



Mestrado em Engenharia Civil

**Misturas Betuminosas Temperadas, do tipo SMA,
produzidas com betume aditivado em refinaria e
fibras celulósicas**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia civil – Especialização em Construção urbana

Autor

Soraia Cristina Ventura Rama

Orientador

Prof. Doutor Silvino Dias Capitão

Professor coordenador do Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, junho 2019

Agradecimentos

Com a finalização deste trabalho, resta-me apenas prestar os devidos agradecimentos e enorme reconhecimento a todas as pessoas e entidades que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho académico.

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor Silvino Dias Capitão, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela excelente orientação, disponibilidade demonstrada, pela amizade e pelos conhecimentos facultados durante a minha formação. Agradeço pelos conselhos, fundamentais para a realização desta investigação, e por ter sempre uma palavra de ânimo perante os obstáculos encontrados.

À empresa JRS, na pessoa do Doutor Fernando Martinho, pelo fornecimento das fibras celulósicas, bem como pela sua ajuda e conselhos.

Ao Engenheiro Carlos Renato Rodrigues, técnico do Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil do Instituto de Engenharia de Coimbra, pela enorme ajuda na realização do todo o trabalho laboratorial, pela sua boa disposição e amizade.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, especialmente ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de desenvolver um projeto de carácter experimental, e a todos os docentes com quem me cruzei durante todo o meu percurso académico e que contribuíram para a minha formação.

Ao Ricardo, pelo incansável apoio, paciência, pelas palavras de encorajamento, críticas necessárias e por nunca me ter deixado desistir. Obrigado por todo o carinho e compreensão.

Por último, agradeço à minha família. Ao meu pai e à minha mãe por estarem sempre ao meu lado, pela confiança e por todo o esforço e dedicação. Não existem palavras para agradecer tudo o que fizeram e continuam a fazer por mim.

A todos, muitíssimo obrigado!

Soraia Cristina Ventura Rama

Coimbra, junho de 2019

Resumo

Ao longo dos tempos, tem-se verificado uma maior preocupação e consciência ambiental, pelo que os organismos e associações independentes procuram sensibilizar as empresas e os governos a nível mundial, para um consumo mais racional da energia, tendo em vista uma menor emissão de gases poluentes para a atmosfera.

A indústria dos pavimentos rodoviários é bastante dependente das indústrias de extração de petróleo e de rocha, e nesse sentido tem-se desenvolvido esforços com a finalidade de encontrar alternativas mais ecológicas e sustentáveis na produção de misturas betuminosas.

Uma das formas de reduzir o consumo de energia, e conseqüentemente a emissão de gases poluentes associada, centra-se na preferência de produção de misturas betuminosas temperadas em relação às tradicionais misturas a quente.

A manutenção e reabilitação de pavimentos acarretam um elevado peso ambiental, nomeadamente no que diz respeito à quantidade de resíduos produzidos e ao consumo de energia e novos materiais, pelo que a necessidade de reduzir a periodicidade destas ações torna-se necessária.

As misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA) são caracterizadas pela sua elevada durabilidade e baixo custo de manutenção ao longo do seu ciclo de vida. Além das diversas vantagens do ponto de vista económico e ambiental que apresentam, destacando-se a redução do consumo de matérias-primas naturais, a redução do volume de resíduos a transportar a vazadouro, a redução do consumo de energia e a redução dos custos de manutenção e reabilitação dos pavimentos.

Neste contexto, o presente trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de misturas betuminosas temperadas, do tipo SMA, produzidas com betume aditivado em refinaria. Esta é uma técnica inovadora em que o betume fornecido já é aditivado, dispensando o uso de outros aditivos para reduzir a temperatura de manipulação.

Ao longo deste trabalho fez-se um breve enquadramento e uma abordagem histórica da evolução das misturas betuminosas temperadas e descrevem-se as diferentes tecnologias e técnicas de produção, apresentando os seus benefícios e desvantagens. Posteriormente é realizada também uma abordagem histórica e as principais características das misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), assim com as suas vantagens e desvantagens.

Por último, foram realizados estudos experimentais com o intuito de investigar as propriedades volumétricas e o comportamento mecânico de misturas temperadas do tipo SMA, produzidas com betume aditivado em refinaria, contribuindo para o desenvolvimento destas misturas, com o objetivo de promover a sua utilização futura em trabalhos de pavimentação rodoviária.

Da análise dos resultados obtidos através dos trabalhos experimentais, foi possível retirar algumas conclusões. As misturas do tipo SMA são misturas um pouco complexas e pequenas variações nos seus elementos traduzem-se em variações significativas no seu comportamento mecânico, que depende muito do tipo de betume e da forma e quantidade dos agregados.

Através do estudo realizado conclui-se que tanto o betume aditivado em refinaria, com a composição disponível no mercado, como o betume tradicional, do tipo 35/50, não são os mais apropriados para produzir misturas temperadas do tipo SMA, pois não permitem obter o elevado nível de resistência à deformação permanente esperado para uma mistura deste tipo.

Palavras-Chave

Aditivos; Betume Aditivado em Refinaria; Fibras celulósicas; Misturas Betuminosas Temperadas (MBT); Preocupação Ambiental; *Stone Mastic Asphalt* (SMA).

Abstract

Over time it has been observed a greater concern and environmental awareness. As a consequence, the agencies and independent associations have sought to sensitize enterprises and governments worldwide, for a more rational energy consumption, aiming to lower pollutant gases emission to the atmosphere.

The road pavement industry is very dependent of oil and rock extraction industries, and in this sense, efforts have been made to find more ecological and sustainable alternatives of producing asphalt mixtures.

One way of reducing energy consumption, and consequently the emission of gases associated, focuses on the preference of producing warm mix asphalt over traditional hot mixes.

The maintenance and rehabilitation of pavements entail a high environmental impact, in particular as regards the quantity of waste produced, the energy and new materials consumption, so it becomes necessary to reduce the timing of these actions.

Stone Mastic Asphalt (SMA) are characterized by their high durability and low maintenance costs over its lifecycle, besides the several economic and environmental benefits, emphasizing the consumption reduction of natural raw materials, the reduction of the waste volume to be transported to dump, the reduction of energy consumption and the reduction of pavements maintenance and rehabilitation costs.

In this context, the present dissertation intends to contribute to the development of warm mixtures SMA produced with a terminal blend bitumen. This is an innovative technique in which the supplied bitumen is already additivated, dispensing the use of other additives to reduce the handling temperature.

Throughout this work a brief framework and a historical approach to the evolution of the warm mixtures asphalt and different technologies and production techniques are described, presenting their benefits and disadvantages. Afterwards, it is also described a historical approach and the main characteristics of Stone Mastic Asphalt (SMA), as well as their advantages and disadvantages.

Finally, experimental studies were carried out in order to find the volumetric properties and mechanical behaviour of SMA warm mix produced with terminal blend bitumen, contributing to the development of these mixtures, with the aim of promoting their future use in road paving works.

From the analysis of the results obtained through the experimental works, some conclusions could be drawn. SMA mixtures are somewhat complex and small variations in their elements translate into significant variations in their mechanical behavior, which largely depends on the type of bitumen and the shape and quantity of aggregates.

The study concludes that both refined additive bitumen, with commercially available composition, and traditional 35/50 bitumen are not the most suitable for producing SMA warm

mix, they do not allow the high level of permanent creep resistance expected for this type of mixture.

Key-words

Additives; Terminal Blend Bitumen; Cellulose Fibres; Warm Mix Asphalt (WMA); Environmental Concern; Stone Mastic Asphalt (SMA).

Índice

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e metodologias	2
1.3 Estrutura de trabalho	2
2. Revisão da literatura	5
2.1 Misturas betuminosas temperadas (MBT).....	5
2.1.1 Generalidades	5
2.1.2 Principais características e tecnologias de produção	7
2.1.3 Vantagens e desvantagens.....	15
2.2 Misturas betuminosas do tipo <i>Stone Mastic Asphalt</i> – SMA	17
2.2.1 Evolução	18
2.2.2 Princípio de funcionamento	20
2.2.3 Materiais constituintes do SMA	22
2.2.4 Formulação de misturas do tipo SMA	25
2.2.5 Características de desempenho das misturas SMA	28
2.2.6 Desvantagens das misturas SMA	30
2.2.7 Fabrico, Transporte e Aplicação de misturas do tipo SMA.....	30
2.2.8 Patologias	32
2.2.9 Utilização das misturas SMA no mundo	35
3. Ensaios utilizados no estudo laboratorial.....	37
3.1 Enquadramento	37
3.2 Materiais granulares	37
3.3 Betume asfáltico.....	38
3.4 Fabrico e moldagem dos provetes.....	39
3.5 Propriedades volumétricas.....	41
3.5.1 Baridade	41
3.5.2 Baridade máxima teórica	43
3.5.3 Porosidade, VMA e VFB.....	45
3.6 Avaliação do escorrimento de betume pelo método de <i>Schellenberg</i>	46

3.7 Características mecânicas	47
3.7.1 Compressão de Marshall	47
3.7.2 Sensibilidade à água	48
3.7.3 Resistência à deformação permanente	49
4. Discussão e apresentação de resultados	55
4.1 Enquadramento	55
4.2 Formulação da mistura a estudar	55
4.3 Caracterização da mistura em estudo	75
4.4 Discussão baseada na resistência à deformação permanente	84
4.5 Comparação das características das misturas em estudo com as obtidas em outros estudos similares	100
4.6 Considerações finais	102
5. Conclusões gerais e trabalhos futuros	103
5.1 Síntese do trabalho e Conclusões gerais	103
5.2 Prosseguimento de trabalhos futuros	106
5.3 Considerações finais	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
REFERÊNCIAS NORMATIVAS	113
APÊNDICES	115
APÊNDICE I – Fichas técnicas	116
APÊNDICE II – Análise granulométrica	124
APÊNDICE III – Estudo da mistura SMA-BN	130
APÊNDICE IV – Estudo da mistura SMA-BR	134
APÊNDICE V – Estudo com base na deformação permanente	136

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Resumo histórico das misturas betuminosas temperadas	6
Figura 2.2 – Diferença nas emissões de fumos entre as MBQ (esquerda) e as MBT (direita) observados na central durante a descarga das misturas betuminosas para o camião (Silva et al., 2009)	6
Figura 2.3 – Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção (adaptado de FHWA,2008)	7
Figura 2.4 – Aditivo Sasobit (Prowell et al, 2011)	9
Figura 2.5 – Melhoria do ângulo de contacto devido à incorporação de aditivo químico (Martinho, 2014).....	9
Figura 2.6 – Aspeto dos aditivos <i>RedisetTM WMX</i> (esquerda) e <i>Cecabase[®] RT</i> (direita) (Pereira, 2010)	10
Figura 2.7 – Equipamento para junção simultânea do aditivo e do betume (Hurley e Prowell, 2008)	11
Figura 2.8 – Ilustração esquemática de produção de betume espuma por injeção de água (Martinho, 2014).....	12
Figura 2.9 – Processo <i>WMA-Foam[®]</i> (Ferreira, 2009).....	12
Figura 2.10 – Processo LEA (adaptado de FHWA, 2008).....	13
Figura 2.11 – Zeólitos <i>Aspha-min[®]</i> (esquerda) e <i>Advera[®]</i> (direita) (Antunes, 2014)	14
Figura 2.12 – <i>Viatop CT 40[®]</i> (Antunes, 2014)	14
Figura 2.13 – Pavimento flexível (Antunes, 2014).....	18
Figura 2.14 – Divisão da mistura SMA (adaptado de Blazejowski, 2011).....	20
Figura 2.15 – Comparação entre misturas convencionais e misturas do tipo SMA (adaptado de Blazejowski, 2011)	21
Figura 2.16 – Comparação entre o aspeto interno das misturas convencionais com as misturas SMA (El-Hage, 2012).....	21
Figura 2.17 – a) Aspeto da superfície de um SMA (Antunes, 2014); b) Boa drenagem da água superficial (Martinho et al, 2013).	22
Figura 2.18 – Diferentes formas em que podem ser encontradas as fibras: a) soltas (Blazejowski, 2011); b) pellets (Blazejowski, 2011); c) granulado revestido com cera; d) granulado revestido com betume.	24
Figura 2.19 – Relação entre a quantidade de vazios e as frações de agregados (adaptado, Blazejowski, 2011)	26

Figura 2.20 – Durabilidade das diversas misturas utilizadas a nível europeu (Martinho et al, 2013; Antunes, 2014).....	29
Figura 2.21 – a) Aspeto do <i>gritting</i> aplicado sobre a superfície do SMA; b) Execução do processo de <i>gritting</i> com equipamento acoplado ao cilindro compactador (Blazejowski, 2011)	32
Figura 2.22 – <i>Fat spots</i> de ligante (a) e de mástique (b) (Blazejowski, 2011).....	33
Figura 2.23 – Nódulos de estabilizadores no interior do pavimento (Blazejowski, 2011)	33
Figura 2.24 – Estrutura do SMA muito fechada (a) e muito aberta (b) (Blazejowski, 2011) ..	33
Figura 2.25 – Infiltração de água no pavimento (Blazejowski, 2011).....	34
Figura 2.26 – Patologias relacionadas com a temperatura e aplicação da mistura: Porosidade longitudinal (a); aplicação a temperatura muito baixa (b); porosidade transversal (c) e falta de aderência da mistura à base (d) (Blazejowski, 2011)	34
Figura 3.1 – Peneiração: a) série de peneiros; b) peneirador automático	38
Figura 3.2 – Aspeto dos ensaios de medição da temperatura de amolecimento do betume pelo método do anel e bola	39
Figura 3.3 – Fabrico dos provetes.....	40
Figura 3.4 – Compactador de Marshall.....	40
Figura 3.5 – Martelo de compactação por vibro-compressão	41
Figura 3.6 – Baridade do provete saturado com a superfície seca.....	42
Figura 3.7 – Baridade do provete com selagem	43
Figura 3.8 – Baridade máxima teórica com auxílio do picnómetro de vácuo.....	44
Figura 3.9 – Ensaio de escorrimento.....	47
Figura 3.10 – Ensaio de compressão de Marshall (Antunes, 2014)	48
Figura 3.11 – Ensaio para determinação da sensibilidade à água.....	49
Figura 3.12 – Ensaios usados para avaliação da resistência à deformação permanente (Capitão, 2003).	50
Figura 3.13 – Aspeto geral do ensaio.....	51
Figura 3.14 – Curva de tensão-deformação (adaptado EN 12697-25)	52
Figura 3.15 – Exemplo de curva deformação-tempo (adaptado EN 12697-25).....	52
Figura 4.1 – Fibras celulósicas utilizadas.....	55
Figura 4.2 – Agregados naturais utilizados (1 ^a tentativa)	57
Figura 4.3 – Curvas granulométricas dos agregados (1 ^a tentativa).....	57
Figura 4.4 – Apresentação gráfica dos limites para SMA 12,5	58

