Aspecto	grânulos cilíndricos
Conteúdo de fibras	87 a 93 %
Comprimento médio dos grânulos.....	2 a 8 mm
Diâmetro médio dos grânulos	5 ± 1 mm
Densidade aparente	440 a 520 g/l
Análise granulométrica, # < 4,5 mm.....	máx. 10 %
Não é tóxico e é fisiologicamente seguro	

Características do betume incluído no granulado:

Penetração (de acordo com a EN 1426) a 25º C,	50 / 70 (0,1 mm)
Temp. de amolecimento (teste de anel e bola, EN 1427) ..	46 / 54 °C

Características da fibra:

Composição básica	fibra de celulose técnica
Conteúdo em celulose	80 ± 5 %
Valor do pH (5 g/100 ml)	7,5 ± 1,0
Comprimento médio da fibra	1100 µm
Diâmetro médio da fibra	45 µm

➤ **Dosificação das fibras em misturas betuminosas fabricadas a quente**

Em todos os casos, a proporção de fibras na mistura betuminosa deve estar compreendida entre os seguintes valores: 0,3 e 0,5 % da mistura (em peso).

Anexo nº6 – Resumo dos resultados obtidos em cada ensaio

Ensaio	Norma	Resultado(s)	Unidade
Análise granulométrica 0/4	EN 933-1	Curva granulométrica	
Análise granulométrica 4/8	EN 933-1	Curva granulométrica	
Índice de achatamento 4/8	EN 933-3	FI 6	S/unidades
Massa volúmica 0/4	EN 1097-6	2,66	Mg/m ³
Massa volúmica 4/8	EN 1097-6	2,63	Mg/m ³
Penetração Elaster 14/60 PMB 45/80-65	EN 1426	48 X (0,1)	mm
Penetração CEPSA 35/50	EN 1426	45 X (0,1)	mm
Penetração RAF AV PMB 45/80-75	EN 1426	67 X (0,1)	mm
Temperatura Anel e Bola Elaster 14/60 PMB 45/80-65	EN 1427	67,2	°C
Temperatura Anel e Bola CEPSA 35/50	EN 1427	55,0	°C
Temperatura Anel e Bola RAF AV PMB 45/80-75	EN 1427	81,2	°C
Baridade ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (5,5%)	EN 12697-6	2,333	Mg/m ³
Baridade ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (6,0%)	EN 12697-6	2,356	Mg/m ³
Baridade ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (6,5%)	EN 12697-6	2,337	Mg/m ³
Baridade ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (7,0%)	EN 12697-6	2,345	Mg/m ³
Baridade RAF AV PMB 45/80-75 (5,5%)	EN 12697-6	2,362	Mg/m ³
Baridade RAF AV PMB 45/80-75 (6,0%)	EN 12697-6	2,357	Mg/m ³
Baridade RAF AV PMB 45/80-75 (6,5%)	EN 12697-6	2,350	Mg/m ³
BMT ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (5,5%)	EN 12697-5	2,418	Mg/m ³
BMT ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (6,0%)	EN 12697-5	2,420	Mg/m ³
BMT ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (6,5%)	EN 12697-5	2,394	Mg/m ³
BMT ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (7,0%)	EN 12697-5	2,378	Mg/m ³
BMT RAV AV PMB 45/80-75 (5,5%)	EN 12697-5	2,424	Mg/m ³
BMT RAV AV PMB 45/80-75 (6,0%)	EN 12697-5	2,407	Mg/m ³

Anexos

BMT RAV AV PMB 45/80-75 (6,5%)	EN 12697-5	2,386	Mg/m ³
Marshall ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (5,5%)	EN 12697-35	S 15,7	kN
		F 2,8	mm
		Q 5,6	kN/mm
Marshall ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (6,0%)	EN 12697-35	S 16,8	kN
		F 3,8	mm
		Q 4,4	kN/mm
Marshall ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (6,5%)	EN 12697-35	S 15,0	kN
		F 5,0	mm
		Q 3,0	kN/mm
Marshall ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (7,0%)	EN 12697-35	S 13,6	kN
		F 4,2	mm
		Q 3,2	kN/mm
Marshall RAF AV PMB 45/80-75 (5,5%)	EN 12697-35	S 15,6	kN
		F 2,8	mm
		Q 5,6	kN/mm
Marshall RAF AV PMB 45/80-75 (6,0%)	EN 12697-35	S 13,8	kN
		F 3,5	mm
		Q 3,9	kN/mm
Marshall RAF AV PMB 45/80-75 (6,5%)	EN 12697-35	S 14,1	kN
		F 3,4	mm
		Q 4,1	kN/mm
ITRS ELASTER 14/60 PMB 45/80-65 (6,0%)	EN 12697-12	99%	ITRS
ITRS RAF AV PMB 45/80-75 (6,0%)	EN 12697-12	96%	ITRS