Figura 4.5 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (1ª tentativa).....	59
Figura 4.6 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos no projeto NCHRP 9-8 e na EN 13108-5 (1ª tentativa).....	60
Figura 4.7 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos no projeto AASHTO e na EN 13108-5 (1ª tentativa).....	60
Figura 4.8 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos pelo projeto espanhol e na EN 13108-5 (1ª tentativa).....	61
Figura 4.9 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Alemanha e na EN 13108-5 (1ª tentativa).....	61
Figura 4.10 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (1ª tentativa).....	62
Figura 4.11 – Comparação entre a curva teórica da mistura e a curva resultante da análise granulométrica (1ª tentativa).....	64
Figura 4.12 – Curvas granulométricas dos agregados (2ª tentativa).....	64
Figura 4.13 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (2ª tentativa).....	65
Figura 4.14 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (2ª tentativa).....	66
Figura 4.15 – Curvas granulométricas dos agregados (3ª tentativa).....	67
Figura 4.16 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (3ª tentativa).....	68
Figura 4.17 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (3ª tentativa).....	68
Figura 4.18 – Agregados naturais (4ª tentativa).....	70
Figura 4.19 – Curvas granulométricas dos agregados (4ª tentativa).....	70
Figura 4.20 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (4ª tentativa).....	71
Figura 4.21 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (4ª tentativa).....	71
Figura 4.22 – Aspeto do provete após a compactação.....	72
Figura 4.23 – Curvas granulométricas dos agregados (5ª tentativa).....	72
Figura 4.24 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (5ª tentativa).....	73
Figura 4.25 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (5ª tentativa).....	74

Figura 4.26 – Representação gráfica das propriedades volumétricas da mistura em função da percentagem de betume (SMA-BN)	76
Figura 4.27 – Resultados dos ensaios de compressão de Marshall (SMA_BN)	76
Figura 4.28 – Curvas de deformação axial permanente para cada provete ensaiado (SMA-BN)	78
Figura 4.29 – Distribuição da carga pelo esqueleto (Martinho et al, 2013)	79
Figura 4.30 – Película de betume em redor dos agregados (Martinho et al, 2013)	80
Figura 4.31 – Representação gráfica das propriedades volumétricas da mistura em função da percentagem de betume (SMA-BR).....	81
Figura 4.32 – Resultados dos ensaios de compressão de Marshall (SMA_BR)	81
Figura 4.34 – Comparação entre SMA-BN e SMA-BR (6% de betume).....	83
Figura 4.35 – Agregados naturais utilizados	85
Figura 4.36 – Curvas granulométricas das várias frações de agregado	85
Figura 4.37 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5.....	86
Figura 4.38 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Alemanha e na EN 13108-5	87
Figura 4.39 – Comparação entre a curva teórica da mistura e a curva resultante da análise granulométrica	87
Figura 4.40 – Curvas granulométricas dos agregados	88
Figura 4.41 – Pontos de controlo da norma EN13108-5 em comparação com a curva granulométrica da mistura.....	89
Figura 4.42 – Comparação dos limites definidos na Alemanha e na EN 13108-5 com a curva granulométrica da mistura	89
Figura 4.43 – Curvas resultantes do ensaio de deformação para cada provete ensaiado.....	90
Figura 4.44 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de deformação permanente para cada provete com betume 10/20	91
Figura 4.45 – Resultados do ensaio de deformação permanente de cada provete realizado com fibras com promotor de adesividade	93
Figura 4.46 – Curva granulométrica seguindo a regra 30-20-10.....	94
Figura 4.47 – Comparação dos limites definidos na EN 13108-5 e na Alemanha com a curva seguindo a regra 30-20-10	95
Figura 4.48 – Curvas resultantes do ensaio à deformação permanente (regra 30-20-10).....	95
Figura 4.49 – Curvas resultantes do ensaio de deformação permanente para os Provetes M1, M2, M3.....	96

Figura 4.50 – Curvas resultantes do ensaio de deformação permanente para os provetes S1, S2, S3	98
Figura 4.51 – Resultados do ensaio de deformação permanente de cada provete com o betume de refinaria.....	99
Figura 4.52 – Comparação dos valores obtidos para as diversas análises	100

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Dados relativos à redução de emissões, em percentagem (adaptado de FHWA, 2008; Powell et al., 2011).....	16
Quadro 2.2 – Percentagem ponderal de fibras na mistura SMA (Antunes, 2014)	24
Quadro 2.3 – Quantidades de agregado aproximadas para Zichner (adaptado de Blazejowski, 2011)	25
Quadro 2.4 –Proporções para as diferentes frações usadas no método alemão atual (adaptado de Blazejowski, 2011).....	26
Quadro 3.1 – Requisitos para o betume 35/50 indicados na norma NP EN 12591.....	38
Quadro 4.1 – Características físicas do agregado de granulometria 4/12 mm.....	56
Quadro 4.2 – Características físicas do agregado de granulometria 0/4 mm granítico	56
Quadro 4.3 – Características do fíler utilizado	56
Quadro 4.4 – Limites do fuso granulométrico (adaptado EN13108-5:2006).....	58
Quadro 4.5 – Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (1ª tentativa)	59
Quadro 4.6 – Baridade dos provetes selados (1ª tentativa)	63
Quadro 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de Marshall	63
Quadro 4.8 – Baridade máxima teórica e porosidade dos provetes (1ª tentativa).....	63
Quadro 4.9 – Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (2ª tentativa)	65
Quadro 4.10 – Baridade dos provetes selados (2ª tentativa)	66
Quadro 4.11 – Baridade máxima teórica e porosidade (2ª tentativa)	66
Quadro 4.12 – Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (3ª tentativa)	67
Quadro 4.13 – Baridade dos provetes selados (3ª tentativa)	69
Quadro 4.14 – Características físicas do agregado de granulometria 0/4 mm calcário.....	69
Quadro 4.15 – Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (4ª tentativa)	70
Quadro 4.16 - Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (5ª tentativa)	73
Quadro 4.17 – Baridade SSD e porosidade (5ª tentativa)	74
Quadro 4.18 – Propriedades volumétricas SMA-BN (valores médios).....	76

Quadro 4.19 – Comparação das propriedades volumétricas obtidas com os valores definidos nas especificações (SMA-BN).....	77
Quadro 4.20 – Categorias de valores de ITSR relativas ao ensaio de sensibilidade à água (EN 13108-5)	78
Quadro 4.21 – Resultados do ensaio de deformação permanente para a mistura SMA-BN....	79
Quadro 4.22 – Propriedades volumétricas SMA-BR (valores médios).....	80
Quadro 4.23 – Comparação das propriedades volumétricas obtidas com os valores definidos nas especificações (SMA-BR).....	82
Quadro 4.24 – Resultados do ensaio de deformação permanente para a mistura SMA-BR....	83
Quadro 4.25 – Características físicas dos agregados de granulometrias 2/5 mm e 4/16 mm ..	84
Quadro 4.26 – Características físicas do agregado de dimensão 0/4 mm granítico	84
Quadro 4.27 – Características físicas do filler.....	85
Quadro 4.28 – Percentagem de cada fração de agregado na mistura final.....	86
Quadro 4.29 – Percentagens dos agregados na mistura final	88
Quadro 4.30 – Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente para os provetes 1, 2 e 3	90
Quadro 4.31 – Comparação entre os valores resultantes do ensaio de deformação permanente	91
Quadro 4.32 – Resultados do ensaio à deformação permanente para os provetes com betume 10/20.....	92
Quadro 4.33 – Comparação dos valores obtidos do ensaio de resistência à deformação permanente	92
Quadro 4.34 – Resultados do ensaio de deformação permanente para os provetes com fibras <i>Viatop Plus AD 10</i>	93
Quadro 4.35 – Comparação dos resultados obtidos.....	93
Quadro 4.36 – Percentagens de cada fração de agregado na mistura (regra 30-20-10).....	94
Quadro 4.37 – Resultados deformação permanente, regra 30-20-10.....	95
Quadro 4.38 – Comparação dos valores obtidos da regra 30-20-10 com os calculados anteriormente	96
Quadro 4.39 – Resultados do ensaio de deformação permanente para os provetes M1, M2, M3	97
Quadro 4.40 – Comparação dos valores para contabilizar efeito das fibras com promotor de adesividade	97
Quadro 4.41 – Comparação dos valores obtidos	97

Quadro 4.42 – Resultados do ensaio de deformação permanente para dos provetes S1, S2, S3	98
Quadro 4.43 – Comparação dos valores obtidos	98
Quadro 4.44 – Resultados do ensaio de deformação permanente para o betume de refinaria.	99
Quadro 4.45 – Comparação dos valores obtidos para o ensaio de deformação permanente para ambos os betumes	100
Quadro 4.46 – Comparação dos valores obtidos em estudos similares	101

Índice de Figuras em Apêndice

Figura II.1 – Comparação da curva resultante da análise granulométrica do material de dimensão 4/12 com a curva teórica	125
Figura II.2 – Comparação da curva resultante da análise granulométrica do material de dimensão 0/4mm com a curva teórica.....	126
Figura II.3 – Representação gráfica das frações 0/2 e 2/4mm, graníticas.....	127
Figura II.4 – Comparação da curva resultante da análise granulométrica do material de dimensão 4/16mm com a curva teórica.....	129

Índice de Quadros em Apêndice

Quadro II.1 – Valores obtidos da análise granulométrica da mistura em estudo	124
Quadro II.2 – Resultado da análise granulométrica do material de dimensão 4/12mm	125
Quadro II.3 – Resultado da análise granulométrica do material de dimensão 0/4mm, granítico	126
Quadro II.4 – Repartição do material de dimensão 0/4mm, calcário, em duas frações.....	127
Quadro II.5 – Análise granulométrica da mistura SMA	128
Quadro II.6 – Valores da análise granulométrica ao material de dimensão 4/16mm	128
Quadro III.1 – Composição dos provetes Marshall	130
Quadro III.2 – Características volumétricas dos provetes	130
Quadro III.3 – Resultados do ensaio de compressão de Marshall.....	131
Quadro III.4 – Características dos provetes para avaliação da sensibilidade à água.....	131
Quadro III.5 – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITSR.....	132
Quadro III.6 – Características volumétricas dos provetes para avaliação da resistência à deformação permanente	133
Quadro III.7 – Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente	133
Quadro IV.1 – Composição dos provetes Marshall.....	134
Quadro IV.2 – Características volumétricas dos provetes para a mistura SMA-BR.....	134
Quadro IV.3 – Resultados do ensaio de compressão de Marshall para a mistura SMA-BR .	135
Quadro IV.4 – Características volumétricas dos provetes para avaliação da resistência à deformação permanente (SMA-BR)	135
Quadro IV.5 – Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente (SMA-BR) ..	135

Quadro V.1 – Composição dos provetes 1,2 e 3.....	136
Quadro V.2 – Características volumétricas dos provetes 1,2 e 3	136
Quadro V.3 – Resultado ensaio deformação permanente para os provetes 1,2e 3	136
Quadro V.4 – Características volumétricas dos provetes I, II e III	136
Quadro V.5 – Deformação permanente para os provetes I, II e III	137
Quadro V.6 – Características volumétricas dos provetes A, B e C	137
Quadro V.7 – Valores da resistência à deformação permanente dos provetes A, B e C	137
Quadro V.8 – Composição dos provetes N1, N2 e N3	137
Quadro V.9 – Propriedades volumétricas dos provetes N1, N2 e N3.....	138
Quadro V.10 – Resultados da deformação permanente dos provetes N1, N2 e N3	138
Quadro V.11 – Composição dos provetes M1, M2 eM3	138
Quadro V.12 – Propriedades volumétricas dos provetes M1, M2 e M3.....	138
Quadro V.13 – Resultados do ensaio de deformação permanente para os provetes M1, M2 e M3	139
Quadro V.14 – Características volumétricas dos provetes S1, S2 e S3	139
Quadro V.15 – Resultados da deformação permanente para os provetes S1, S2 e S3	139
Quadro V.16 – Propriedades volumétricas dos provetes A1, A2 e A3.....	140
Quadro V.17 – Valores da deformação permanente para os provetes A1, A2 e A3	140

Simbologia e Abreviaturas

- AASHTO** – American Association of State Highway and Transportation Officials
- AC** – Asphalt Concrete
- D** – Dimensão máxima do agregado
- d** – Dimensão mínima do agregado
- EN** – European Norm (Norma Europeia)
- EP** – Estradas de Portugal
- et al.** – et alii (e outros)
- EUA** – Estados Unidos da América
- F** - Força
- fc** – Taxa de deformação
- FHWA** – Federal Highway Administration
- FI** – Índice de achatamento dos materiais granulares
- ISO** – International Organization for Standardization
- ITSR** – Índice de resistência conservada em tração indireta (Indirect Tensile Strength Ratio)
- ITR_w** – Resistência a tração indireta dos provetes acondicionados em água;
- ITR_d** – resistência à tração indireta dos provetes a seco;
- LEA** – *Low Energy Asphalt*
- LVDT** – Linear Variable Differential Transformer
- MAM** – Mistura de alto módulo
- MB_F** – Valor de azul metileno
- MBF** – Misturas Betuminosas a Frio
- MBQ** – Mistura Betuminosa fabricada a Quente
- MBT** – Mistura Betuminosa Temperada
- MDE** – Coeficiente *micro-Deval*
- NAPA** – *National Asphalt Pavement Association*
- NCHRP** – *National Cooperative Highway Research Program*
- NP** – Norma Portuguesa
- PSV** – Polished Stone Value
- SI** – Índice de forma dos materiais granulares
- SMA** – Stone Mastic Asphalt
- SMA TWG** – Stone Mastic Asphalt Technical Work Group

VFB – Volume de vazios preenchidos por betume (*Voids Filled with Binder*)

V_m – Porosidade

VMA – Volume de vazios na Mistura de Agregados

WA – Categoria para a absorção de água dos materiais granulares

ε₃₆₀₀ – extensão axial permanente

ρ_{b,dim} – Baridade por dimensões

ρ_{b,dry} – Baridade de um provete seco

ρ_{b,ssd} – Baridade de um provete saturado com a superfície seca

ρ_{b,sea} – Baridade de um provete, ou carote, de mistura betuminosa, com superfície selada

ρ_{mc} – Baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa determinada pelo procedimento matemático

ρ_{mv} – Baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa determinada pelo procedimento volumétrico

ρ_{sm} – Massa volúmica do material de selagem à temperatura do ensaio

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura do ensaio

ρ_i – Massa volúmica de cada agregado

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Desde 1985, através da implementação do plano rodoviário nacional, que a rede rodoviária portuguesa se tem modernizado, nomeadamente através da construção de itinerários principais e complementares. Esta alteração em conjunto com o desenvolvimento da indústria e dos meios de transporte, verificado nos últimos anos, levou ao crescimento do tráfego pesado e consequentemente ao aumento das solicitações impostas nos pavimentos, levando a uma rápida degradação destes. Por este motivo, em Portugal, tem vindo a verificar-se um aumento de volume de obras de conservação e reabilitação dos pavimentos rodoviários.

Devido ao facto de estas medidas estarem condicionadas pela economia de recursos, tanto financeiros como naturais, surge a necessidade de estudo de novas técnicas que contemplem pavimentos mais duráveis, que necessitem de reduzida manutenção e que assegurem segurança e conforto aos seus utilizadores.

É neste sentido que as misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt*, aplicadas como camada de desgaste, aparecem como alternativa às misturas tradicionais. Estas misturas são caracterizadas pela sua durabilidade, resistência às deformações permanentes e ao fendilhamento por fadiga, pelo facto de apresentarem uma boa aderência no contacto pneu/pavimento e, ainda, por permitirem uma diminuição do efeito de *spray* provocado pela lâmina de água que permanece na superfície do pavimento em dias de chuva. São, por isso, indicadas para aplicação em vias com tráfego elevado e/ou pesado, em zonas de elevada inclinação, em túneis e viadutos, e em zonas de travagem e/ou torção.

Além do referido anteriormente, pode referir-se ainda a crescente necessidade de reduzir os impactes ambientais causados pelo fabrico de misturas betuminosas convencionais (MBQ), responsáveis por um grande consumo de energia e por uma parcela significativa da emissão de gases poluentes para a atmosfera, pelo que têm vindo a ser estudadas diversas alternativas às MBQ.

É neste contexto que surgem as misturas betuminosas temperadas (MBT), que visam reduzir as temperaturas de produção, colocação e compactação. Em algumas tecnologias disponíveis, estas misturas contêm aditivos que reduzem a viscosidade do betume, permitindo assim o completo envolvimento dos agregados e uma boa trabalhabilidade, a temperaturas mais baixas.

Atualmente já existe no mercado um betume aditivado em refinaria para o fabrico de misturas temperadas, o que contribui para o uso mais sustentável dos materiais na tecnologia rodoviária e facilita o processo produtivo, uma vez que não existe necessidade de incorporar aditivos em central.

Esta dissertação tem como finalidade contribuir para o estudo da caracterização de uma mistura betuminosa que reúne os aspetos acima referidos, podendo constituir deste modo, uma solução mais sustentável que as tradicionais e de elevada durabilidade.

1.2 Objetivos e metodologias

O principal objetivo desta dissertação é estudar as características volumétricas e mecânicas de duas misturas temperadas, do tipo SMA, uma produzida com betume aditivado em refinaria e outra com recurso a aditivos adicionados no processo de fabrico, fazendo a comparação entre ambas. Neste sentido, pretende-se avaliar o desempenho destas misturas averiguando, com base em ensaios laboratoriais, se estas técnicas podem ser utilizadas com vantagem.

Procura-se também contribuir para o desenvolvimento do conhecimento de misturas betuminosas sustentáveis, através da utilização de processos de fabrico com menor consumo de energia.

A metodologia de trabalho consistiu, numa fase inicial, na recolha de informação de modo a apresentar uma visão global sintetizada dos conceitos mais importantes no que diz respeito às misturas betuminosas temperadas e às misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt*.

Depois, realizaram-se trabalhos experimentais com o objetivo de estudar as misturas para diferentes percentagens de betume. Após a determinação da percentagem ótima de betume foram fabricadas misturas com as composições finais a que se chegou no processo de formulação, tendo sido avaliadas as suas características mecânicas, nomeadamente a sensibilidade à água e a resistência à deformação permanente. O estabelecimento das composições finais envolveu algumas dificuldades, as quais foram ultrapassadas através de um processo de tentativa e erro.

De modo a possibilitar uma avaliação mais clara do comportamento das misturas betuminosas estudadas foram comparados os resultados laboratoriais obtidos com os valores definidos em especificações e em estudos similares.

1.3 Estrutura de trabalho

O presente trabalho divide-se em cinco capítulos, contando ainda com cinco apêndices, cujo conteúdo se descreve neste capítulo.

Neste primeiro capítulo é realizado o enquadramento do trabalho, sendo referidos os aspetos que levaram à abordagem do tema. São ainda definidos os objetivos, a metodologia utilizada para os atingir e uma breve descrição da organização do documento.

No capítulo 2 é realizada uma breve descrição das misturas betuminosas temperadas, referenciando as tecnologias existentes para redução da temperatura de fabrico e as vantagens e desvantagens da sua aplicação. Também é realizada uma revisão sumária da literatura sobre

misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*, referindo aspetos relacionados com o seu princípio de funcionamento e composição, com a caracterização dos seus constituintes e com o seu fabrico. Referem-se ainda as vantagens e desvantagens do uso destas misturas e ainda casos de aplicação de SMA em Portugal.

No capítulo 3 são apresentados os ensaios laboratoriais realizados sobre os materiais e sobre as misturas betuminosas em estudo. Ao longo deste capítulo são também apresentados os procedimentos adotados e as particularidades de cada ensaio, bem como o seu enquadramento normativo.

No capítulo 4 apresentam-se as propriedades de cada um dos materiais constituintes da mistura, o processo de formulação da mistura de agregados, os valores resultantes dos ensaios apresentados no capítulo 3, assim como a sua análise e discussão. É ainda apresentado o estudo com base na deformação permanente para testar as hipóteses de resolução aos diversos obstáculos encontrados.

No capítulo 5 faz-se uma síntese do trabalho desenvolvido, resumindo as principais conclusões retiradas e referem-se sugestões de trabalhos futuros que possam complementar o estudo desenvolvido.

Além dos cinco capítulos acima apresentados, como já referido anteriormente, o presente documento inclui ainda cinco apêndices que apresentam informação complementar à incluída nos capítulos e que se descrevem a seguir:

- No Apêndice I são apresentadas as fichas técnicas dos agregados e das fibras usadas para fabricar as misturas em estudo;
- No Apêndice II encontram-se os resultados das diversas análises granulométricas que foi necessário realizar;
- No Apêndice III resumem-se as propriedades volumétricas e as características mecânicas para a mistura SMA-BN;
- No Apêndice IV resumem-se as propriedades volumétricas e as características mecânicas para a mistura SMA-BR;
- No Apêndice V apresentam-se os resultados do estudo efetuado com base na avaliação da deformação permanente.

2. Revisão da literatura

Uma das principais preocupações mundiais da atualidade é a necessidade de implementar medidas que conduzam ao desenvolvimento sustentável do nosso planeta. Entende-se por sustentabilidade a manutenção do equilíbrio ao longo do tempo, ou seja, é a capacidade de se conseguir satisfazer as necessidades humanas atuais sem que seja afetada a possibilidade de as gerações futuras fazerem o mesmo.

Nos últimos anos têm-se estudado várias alternativas às misturas betuminosas tradicionais, tanto ao nível de materiais constituintes como no que se refere à temperatura de fabrico e compactação e, ainda, no que diz respeito à sua durabilidade e resistência.

Neste capítulo serão apresentadas, de forma sucinta, duas das tecnologias alternativas às misturas betuminosas tradicionais que têm vindo a ser mais utilizadas nos últimos anos, nomeadamente as misturas betuminosas temperadas e as misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*.

2.1 Misturas betuminosas temperadas (MBT)

2.1.1 Generalidades

As misturas betuminosas tradicionais produzidas a quente são responsáveis por uma percentagem significativa do consumo de energia e da emissão de gases poluentes para a atmosfera. A crescente preocupação com o aquecimento global tem sido incentivo para a procura de soluções mais sustentáveis a nível mundial. A indústria da construção, e em particular o setor rodoviário, não é exceção, pelo que tem desenvolvido alternativas menos agressivas para o meio ambiente, indo ao encontro do estipulado no Protocolo de Quioto e no Acordo de Paris, nos quais os países assumiram o compromisso de reduzir a emissão de gases com efeito de estufa.

Uma das medidas que tem sido estudada consiste na redução da temperatura de produção e aplicação em obra de misturas betuminosas, dando origem às misturas betuminosas temperadas (MBT).

Na última década tem-se ouvido falar das MBT com mais frequência, mas já desde os anos 50 que a comunidade científica do setor rodoviário se interessa por esta tecnologia. Na Figura 2.1 encontra-se um resumo histórico da sua evolução (Martinho, 2014; Antunes, 2014).

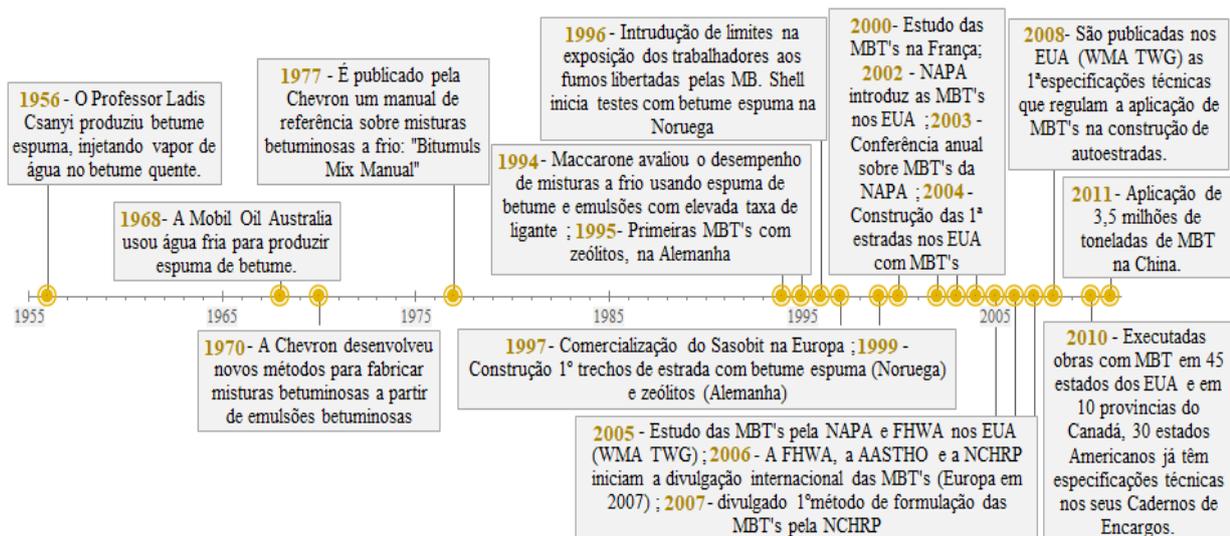


Figura 2.1 – Resumo histórico das misturas betuminosas temperadas

As MBT permitem uma redução da temperatura de produção entre 30 e 50°C. Uma diminuição da temperatura de 10°C permite uma redução de cerca de um litro no consumo de combustível e de um quilograma de CO₂, por tonelada (Lopes, 2015). O uso desta tecnologia é também benéfico para os trabalhadores envolvidos na produção e/ou compactação, pois com a diminuição da temperatura diminui também a quantidade de fumos produzidos, melhorando as condições de trabalho (Figura 2.2).

Vários estudos mostram reduções de 60 a 70% de óxidos de azoto, 50% de compostos orgânicos, 30 a 40% de CO₂ e de SO₂, 20 a 25% de poeiras e 10 a 30% de monóxido de carbono, verificando-se que quanto maior a redução da temperatura, menor será a emissão de gases (D'Angelo et al., 2008).



Figura 2.2 – Diferença nas emissões de fumos entre as MBQ (esquerda) e as MBT (direita) observados na central durante a descarga das misturas betuminosas para o camião (Silva et al., 2009)

Esta tecnologia permite ainda maiores distâncias de transporte e maiores períodos de execução do pavimento, assim como a sua aplicação em zonas com temperaturas mais baixas.

O processo de fabrico não difere muito do processo das MBQ. A redução da temperatura é conseguida através da junção de aditivos orgânicos ou químicos, ou da utilização de um processo de fabrico que origine a formação de espuma de betume. É de salientar que apesar da redução da temperatura são garantidas boas condições de trabalhabilidade.

2.1.2 Principais características e tecnologias de produção

As misturas betuminosas tradicionais a quente são produzidas a temperaturas entre 150 e 180°C, dependendo do tipo de betume utilizado. Para este intervalo de temperatura está garantida a secagem e o aquecimento dos agregados, o adequado envolvimento destes pelo ligante e uma boa trabalhabilidade.

Existem várias formas de classificar as misturas betuminosas, sendo uma delas a classificação segundo a temperatura de produção. Na Figura 2.3 encontra-se ilustrada a classificação das misturas betuminosas em função da temperatura de produção.