Anexo nº7 – Ensaio de Escorrimento pela EN 12697-18, pelo método de Schellenberg (Resumo)

Ensaio nº	Lote	Tª	Componentes				Betume		Tipo	Fibras		W1	W2	W3	W4	D	R	Dm	Validação (h)
			Filer	0/4	4/8	8/11,2	Peso	%		Peso	Tipo de Fibras	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	
			6%	30%	60%	4%	(g)	(m/m)		0,30%		(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%)	
			(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(m/m)		(g)		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	
1	1	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	0,0	Sem Fibras	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	0,0	Sem Fibras	231,2	1165,0	232,2	0,0	0,11	0,0	0,11	Cumpre
	3	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	0,0	Sem Fibras	230,5	1136,6	231,3	0,0	0,11			Cumpre
2	1	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	231,2	1094,3	232,0	0,0	0,09	0,0	0,09	Cumpre
	3	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	230,5	974,0	231,2	0,0	0,09			Cumpre
3	1	185	58,4	291,9	583,9	38,9	65,4	6,3	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	185	58,4	291,9	583,9	38,9	65,4	6,3	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	231,2	1174,3	231,9	0,0	0,07	0,0	0,07	Cumpre
	3	185	58,4	291,9	583,9	38,9	65,4	6,3	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	230,5	1205,6	231,2	0,0	0,07			Cumpre
4	1	185	58,4	291,9	583,9	38,9	68,5	6,6	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	185	58,4	291,9	583,9	38,9	68,5	6,6	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	231,2	1143,3	232,1	0,0	0,10	0,0	0,10	Cumpre
	3	185	58,4	291,9	583,9	38,9	68,5	6,6	PMB 45/80-65	3,1	Viatop	230,5	1173,8	231,4	0,0	0,10			Cumpre
5	1	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	231,2	1296,6	232,0	0,0	0,06	0,0	0,07	Cumpre
	3	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	230,5	1238,7	231,1	0,0	0,08			Cumpre
6	1	185	58,4	291,9	583,9	38,9	65,4	6,3	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	185	58,4	291,9	583,9	38,9	65,4	6,3	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	231,2	1053,7	231,8	0,0	0,07	0,0	0,07	Cumpre
	3	185	58,4	291,9	583,9	38,9	65,4	6,3	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	230,5	1287,6	231,1	0,0	0,06			Cumpre
7	1	185	58,4	291,9	583,9	38,9	68,5	6,6	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	185	58,4	291,9	583,9	38,9	68,5	6,6	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	231,2	1210,5	231,9	0,0	0,07	0,0	0,07	Cumpre
	3	185	58,4	291,9	583,9	38,9	68,5	6,6	PMB 45/80-65	3,1	Sintéticas	230,5	1217,4	231,2	0,0	0,07			Cumpre
8	1	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	PVC	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	PVC	231,2	1240,9	232,0	0,0	0,11	0,0	0,11	Cumpre
	3	185	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	PMB 45/80-65	3,1	PVC	230,5	1179,7	231,2	0,0	0,11			Cumpre
9	1	170	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	AC 30/50	0,0	Sem Fibras	-	-	-	-	-	-	-	Rejeitado
	2	170	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	AC 30/50	0,0	Sem Fibras	231,2	1211,2	233,1	0,0	0,20	0,0	0,18	Cumpre
	3	170	58,4	291,9	583,9	38,9	62,3	6,0	AC 30/50	0,0	Sem Fibras	230,5	1306,5	232,9	0,0	0,16	0,0		Cumpre
Observação	a)	Massa do Copo vazio				e)	Material escorrido												
	b)	Massa do Copo + Provete				f)	Resíduo no peneiro												
	c)	Massa do Copo e resíduo				g)	Resíduo no peneiro (média)												
	d)	Massa de resíduo seco retido no				h)	Se a diferença entre D dos dois ensaios >0,5: O ensaio deve ser repetido, média de D dos dois ensaios												