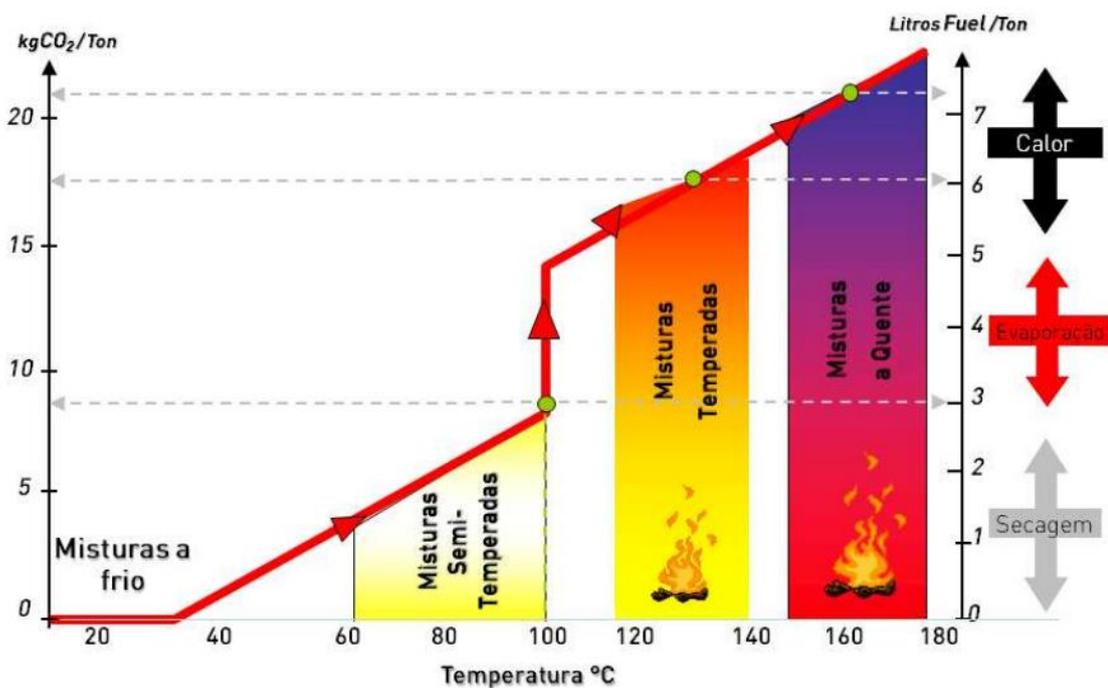


Figura 2.3 – Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção (adaptado de FHWA,2008)

Pela observação da Figura 2.3 é possível verificar que existem 4 tipos de misturas betuminosas, sendo elas, as misturas betuminosas a frio, misturas semitemperadas, misturas temperadas e

misturas a quente. Verifica-se também que quanto maior a temperatura de fabrico maior a produção de gases e a energia consumida.

As misturas betuminosas a frio são produzidas com emulsões betuminosas ou betume espuma e sem aquecimento dos agregados, enquanto que para as misturas betuminosas semitemperadas os agregados são aquecidos a temperaturas entre 70 e 100°C, abaixo da temperatura de evaporação da água (100°C) (Ferreira,2009).

As misturas betuminosas temperadas são compostas, essencialmente, por betume e agregados, e são produzidas a temperaturas compreendidas entre 100 e 140°C, conseguindo-se uma redução de 30°C em relação às misturas betuminosas a quente. O processo de produção destas misturas é semelhante ao das misturas betuminosas a quente.

Existem várias tecnologias que permitem a produção de misturas betuminosas temperadas, modificando de forma temporária ou permanente algumas propriedades do betume, como por exemplo a viscosidade.

As técnicas de produção de MBT que utilizam aditivos são, de um modo geral, mais simples de aplicar, porque permitem utilizar as centrais de fabrico sem necessidade de alterações, o que constitui uma vantagem significativa (Martinho et al., 2013).

A maioria dos aditivos usados na produção de MBT são sólidos, e introduzidos na mistura à temperatura ambiente, sendo fornecidos sob a forma de pastilhas ou granulado. Existem também aditivos no estado líquido, mas estes apresentam um período de validade para aplicação mais curto. No processo de fabrico os aditivos são, de forma geral, previamente misturados no betume aquecido antes da mistura com os agregados, mas também podem ser adicionados na mistura logo após a adição do betume. Existe também a possibilidade de obter um betume já aditivado, devendo ser prestada atenção à possível sedimentação (Martinho, 2014).

- **Aditivos orgânicos**

Os aditivos orgânicos são introduzidos na mistura com a finalidade de reduzir a viscosidade do betume. Estes aditivos são constituídos por ceras, que ao serem submetidas a temperaturas acima do seu ponto de fusão (90°C) alteram as propriedades do ligante. A redução da viscosidade mantém-se constante durante todo o processo de mistura e compactação, devido à temperatura do betume. Após o arrefecimento do betume os aditivos cristalizam formando uma estrutura em rede de partículas microscópicas, aumentando a rigidez do ligante e consequentemente a resistência à deformação permanente (Martinho, 2014).

A escolha do tipo de aditivo a utilizar deve ser realizada de forma a que a temperatura de amolecimento destes produtos seja superior à temperatura de serviço esperada, reduzindo assim o risco de ocorrência de deformações permanentes (Ferreira, 2009). Os aditivos orgânicos possibilitam uma redução da temperatura de fabrico e compactação em cerca de 20 a 30°C (D'Angelo et al., 2008).

Existem diversos aditivos orgânicos, de entre os quais se destaca o produto com o nome comercial de *Sasobit*[®]. Trata-se de uma cera produzida através de carvão ou gás natural pelo processo *Fisher-tropsch* e normalmente adicionado nas percentagens de 0,8 a 4% da massa de betume (Carvalho, 2016), (Figura 2.4).

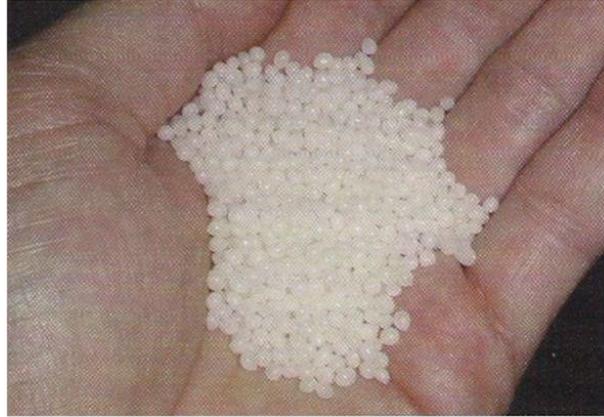


Figura 2.4 – Aditivo Sasobit (Prowell et al, 2011)

- **Aditivos Químicos**

Nos aditivos químicos o principal objetivo não está relacionado com a diminuição da viscosidade do betume, mas sim com a redução da tensão superficial do betume, permitindo uma melhor adesividade e envolvimento dos agregados pelo betume, mesmo a baixas temperaturas. Para além disso, este tipo de aditivo pode agir como “lubrificante”, melhorando a trabalhabilidade da mistura (Antunes, 2014).

Estes materiais são formados por um conjunto de produtos, tais como os tensoativos (surfactantes), agentes de emulsificação, promotores de adesividade e de revestimento dos agregados. Os tensoativos permitem a redução do ângulo de contacto dos glóbulos de betume com o agregado, conseguindo, assim, um melhor revestimento dos agregados pelo betume (Martinho, 2014), (Figura 2.5).

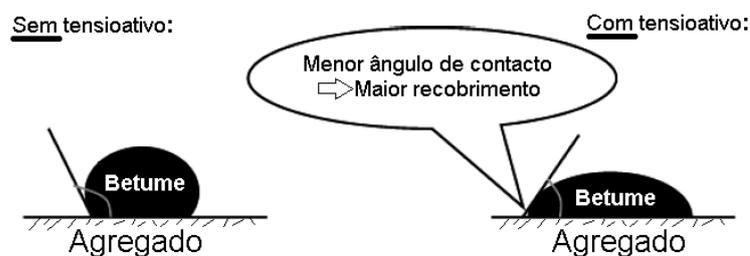


Figura 2.5 – Melhoria do ângulo de contacto devido à incorporação de aditivo químico (Martinho, 2014)

Os aditivos químicos são normalmente adicionados ao betume durante o processo de fabrico, embora existam técnicas que possibilitam a sua adição através de emulsões betuminosas (Martinho, 2014).

A taxa de aplicação recomendada para este tipo de aditivo é de 1,5 a 2,5% da massa de betume, não alterando significativamente as propriedades de consistência da mistura à qual é adicionado (Hurley e Prowell, 2008). Estes aditivos possibilitam uma redução de temperatura de fabrico e compactação em cerca de 30°C (Martinho, 2014).

De entre os diversos aditivos químicos que existem os mais conhecidos são os das marcas comerciais *RedisetTM WMX* e *Cecabase[®] RT*, que são aditivos que promovem a adesividade e o recobrimento dos agregados (Figura 2.6). Existem ainda produtos desta gama que podem ser aplicados como emulsão, como é o caso do *Evotherm[®]*, conseguindo reduções de temperatura de cerca de 65°C (Carvalho, 2016).



Figura 2.6 – Aspeto dos aditivos *RedisetTM WMX* (esquerda) e *Cecabase[®] RT* (direita) (Pereira, 2010)

Quando se utilizam os aditivos químicos nas centrais de produção de misturas betuminosas, a introdução do material pode ser feita diretamente no tanque do betume ou na mistura imediatamente após adição do betume. No entanto, quando se opta pelo segundo processo é necessário modificar o sistema de introdução do ligante para que seja possível introduzir o betume e o aditivo ao mesmo tempo (Figura 2.7).

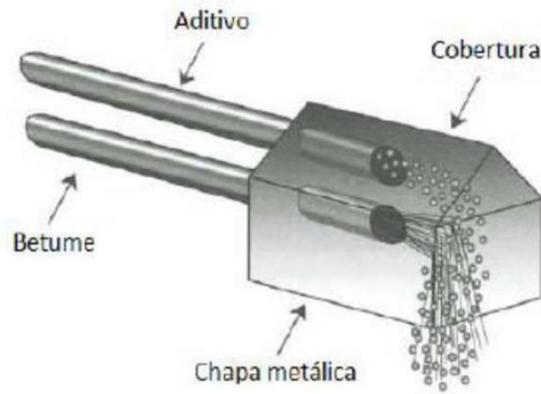


Figura 2.7 – Equipamento para junção simultânea do aditivo e do betume (Hurley e Prowell, 2008)

- **Espuma de betume**

Atualmente existem vários métodos para a produção de espuma de betume, tendo muito deles sido desenvolvidos pelas marcas que os comercializam. A espuma de betume é geralmente obtida pela adição de uma pequena quantidade de água pulverizada (injeção de água), a frio, no betume pré-aquecido, ou através da utilização de zeólitos naturais ou sintéticos com um elevado teor em água.

Quando se junta água ao betume aquecido, a água evapora e o vapor libertado é encapsulado no interior do betume, resultando num aumento do seu volume inicial, provocando uma redução da viscosidade, o que permite misturar o ligante com os agregados à temperatura ambiente ou previamente aquecidos a uma temperatura moderada. À medida que a mistura arrefece o betume vai diminuindo o seu volume, e regressa às suas características originais. Este fenómeno proporciona uma melhor distribuição do ligante na mistura betuminosa. A necessidade de utilizar água neste processo, pode conduzir a problemas de descolamento (Martinho, 2014).

Espuma de betume por injeção direta de água

Uma das técnicas de produção de espuma de betume consiste na injeção de pequenas quantidades de água (cerca de 2% da massa de betume), que em contacto com o betume aquecido, evapora e forma uma “espuma” (Figura 2.8). No estado espumoso existe uma redução da viscosidade do betume, o que permite o recobrimento dos agregados a temperaturas mais baixas (Croteau e Tessier, 2008)

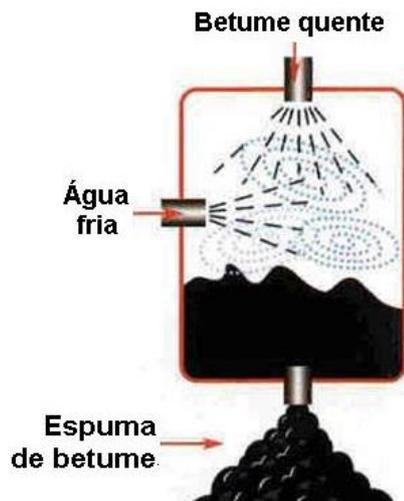


Figura 2.8 – Ilustração esquemática de produção de betume espuma por injeção de água (Martinho, 2014)

Existem diversos processos e equipamentos que permitem a redução da temperatura de produção das misturas betuminosas através da utilização de espuma de betume, dos quais se destacam os seguintes:

- *WMA-Foam*[®] - consiste na adição em duas fases de dois tipos de ligante; a primeira fase consiste na introdução de um betume de baixa viscosidade; na segunda fase é injetada espuma de betume fabricada com betume duro, como ilustrado na Figura 2.9;

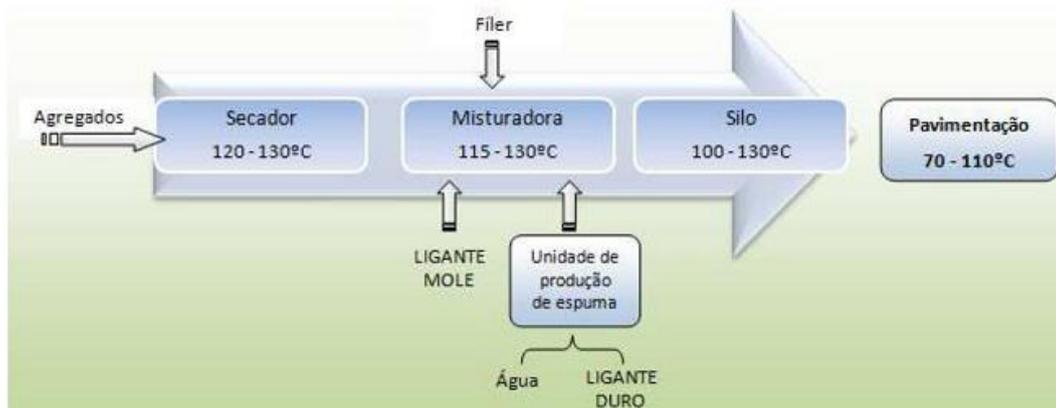


Figura 2.9 – Processo *WMA-Foam*[®] (Ferreira, 2009)

- *Low Emission Asphalt (LEA)* - é um processo contínuo de mistura dividido em várias etapas. Na primeira etapa, os agregados são aquecidos e misturados com o betume. Na segunda etapa, é adicionada a parte restante dos agregados húmidos, formando, assim, a espuma de betume. Na terceira etapa, adicionam-se aditivos de promoção de adesividade e de redução de viscosidade, possibilitando temperaturas de fabrico de 95°C. Este processo tem algumas variantes, podendo identificar-se três métodos, como é possível observar na Figura 2.10.

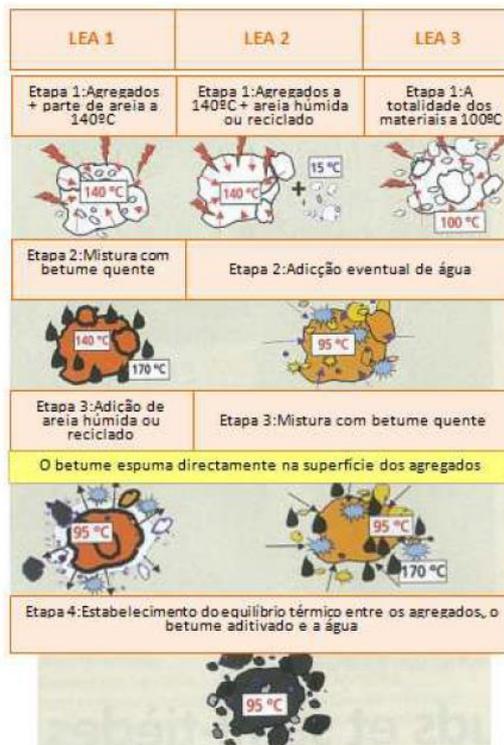


Figura 2.10 – Processo LEA (adaptado de FHWA, 2008)

Espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais

Os minerais vulgarmente utilizados nesta tecnologia são da família dos zeólitos (silicato de alumínio hidratado cristalino), que devido ao facto de possuírem uma estrutura porosa e aberta podem conter uma grande variedade de iões positivos, como sódio, cálcio ou moléculas de água. No que diz respeito às misturas temperadas, a característica fundamental destes minerais está relacionada com a sua capacidade de absorção de água e a forma como a libertam (Antunes, 2014).

Os zeólitos podem ser naturais ou sintéticos e têm uma granulometria muito fina, podendo conter cerca de 20% de água retida na sua estrutura. Hoje em dia, a maior parte dos zeólitos comercializados são sintéticos, destacando-se o *Aspha-min*[®] e o *Advera*[®] (Figura 2.11), (Martinho, 2014).

Estes minerais são inseridos no processo de fabrico durante a fase de mistura do betume com o agregado. Quando a temperatura ultrapassa os 100°C as moléculas de água presentes nos minerais são expulsas sob a forma de vapor de água, que em contacto com o ligante produz espuma de betume, o que faz com que ocorra a expansão do volume do betume, reduzindo, assim, a sua viscosidade e aumentando a trabalhabilidade da mistura a temperaturas mais baixas (Antunes, 2014). Por norma, o aumento de volume resultante do uso desta técnica não é tão grande como o conseguido com a técnica de produção de espuma de betume com injeção de água, pelo que pode ser necessário a utilização de aditivos estabilizadores (Prowell et al, 2011).



Figura 2.11 – Zeólitos *Aspha-min*[®] (esquerda) e *Advera*[®] (direita) (Antunes, 2014)

- **Outros aditivos**

Além dos aditivos e técnicas referidas anteriormente, existem também no mercado outros aditivos que resultam da combinação de vários produtos com diferentes propriedades e objetivos. A sua utilização permite obter melhorias em diferentes propriedades das misturas e, ao mesmo tempo, possibilita o escoamento de subprodutos provenientes de várias atividades industriais (Martinho, 2014).

Nos trabalhos laboratoriais realizados utilizou-se um aditivo designado por *Viatop CT 40*[®] que contém 60% de fibras celulósicas recobertas por betume e 40% de ceras *Fisher-tropsch* (*Sasobit*[®]). Este aditivo é comercializado sob a forma de granulado (Figura 2.12). A sua utilização é útil quando, além da diminuição da viscosidade e da temperatura de fabrico e compactação, se pretende também prevenir o escorrimento de betume, nomeadamente, em misturas com maiores percentagens de ligante e/ou mais descontínuas, como é o caso das misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), em estudo nesta dissertação.



Figura 2.12 – *Viatop CT 40*[®] (Antunes, 2014)

2.1.3 Vantagens e desvantagens

A utilização de misturas betuminosas temperadas apresenta uma série de vantagens, o que tem proporcionado a sua aplicação em diversos países. Como já referido, anteriormente, as MBT são produzidas e aplicadas a temperaturas inferiores às misturas tradicionalmente produzidas a quente, estando este fator na base da maioria das suas vantagens.

As vantagens da utilização deste tipo de misturas podem ser divididas em quatro grupos distintos, nomeadamente, vantagens técnicas, económicas, ambientais e sociais.

- Vantagens técnicas

De entre os aspetos técnicos com balanço positivo, pode destacar-se o facto das MBT apresentarem maior flexibilidade na aplicação e transporte, pois devido ao facto de manterem a sua trabalhabilidade durante mais tempo, podem ser aplicadas em ambientes mais frios, ou durante o período noturno, possibilitam maiores distâncias de transporte e duração de viagem e permitem realizar pavimentações mais demoradas (Martinho, 2014; Capitão et al., 2012).

As baixas temperaturas de fabrico permitem também a redução do endurecimento do ligante, permitindo compactações mais fáceis, resultando na redução da porosidade. As técnicas para produção de MBT permitem uma redução do envelhecimento do betume e reduzem a suscetibilidade ao fendilhamento térmico e estrutural (Bispo, 2013).

Esta tecnologia é também benéfica na utilização de betumes mais duros, em tempos frios, ou sempre que se pretenda incorporar material betuminoso recuperado, ou ainda em Misturas de Alto Módulo (MAM), pois o material terá melhor trabalhabilidade, devido à redução da viscosidade do ligante, e a redução da temperatura com o tempo é menos importante (Martinho, 2014).

Em comparação com as misturas betuminosas a frio (MBF), as MBT têm a vantagem de não necessitarem de tempo de cura após aplicação, nem exigem uma camada de selagem superficial e apresentam ainda melhorias nas operações de espalhamento, compactação e no envolvimento dos agregados pelo ligante (Button et al., 2007).

As MBT também podem ser aplicadas em misturas descontínuas do tipo SMA, sendo a sua resistência à deformação permanente melhorada (Martinho, 2014).

- Vantagens económicas

A diminuição da temperatura de fabrico conduz à redução do consumo de combustível em 35%, ou mais, dependendo do processo utilizado, o que se traduz numa diminuição de custos, na mesma proporção, constituindo um fator de grande importância na atualidade, devido aos custos de energia (Martinho, 2014; Capitão et al., 2012).

A incorporação de material betuminoso recuperado em MBT permite também uma redução no consumo de novos agregados e ligantes e, ainda, no volume e transporte de “resíduos” para vazadouro (Antunes, 2014).

Outra vantagem está relacionada com o facto de a maioria das técnicas usadas para reduzir a temperatura não necessitarem de alterações nas centrais de produção e a redução da degradação destas (Bispo, 2013).

- Vantagens ambientais

Como já referido anteriormente, a diminuição da temperatura conduz a um menor gasto de energia/combustível, assim como a uma redução da emissão de gases poluentes e poeiras. No Quadro 2.1 encontram-se representadas as reduções observadas em vários países quando se utilizam MBT em vez de misturas fabricadas a quente.

Quadro 2.1 – Dados relativos à redução de emissões, em percentagem (adaptado de FHWA, 2008; Powell et al., 2011)

Emissões	Noruega	Itália	Holanda	França	Canadá
CO ₂	31,5	30-40	15-30	23,0	45,8
SO ₂	ND	35,0	ND	18,0	41,2
COV _s	ND	50,0	ND	19,0	ND
CO	28,5	10-30	ND	ND	63,1
NO _x	61,5- 62,5	60-70	ND	18*	58,0
Pó	54,0	25-55	ND	ND	ND

*como NO₂

ND - Não determinado

Como já referido anteriormente as MBT permitem a incorporação de material betuminoso recuperado, o que permite a redução do consumo de novos agregados e ligantes, o que além de benefício económico também constitui um benefício ambiental, pois reduz os impactes causados pela extração destes materiais e a criação de vazadouros para depósito.

- Vantagens sociais

A redução da temperatura de fabrico das MBT permite melhores condições de trabalho para os trabalhadores, pois irão ter uma menor exposição a fumos, gases e temperaturas altas, o que poderá traduzir-se numa melhor produtividade.

Pela mesma razão, salienta-se a melhoria da qualidade ambiental para as populações residentes, quer nas proximidades da obra, quer nas zonas das centrais de produção.

É ainda possível salientar a redução do incomodo causado aos utentes, pois esta tecnologia permite que se atinjam mais depressa as condições de abertura ao tráfego (Capitão et al., 2012).

A utilização de misturas betuminosas temperadas, em todo o mundo, é significativa. No entanto, ainda existe uma série de adversidades a superar (Martinho, 2014). Um dos inconvenientes que as MBT apresentam é o facto do investimento inicial ser mais elevado. A compra de aditivos, assim como a necessidade de adaptar a central de produção para algumas técnicas, tem grande influência no custo inicial desta tecnologia. Por este motivo é necessário a realização de uma análise ponderada, de modo a garantir que as poupanças superam os custos adicionais (Martinho, 2014).

A produção de aditivos, necessários para o fabrico das MBT, geram emissões de carbono, pelo que deve ser feito o balanço entre estas emissões e as vantagens ambientais que as MBT apresentam (Martinho, 2014).

Além disso, deve prestar-se especial atenção na garantia da homogeneidade e dispersão dos aditivos na mistura, visto serem adicionados em baixas dosagens.

Algumas técnicas de produção de MBT recorrem ao uso de água. Caso esta água não evapore durante a fase de mistura e pavimentação, podem ocorrer problemas de fissuração e assentamentos causados pela presença de água residual (Bispo, 2013). Outra causa que está na origem da existência de água residual é o facto de não existir uma secagem completa dos agregados devido às temperaturas de aquecimento dos constituintes relativamente baixas.

A boa trabalhabilidade destas misturas pode conduzir a porosidades baixas, em comparação com as misturas a quente, o que em conjunto com um menor endurecimento do betume, devido à sua menor oxidação durante o processo de produção, pode aumentar o risco de ocorrência de deformação permanente (Martinho, 2014).

2.2 Misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* – SMA

Os pavimentos rodoviários devem satisfazer, ao longo da sua vida útil, determinados níveis mínimos de qualidade funcional e estrutural. No entanto, a ação do tráfego e das condições climáticas a que estão continuamente sujeitos, provocam a sua degradação e, por consequência, o incumprimento dos níveis de qualidade pretendidos. As camadas de desgaste dos pavimentos são as mais solicitadas por estas ações, uma vez que as cargas dos veículos são aplicadas diretamente na superfície do pavimento, estando esta constantemente sujeita às diversas ações climáticas.

Entre as atuações do tráfego que mais afetam os pavimentos encontram-se as cargas verticais dos veículos pesados, as ações de torção e as forças de atrito originadas pela contacto pneu-pavimento. Além destas, existem outras ações que afetam os pavimentos, tais como as resultantes dos elementos e gases que compõem a atmosfera (a água, o oxigénio, o gelo, a radiação ultravioleta, etc.), principalmente no caso dos pavimentos semi-rígidos ou flexíveis uma vez que a camada de desgaste é constituída por material betuminoso (Martinho et al., 2013).

Atendendo a todas estas solicitações, é de esperar que os pavimentos apresentem determinadas características funcionais, tais como, regularidade superficial, resistência à derrapagem, capacidade de drenagem superficial, determinadas condições de permeabilidade, baixa emissão de ruído, visibilidade das marcas rodoviárias. São, também, esperadas algumas características estruturais como a resistência ao fendilhamento, à deformação permanente e ao envelhecimento (Antunes, 2014).

A construção e reforço de pavimentos rodoviários em Portugal (assim como em muitos outros países), têm sido efetuados com recurso a pavimentos flexíveis (Figura 2.13), constituídos em grande parte por uma camada de desgaste em material betuminoso com camadas subjacentes em material granular e/ou betuminoso, o que tem conduzido a um crescente consumo de betume asfáltico.

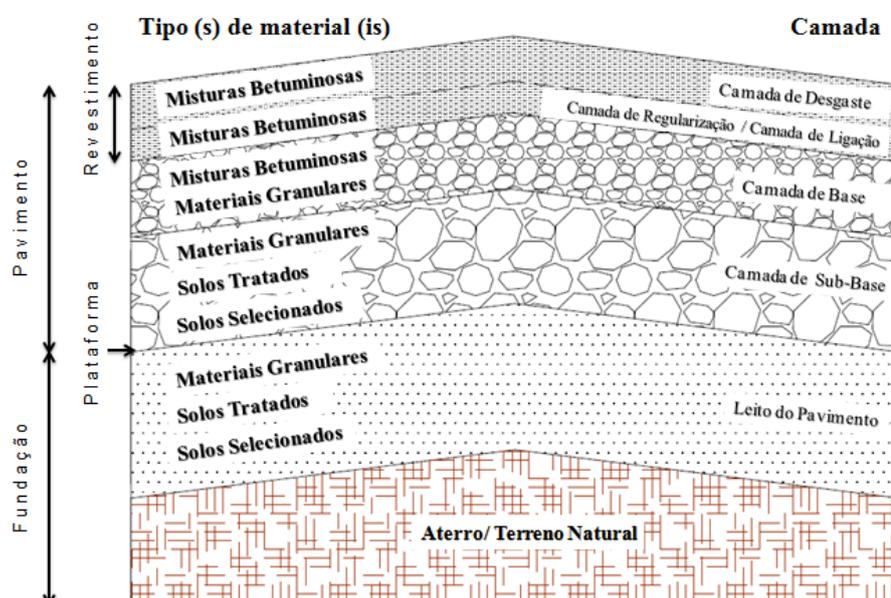


Figura 2.13 – Pavimento flexível (Antunes, 2014)

A necessidade de reduzir o consumo de matérias-primas, que são cada vez mais escassas, em junção com os níveis de qualidade estrutural e funcional exigidos para os pavimentos, tem coagido a comunidade científica a desenvolver soluções com desempenhos superiores aos convencionais, das quais se destacam as misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA).

2.2.1 Evolução

As misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), foram desenvolvidas na Alemanha em 1960, sob o nome de “Splittmastixasphalt”, pelo Dr. Zichner, engenheiro e encarregado do laboratório central de construção rodoviária da Strabag Bau AG. Estas misturas surgem como tentativa de

resposta à resolução dos problemas relacionados com a agressividade do tráfego, provocada pela intensa utilização de pneus de inverno. Estes pneus apresentavam pitons de aço e eram frequentemente utilizados na Europa do Norte por forma a possibilitar o trânsito durante os períodos de neve e gelo.

Naquela época, a tendência era a utilização de misturas betuminosas com baixo teor de agregados grossos e uma grande quantidade de agregados finos. Estas misturas eram demasiado fracas para suportar as condições ambientais e o carregamento dos pneus de inverno, pelo que apresentavam elevado desgaste, reduzida durabilidade e elevada necessidade de reabilitação, o que acarretava custos. Foi, então, que surgiu uma mistura onde a macrotextura grossa possibilita, além da redução do risco de derrapagem no inverno, a diminuição da deformação permanente, conseguida através do atrito interno e um aumento da durabilidade, conseguido pelo aumento do teor de ligante.

Em 1968, as misturas criadas pelo Dr. Zichner foram nomeadas *MASTIMAC*, para camadas entre 2 e 3 cm de espessura, e *MASTIPHALT*, para camadas com espessuras superiores a 3cm (Blazejowski, 2011).

Segundo Blazejowski (2011), Zichner patenteou este tipo de misturas, tendo definido as percentagens, aproximadas, da composição da mistura, de 70% de agregados grossos, 12% de fíler, 10% de areia e 8% de betume. Também é indicado que podem ser necessários aditivos estabilizadores, para evitar o escorrimento do ligante.

Em 1975, por questões ambientais e de integridade dos pavimentos, os pneus com pitons foram proibidos, o que levou a uma diminuição da aplicação das misturas SMA. No entanto este tipo de misturas continuou a ser utilizado, uma vez que se verificou que o conceito de SMA, além de constituir uma solução para os danos causados pela ação dos pneus de inverno, era também indicado para utilização em pavimentos com elevado tráfego pesado.

Em 1980, as misturas do tipo SMA começaram a ser utilizadas novamente com maior frequência, devido ao aparecimento dos pneus de alta pressão e ao aumento da procura de pavimentos com elevada resistência à deformação permanente (Carvalho, 2016).

Como consequência do bom desempenho apresentado, em 1984, é publicada, na Alemanha, a primeira norma destas misturas. Estas misturas tornam-se mais populares e começam a ser utilizadas em outros países da Europa.

O interesse por estas misturas chega aos EUA em 1990, ano em que a AASHTO realizou o “European Study Tour”, com a finalidade de compreender e aproveitar todos os conhecimentos sobre SMA. Nessa altura existiam duas normas em vigor, a Alemã e a Sueca, que influenciaram as primeiras especificações americanas (Prowell et al, 2009).

Em 1991, foram executados trechos experimentais, em diversos estados americanos, para identificar possíveis problemas ou defeitos destas misturas e contribuir para a realização de uma norma para fabricação de SMA.

No ano de 1994, a FHWA e a SMA Technical Working Group (SMA TWG) apresentam a primeira especificação técnica para SMA, indicando a granulometria a usar, os valores de referência para o escorrimento de betume e os demais parâmetros assentes na formulação

Marshall. A partir deste ano é, então, desenvolvida a primeira norma americana, a NCRHRP 9-8 “*Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures*” (Prowell et al, 2009).

A sua aplicação estende-se a outros países, como por exemplo, a Austrália, a Nova Zelândia, países asiáticos (China, Japão e Coreia do Sul) e países de climas quentes ou tropicais (como a Argentina, Brasil e México).

Em 2005, as misturas do tipo SMA foram incluídas no grupo de normas europeias EN 13108 (que regulamentam as misturas betuminosas), sendo a EN 13108-5 utilizada especificamente para SMA. Atualmente, na Europa, esta norma é a que se encontra em vigor para este tipo de misturas.

As misturas SMA são das mais utilizadas na Europa, como camada de desgaste, tendo este conceito sido já estendido a misturas betuminosas para aplicação em camadas de regularização e de base.

2.2.2 Princípio de funcionamento

Segundo a norma EN 131805-5, a mistura betuminosa do tipo SMA é definida como “mistura betuminosa descontínua com ligante betuminoso, composta por um esqueleto de agregado britado grosso (“stone”) aglutinado por um mástique”.

A mistura SMA pode ser dividida em três partes, esqueleto de agregado, mástique e vazios da mistura (Figura 2.14).

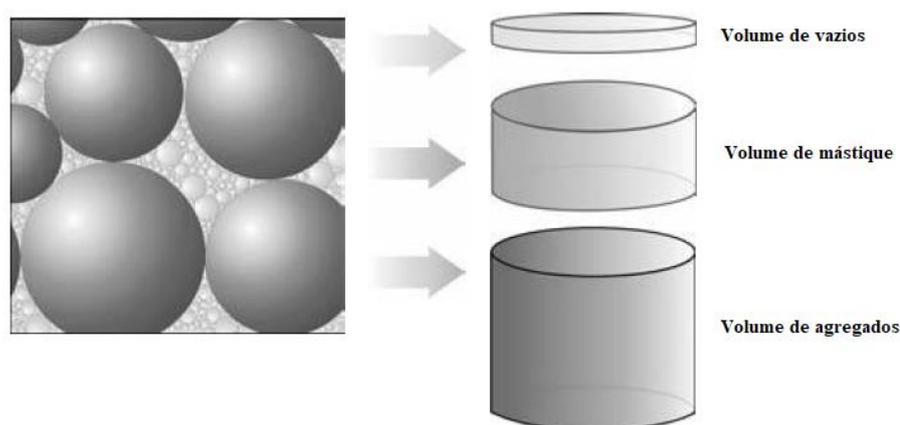


Figura 2.14 – Divisão da mistura SMA (adaptado de Blazejowski, 2011)

Como é possível observar na imagem anterior, a mistura SMA é caracterizada por apresentar uma elevada percentagem de agregado graúdo, pelo menos 70%, que constitui o esqueleto mineral. Os vazios presentes nesse esqueleto são preenchidos por um mástique betuminoso, que é formado por ligante betuminoso, agregados finos, fíler e aditivos. Estas misturas são ainda caracterizadas pelo facto de conterem uma percentagem de betume relativamente elevada, 5 a

8%, razão pela qual, em geral, é necessário recorrer ao uso de aditivos, tais como fibras, com o objetivo de reduzir o fenómeno de escorrimento do betume (Martinho et al, 2013).

As misturas SMA são utilizadas, geralmente, em camadas de desgaste com espessura que varia entre 1,5 e 4,0 cm. Não são aconselháveis espessuras superiores a 4,0 cm, uma vez que devido à possibilidade de ocorrência de escorrimento do ligante, existe um aumento da probabilidade de formação de rodeiras (Fonseca, 2011).

Um dos motivos pelos quais as misturas SMA são resistentes ao desgaste e à deformação, prende-se com o facto de estas misturas apresentarem uma granulometria descontínua, a qual é caracterizada por possuir uma grande percentagem de agregado grosso que possibilita a formação de uma estrutura compacta e imbricada que irá contribuir para a dissipação do carregamento (Figura 2.15 e 2.16).

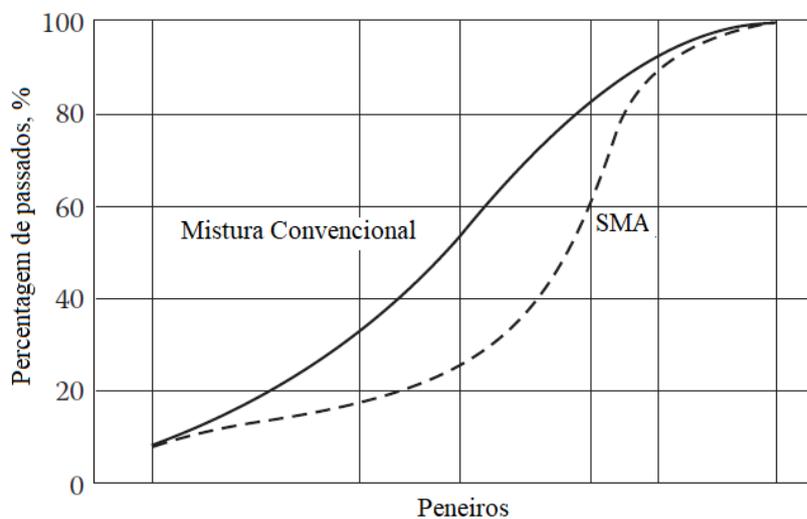


Figura 2.15 – Comparação entre misturas convencionais e misturas do tipo SMA (adaptado de Blazejowski, 2011)



Figura 2.16 – Comparação entre o aspeto interno das misturas convencionais com as misturas SMA (El-Hage, 2012)

Além do referido anteriormente, a granulometria descontínua permite, ainda, obter uma macrotextura rugosa que absorve o ruído, reduz a aquaplanagem e a reflexão da luz (Figura 2.17).



Figura 2.17 – a) Aspeto da superfície de um SMA (Antunes, 2014); b) Boa drenagem da água superficial (Martinho et al, 2013).

A coesão da mistura é, principalmente, assegurada pelo mástique betuminoso que, em elevada percentagem, reduz o índice de vazios, retardando o processo de oxidação.

Em comparação com as misturas convencionais, como já referido, o SMA apresenta um maior consumo de ligante betuminoso, o que se traduz numa maior espessura da película de betume que envolve o agregado, aumentando a resistência ao desgaste e ao envelhecimento, a durabilidade e a resistência à fadiga (El-Hage, 2012).

2.2.3 Materiais constituintes do SMA

As misturas betuminosas, concebidas a partir da combinação de ligante betuminoso, agregados e, se necessário, aditivos, quando doseadas e compactadas corretamente devem fornecer um revestimento que seja durável e resistente. Por este motivo, a caracterização dos materiais a serem utilizados torna-se essencial, assim como o controlo das quantidades e do processo construtivo.

Como já referido anteriormente, as misturas SMA são caracterizadas por apresentarem elevadas percentagens de agregado grosso, pelo que é necessário garantir a boa qualidade deste material, realizando um estudo sobre as características do material, nomeadamente, o desgaste de *Los Angeles* deve ser inferior a 30%, a quantidade de partículas longas e achatadas tem de ser menor que 20% na relação 3:1 e menor que 5% na relação 5:1, a absorção de água não deve ser superior a 2%, e a percentagem de partículas fraturadas com uma face e duas faces tem de ser de 100% ou superior a 90%, respetivamente (Blazejowski, 2011).

Apesar das restrições acima referidas, em relação à percentagem de partículas longas e achatadas, existem autores que defendem que algumas partículas alongadas e de formato irregular são desejáveis para melhorar o imbricamento do esqueleto pétreo. Os agregados cúbicos e de textura áspera são os mais aconselháveis, sendo os agregados arredondados não recomendados, devido à sua tendência de “flutuação” (Prowell et al, 2010).

Os agregados finos, ou agregados passivos, têm como principal função o preenchimento dos vazios existentes entre os agregados grossos, facilitando o imbricamento do esqueleto pétreo. Também este material está sujeito a algumas restrições, nomeadamente a sua angularidade deve ser no mínimo 45%, o limite de liquidez tem de ser inferior a 25% e o índice de plasticidade próximo de zero, ou seja, o material deve ser não plástico (Blazejowski, 2011).

Apesar dos efeitos positivos da angularidade em algumas propriedades, tais como, a resistência à deformação, também é preciso ter em atenção alguns dos efeitos negativos, como é o caso da resistência à compactação, que tende a aumentar com a angularidade (Blazejowski, 2011).

O fíler, nas misturas SMA, é utilizado em maiores quantidades do que nas misturas convencionais, entre 8 e 12%. Este material é necessário para preencher os vazios entre as partículas maiores de agregado e, em proporções adequadas, ajuda a melhorar o desempenho em termos de rigidez, de trabalhabilidade da mistura e de durabilidade.

É necessário controlar a quantidade de fíler usada na mistura para não ser em excesso, nem em falta. Um excesso de fíler poderá levar ao endurecimento do mástique, o que pode traduzir-se num aumento de suscetibilidade ao aparecimento de fendas. A afinidade entre o betume e o fíler influencia a durabilidade da mistura, isto é, a sensibilidade à água. A utilização de um fíler demasiado fino poderá acarretar problemas, uma vez que absorve muita quantidade de betume, o que poderá plastificar a mistura. O índice de plasticidade do fíler não deve ser superior a 4 (Blazejowski, 2011).

Quanto ao ligante betuminoso podem ser utilizados betumes tradicionais ou betumes modificados. Os betumes tradicionais são suscetíveis ao escorrimento pelo que é recomendada a utilização de fibras de celulose. A escolha do tipo de ligante deverá ser feita com base nas condições climáticas e de tráfego esperadas. O facto do tipo de betume ser escolhido com base nas condições locais de temperatura, por vezes, não permite o uso de betumes duros (por exemplo, 35/50), para evitar fendas de baixa temperatura. Nos países de clima frio é habitual usar betumes modificados devido à sua alta recuperação elástica a baixas temperaturas (Blazejowski, 2011).

Os países que utilizam betume tradicional assumem que a resistência do pavimento é assegurada pelo esqueleto pétreo, o que justifica o uso de betumes médios, como é o caso do 50/70, comumente utilizado na Alemanha. Segundo Blazejowski (2011), na maior parte dos casos em que são utilizados betumes modificados existe um aumento significativo da resistência.

Como já referido anteriormente, as misturas SMA são caracterizadas por consumirem elevados teores de ligante o que, para evitar o escorrimento, torna necessário recorrer à utilização de aditivos estabilizadores, sendo os mais comuns as fibras.

Segundo Blazejowski (2011), os aditivos estabilizadores de betume podem ser de vários tipos:

- Celulose – as mais utilizadas;
- Pseudo-celulose – feitas a partir de papel inutilizado;
- Minerais – desenvolvidas a partir da fusão de alguns tipos de rocha (como a lã de rocha);
- Celulose-mineral – uma mistura de celulose com fibras minerais;

- Celulose-polímero – uma mistura de celulose com diferentes tipos de polímeros em proporções variadas;
- Celulose-cera – uma mistura de celulose com ceras sintéticas, que além de funcionarem como estabilizadores alteram a viscosidade do ligante betuminoso;
- Têxtil – através do processamento e fragmentação de resíduos de origem têxtil;
- Plásticas – por exemplo, polipropileno;
- Vidro – em forma de fios (como lã de vidro);
- Outros tipos – por exemplo, fibra de coco.

A diferença entre as fibras está no seu poder de absorção. As fibras de celulose são as que, em geral, apresentam maior eficiência de absorção do ligante (Blazejowski, 2011) (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Percentagem ponderal de fibras na mistura SMA (Antunes, 2014)

Tipo de fibra	Faixa recomendada na mistura
Celulose	0,3% a 0,5%
Mineral	0,7% a 0,9%
Vidro	0,4% a 0,6%

As fibras podem ser encontradas em diversas formas (Figura 2.18), nomeadamente:

- Soltas, em forma de fios de celulose irregulares;
- *Pellets*, produto granulado sem agente de ligação;
- Produtos granulados, grãos cilíndricos revestidos com betume ou outro ligante.

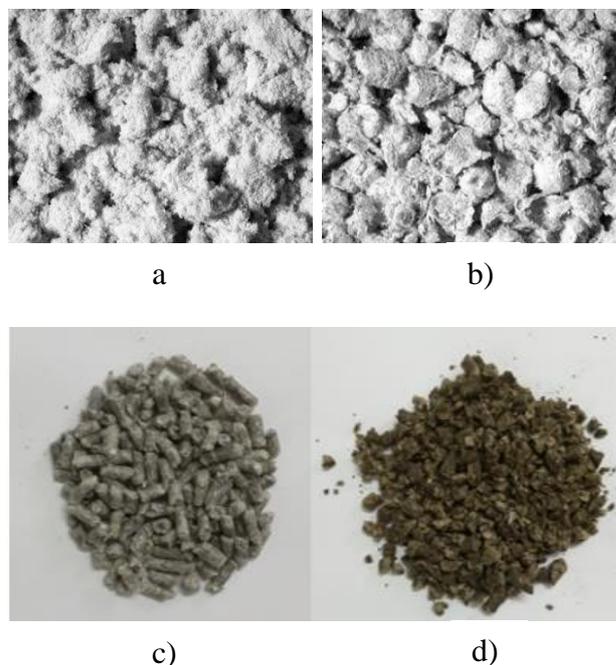


Figura 2.18 – Diferentes formas em que podem ser encontradas as fibras: a) soltas (Blazejowski, 2011); b) pellets (Blazejowski, 2011); c) granulado revestido com cera; d) granulado revestido com betume.

2.2.4 Formulação de misturas do tipo SMA

Independentemente do método de formulação utilizado, o primeiro passo que deve ser realizado é estabelecer a dimensão máxima da mistura de agregados. Para isso é necessário ter em conta: a posição da camada de SMA, camada de desgaste ou intermédia; a espessura da camada depois de compactada; carga de tráfego e a localização da estrada (por exemplo rural ou urbana); requisitos adicionais (Blazejowski, 2011).

Depois de definida a dimensão máxima da mistura SMA deverá proceder-se à composição da mistura de agregados, existindo algumas regras gerais, tais como:

Proporções originais de Zichner

Segundo Zichner, a composição recomendada para a produção de um SMA deve seguir as seguintes regras:

- A percentagem de partículas grossas deverá estar entre 65 a 80%, preferencialmente 70 a 75%, usando apenas partículas esmagadas;
- A “percentagem de agregado de maior tamanho tem de ser superior à de menor tamanho”;
- O mástique deve estar entre 20 a 35%;
- 23 a 28% do mástique corresponde ao ligante;
- Para camadas com diferentes espessuras devem ser usados diferentes tipos de agregados: camadas inferiores a 3 cm - frações 2/5.6 mm e 5/8 mm em proporções de 25 e 75% , respetivamente; camadas entre 3 a 4,5 cm - frações 2/5.6 mm 5.6/8 mm e 8/12 mm ou apenas frações 5.6/8 mm e 8/12 mm; camadas superiores a 4,5 cm - frações de 2/5.6, 5.6/8, 8/12 e 12/18 mm;
- Deve ser utilizada somente areia produzida por britagem no mástique;

Analisando os aspetos acima assinalados é possível indicar as quantidades aproximadas de cada fração (Quadro 2.3 e 2.4).

Quadro 2.3 – Quantidades de agregado aproximadas para Zichner (adaptado de Blazejowski, 2011)

Mistura	Fíler <0.09mm	Areia 0.09-2.0 mm	Agregado 2/5.6 mm	Agregado 5.6/8 mm	Agregado 8/12.5 mm
SMA 0/8	12-13%	11-12%	15%	60%	-
SMA 0/12.5	12-13%	11-12%	10%	27%	38%

Quadro 2.4 –Proporções para as diferentes frações usadas no método alemão atual (adaptado de Blazejowski, 2011)

SMA	2/5 mm	5/8mm	8/11mm
SMA 0/8	2.5 partes	4.5 partes	NA
SMA 0/8S	2 partes	5.5 partes	NA
SMA 0/11S	1 parte	2 partes	4 partes

Regra 30-20-10

Esta regra sugere que o correto contacto entre partículas (*stone-to-stone*) é conseguido se a percentagem de passados nos peneiros 0,075 mm, 2,36 mm e 4,75 mm for igual a 10%, 20% e 30%, respetivamente. Se compararmos esta regra com a anterior, podemos concluir que a regra 30-20-10 produz misturas SMA com quantidades de areia e fíler menores.

Sistemas Binários

As diferenças na quantidade de vazios da mistura são consequência de mudanças nas proporções dos agregados (Figura 2.19).

- Uma mistura composta por 100% de agregados finos, tem um certo nível de vazios, que diminui com a adição de agregado grosso;
- Quando a quantidade de agregados grossos se encontra entre 60 e 70%, é atingido o valor mínimo de vazios, sendo então impossível continuar a adicionar agregados grossos uma vez que eles já entraram em contato uns com os outros;
- Proceder de forma inversa, ou seja, estabelecer a quantidade de vazios através da retirada de agregados finos, até se obter 100% de agregado grosso, atingindo a quantidade máxima de vazios.

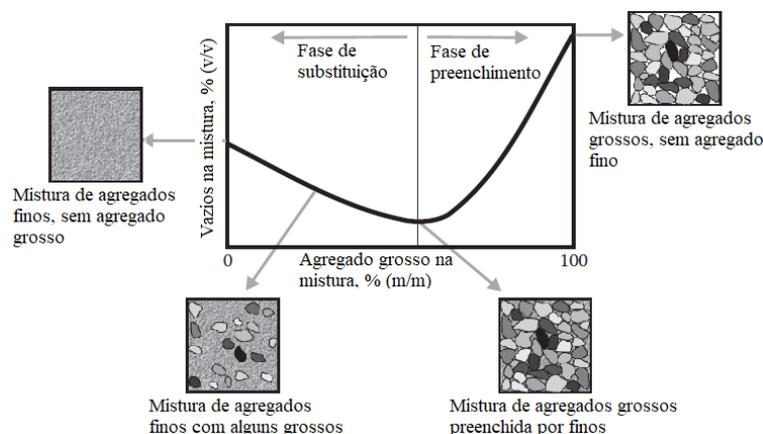


Figura 2.19 – Relação entre a quantidade de vazios e as frações de agregados (adaptado, Blazejowski, 2011)

A relação entre a proporção dos agregados e a quantidade de vazios traduz-se diretamente na quantidade de ligante, ou seja, a quantidade ótima de betume depende da quantidade de agregado grosso.

A relação que existe entre o ligante, os vazios e as frações de agregado torna possível afirmar que, para conseguir a quantidade de vazios pretendida é mais adequado efetuar alterações na curva de agregados do que na quantidade de betume.

O método mais comum para definir a mistura de agregados de um SMA é através da aplicação de limites. Este método consiste em analisar os agregados, incluindo o fíler, e ponderar as proporções dos agregados de forma a que a curva fique entre os limites adotados. Infelizmente, este método tem algumas desvantagens que, por vezes, pode conduzir a uma mistura SMA pobre (Blazejowski, 2011).

A posição da curva de agregados entre os limites não garante que o esqueleto pétreo será o adequado, nem prevê o impacto das partículas longas e achatadas.

Existem alguns métodos mais fiáveis, que recorrem ao uso de outros conceitos além dos limites, tais como os que se descrevem sumariamente a seguir (Blazejowski, 2011).

Método Alemão

Devem ser seguidas neste método as seguintes etapas:

- Definir a composição da mistura de agregados através dos limites;
- Definir as séries de betume na mistura;
- Preparar provetes Marshall para cada variante;
- Determinar os parâmetros volumétricos das amostras;
- Selecionar a melhor mistura com base no volume de vazios das amostras compactadas, no seu volume de vazios preenchidos por betume, no ensaio de escorrimento de *Schellenberg* e no ensaio de deformação permanente.

Método Americano

O método consiste nas seguintes etapas:

- Selecionar o agregado;
- Definir a composição da mistura com base no contacto entre partículas, definindo a curva através dos limites, mas sem alterar a quantidade de fíler;
- Selecionar a composição de acordo com a quantidade mínima de vazios na mistura de agregados (VMA);
- Selecionar a quantidade de betume com base na quantidade de vazios;
- Analisar a sensibilidade à água.

Método Checo

Este método consiste em:

- Selecionar a curva da mistura através da análise do impacto da quantidade de agregados grossos nas propriedades do SMA (realização de várias misturas com características diferentes, seguida de ensaios e comparação dos resultados para estabelecer a mistura final);
- Determinar a quantidade ótima de betume para a mistura selecionada, com base nos resultados dos ensaios realizados no ponto anterior escolhe-se a quantidade de betume, e executam-se ensaios adicionais. Se os requisitos foram verificados a formulação está finalizada.

Método Holandês

Este método segue as seguintes etapas:

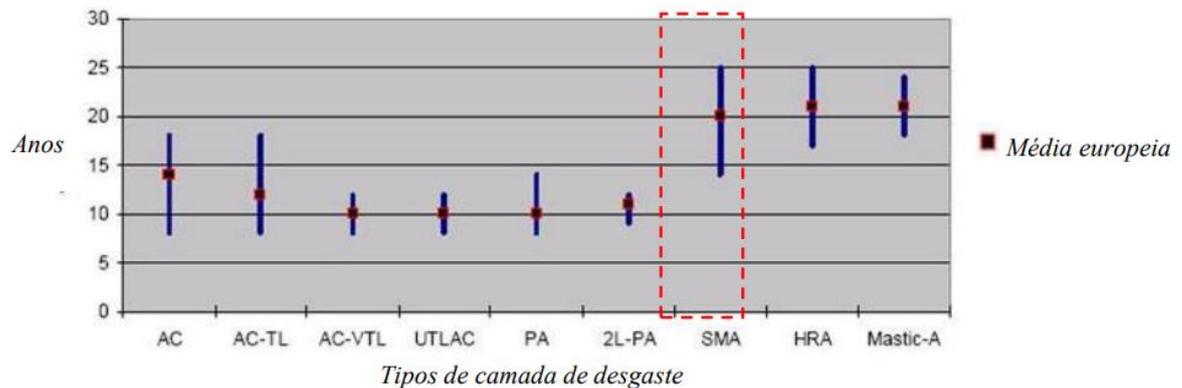
- Calcular a quantidade de vazios com base nas propriedades volumétricas;
- Calcular a relação percentual do esqueleto de agregado grosso preenchido por mástique (FRs);
- Calcular a quantidade de vazios real da mistura SMA baseada num fator adicional de correção, que traduz a relação entre a quantidade de vazios real e teórica;
- Efetuar uma análise da composição com base na quantidade de vazios real, ajustando a composição, se necessário, e refazer os cálculos;
- Produzir misturas adicionais com +/- 2,5 % da fração de agregado grosso, seguido de uma avaliação dos seus parâmetros.

2.2.5 Características de desempenho das misturas SMA

As misturas do tipo SMA possuem um conjunto de características que contribuem de forma positiva para o seu desempenho (Blazejowski, 2011; Fonseca, 2011; Antunes, 2014):

- Boa flexibilidade a baixas temperaturas – elevada resistência à fadiga, devido à elevada percentagem de ligante;
- Boa estabilidade a temperaturas elevadas – elevada resistência à deformação permanente e à exsudação, resultado da descontinuidade da curva da mistura (maior contacto entre os agregados grossos);
- Elevada resistência ao desgaste – a mistura SMA tem baixo índice de vazios, o que faz com que seja pouco permeável, apresente boa resistência ao envelhecimento e baixa sensibilidade à água;
- Aderência betume-agregados favorável – mástique rico em ligante e com fibras celulósicas que, além de reterem o betume, melhoram o revestimento das partículas de agregado;
- Boa resistência superficial à derrapagem – devido à boa macrotextura superficial;

- Redução do efeito de *spray* – devido à textura superficial, a drenagem da água superficial é melhorada, reduzindo o efeito de *spray*, assim como a reflexão das luzes noturnas, melhorando também a visibilidade das marcas rodoviárias;
- Redução do nível de ruído – devido às propriedades da textura superficial há alguma redução do ruído gerado pelo contacto entre o pneu e a camada de desgaste;
- Maior durabilidade (Figura 2.20).



Legenda: **AC** - Betão betuminoso (*Asphalt Concrete*); **AC-TL / BBTM** - Betão betuminoso - camadas delgadas (*Asphalt Concrete - Thin Layers / Béton Bitumineux Très Mince*); **AC-VTL** - Betão betuminoso - camadas muito delgadas (*Asphalt Concrete - Very Thin Layers*); **UTLAC** - Camada de betão betuminoso ultra delgada (*Ultra Thin Layer Asphalt Concrete*); **PA** - Betão betuminoso drenante (*Porous Asphalt*); **2L-PA** - Betão betuminoso drenante de dupla camada (*Double Layered - Porous Asphalt*); **SMA** - *Stone Mastic Asphalt*; **HRA** - *Hot Rolled Asphalt*; **Mastic-A** - *Mastic Asphalt*.

Figura 2.20 – Durabilidade das diversas misturas utilizadas a nível europeu (Martinho et al, 2013; Antunes, 2014)

As misturas do tipo SMA apresentam, em geral, um elevado desempenho mecânico e boas características funcionais, quando aplicadas em camada de desgaste. Por este motivo têm sido usadas em diversas aplicações, como (Fonseca, 2011; Antunes, 2014):

- Vias com alta percentagem de tráfego de camiões;
- Pistas de aeroportos;
- Autoestradas;
- Autódromos;
- Portos marítimos;
- Túneis;
- Viadutos e pontes;
- Rampas;
- Paragens de autocarros;
- Interseções;
- Rotundas excêntricas;
- Zonas de armazenamento de contentores;
- Vias com muito tráfego ou inclinações acentuadas.

2.2.6 Desvantagens das misturas SMA

Como qualquer outro material, as SMA também apresentam algumas desvantagens, sendo em geral citadas as seguintes (Blazejowski, 2011; Martinho et al, 2013):

- Não são indicadas para obras com pouco tráfego ou sobretudo constituído por veículos ligeiros;
- Apresentam baixa resistência inicial à derrapagem que, por vezes, requer a aplicação de areia sobre o pavimento, denominado *gritting* (ensaibramento);
- Risco de surgimento de diferentes pontos de exsudação, como resultado de erros de formulação, produção ou construção;
- Elevado custo inicial, quando comparadas com as misturas tradicionais.

Os principais fatores que influenciam o elevado custo inicial das misturas betuminosas do tipo SMA são a elevada percentagem de betume e/ou o recurso a betumes modificados, a elevada quantidade de fíler, a utilização de agentes estabilizadores, a elevada quantidade de agregado grosso (de boa qualidade) e a temperatura de fabrico mais alta (Blazejowski, 2011).

Apesar do maior custo inicial, a durabilidade do SMA proporciona um menor custo no ciclo de vida do que as misturas tradicionais. Deste modo, é possível afirmar que o elevado custo inicial é compensado pelo sua durabilidade e baixo custo de manutenção (Blazejowski, 2011).

2.2.7 Fabrico, Transporte e Aplicação de misturas do tipo SMA

A produção de misturas do tipo SMA é semelhante à das misturas tradicionais, sendo a única recomendação especial garantir que o tempo de mistura é suficiente para se obter uma perfeita homogeneidade da mistura. A introdução das fibras na mistura pode ser realizada de forma manual ou através de um sistema de dosagem automatizado, o qual é utilizado para produção de quantidades de mistura a produzir superiores a 15/20 mil toneladas (Martinho et al, 2013).

A sequência mais comum de inserção dos constituintes, tendo por base a homogeneização da mistura, é iniciada com os agregados (inclusive o fíler), seguido pelos estabilizadores e, por último, o ligante (Blazejowski, 2011).

Não é recomendado o armazenamento destas misturas por longos períodos de tempo, pois, quando armazenadas a temperaturas elevadas, estão sujeitas a um elevado risco de escorrimento do ligante. Esta limitação causa problemas quando a central tem baixo rendimento e são necessárias grandes quantidades de mistura (Blazejowski, 2011).

Dependendo da temperatura, da quantidade de ligante e da composição mineral, as misturas do tipo SMA podem ser armazenadas durante um período de 2 ou 3 horas, a temperaturas elevadas. Se, por alguma razão, a mistura tiver de permanecer armazenada por mais tempo, é recomendado que a quantidade de estabilizadores seja superior (Blazejowski, 2011).

É importante monitorizar a diminuição de temperatura da mistura quando armazenada nos silos, pois nem todos estão equipados com paredes aquecidas. O arrefecimento da mistura pode causar muitos problemas, principalmente se o betume for modificado. Estas misturas não devem ser armazenadas durante a noite (Blazejowski, 2011).

No que diz respeito ao transporte, o tempo de transporte deve ser o mais curto possível e não se deve aumentar a temperatura para compensar a maior distância de transporte, pois a temperatura elevada combinada com a vibração do veículo pode resultar num escorrimento excessivo do betume.

Antes de colocar a mistura no camião de transporte é necessário garantir que este está devidamente limpo e livre de sujidade, e as laterais do camião devem estar cobertas com um agente para evitar a adesão da mistura, sendo este agente escolhido de forma a não prejudicar o ligante betuminoso (Blazejowski, 2011).

Durante o transporte é formada uma crosta fria de mistura cuja espessura aumenta à medida que é maior a descida de temperatura, pelo que é necessário que a mistura seja protegida termicamente (por exemplo, por uma lona de isolamento). A diminuição de temperatura, durante o transporte, depende das condições ambientais (temperatura do ar, humidade e velocidade do vento), velocidade do camião carregado, tempo de transporte, massa da carga, formato do camião e as suas propriedades de isolamento (Blazejowski, 2011).

Em climas frios, a melhor maneira de conter a diminuição da temperatura, durante o transporte, é utilizar o meio de transporte adequado, sendo os camiões com caixas isoladas a melhor opção.

As misturas do tipo SMA são caracterizadas por apresentarem elevada trabalhabilidade, devido à elevada percentagem de betume que apresentam, o que facilita o seu espalhamento durante a aplicação, sem necessidade de recorrer a equipamentos especiais, ou seja, os equipamentos para aplicação da mistura podem ser os habitualmente usados nas misturas tradicionais.

Não é recomendada a aplicação destas misturas quando a superfície está húmida ou durante períodos de chuva (Blazejowski, 2011).

No que diz respeito à compactação, estas misturas requerem cuidados especiais, recomendando-se a utilização de cilindros um pouco mais pesados, superiores a 9 toneladas-força (Martinho et al, 2013; Blazejowski, 2011).

Alguns países utilizam técnicas especiais de acabamento da superfície, como é o caso do *gritting*, que consiste na aplicação de uma fina camada de agregado fino sobre a superfície durante a compactação. Este processo é utilizado com a finalidade de aumentar o atrito inicial da camada, ou seja, a sua resistência inicial à derrapagem, a qual, geralmente, é baixa devido à camada de betume que cobre a superfície do agregado.

Sem este processo, o desgaste da película de betume que cobre a superfície dos agregados é lento e depende da ação do tráfego.

Segundo Blazejowski (2011), os agregados utilizados no processo podem ser:

- Agregados 2/5 mm, limpos e quentes, para SMA no mínimo 0/11;
- Agregados 1/3 mm, lavados e quentes, para qualquer SMA;
- Agregados 0,25/2 mm, lavados e quentes, revestidos com cerca de 1% de betume para qualquer SMA mas, preferencialmente, para SMA 0/5 e 0/8.

Os agregados devem ser aplicados a temperaturas superiores a 110°C, para garantir a sua adesão à superfície do SMA. Após aplicação da camada de *gritting* e do arrefecimento do SMA, deve proceder-se à remoção do excesso de agregado que não aderiu.

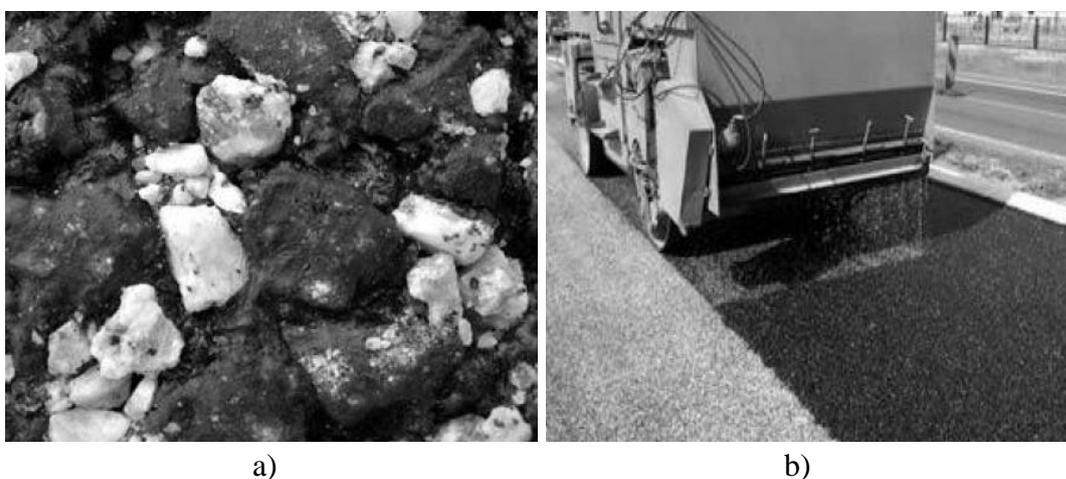


Figura 2.21 – a) Aspeto do *gritting* aplicado sobre a superfície do SMA; b) Execução do processo de *gritting* com equipamento acoplado ao cilindro compactador (Blazejowski, 2011)

Antes da abertura ao tráfego é necessário garantir que o pavimento está suficientemente frio, até a temperatura da superfície estar à temperatura ambiente, para evitar danos prematuros.

2.2.8 Patologias

Tal como acontece nas outras misturas, as misturas SMA também apresentam patologias que podem ser resultado da formulação, da produção ou da aplicação.

As patologias mais comuns nas misturas SMA são: os denominados *fat spots*, ou seja, a exsudação que consiste no aparecimento de ligante à superfície, e a segregação que leva ao aparecimento de mástique à superfície (Figura 2.22); os nódulos de estabilizadores (Figura 2.23); a estrutura do SMA muito aberta ou muito fechada (Figura 2.24); a infiltração de água

(Figura 2.25); os problemas relacionados com as técnicas de espalhamento e com a temperatura (Figura 2.26) (Blazejowski, 2011).

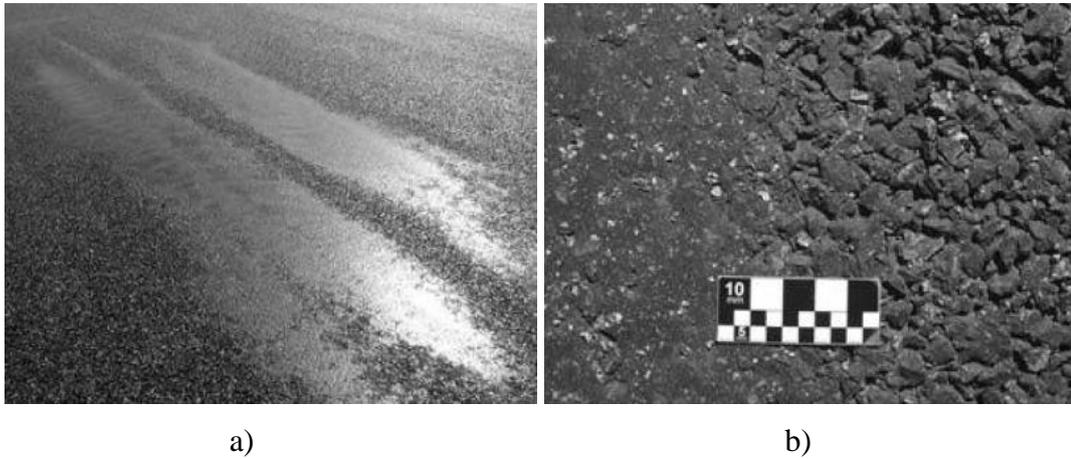


Figura 2.22 – *Fat spots* de ligante (a) e de mástique (b) (Blazejowski, 2011)



Figura 2.23 – Nódulos de estabilizadores no interior do pavimento (Blazejowski, 2011)

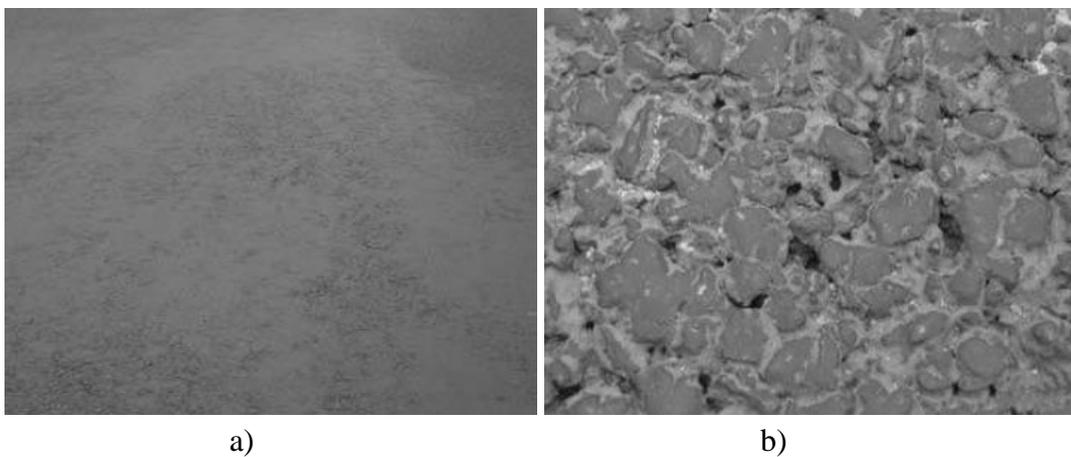


Figura 2.24 – Estrutura do SMA muito fechada (a) e muito aberta (b) (Blazejowski, 2011)



Figura 2.25 – Infiltração de água no pavimento (Blazejowski, 2011)

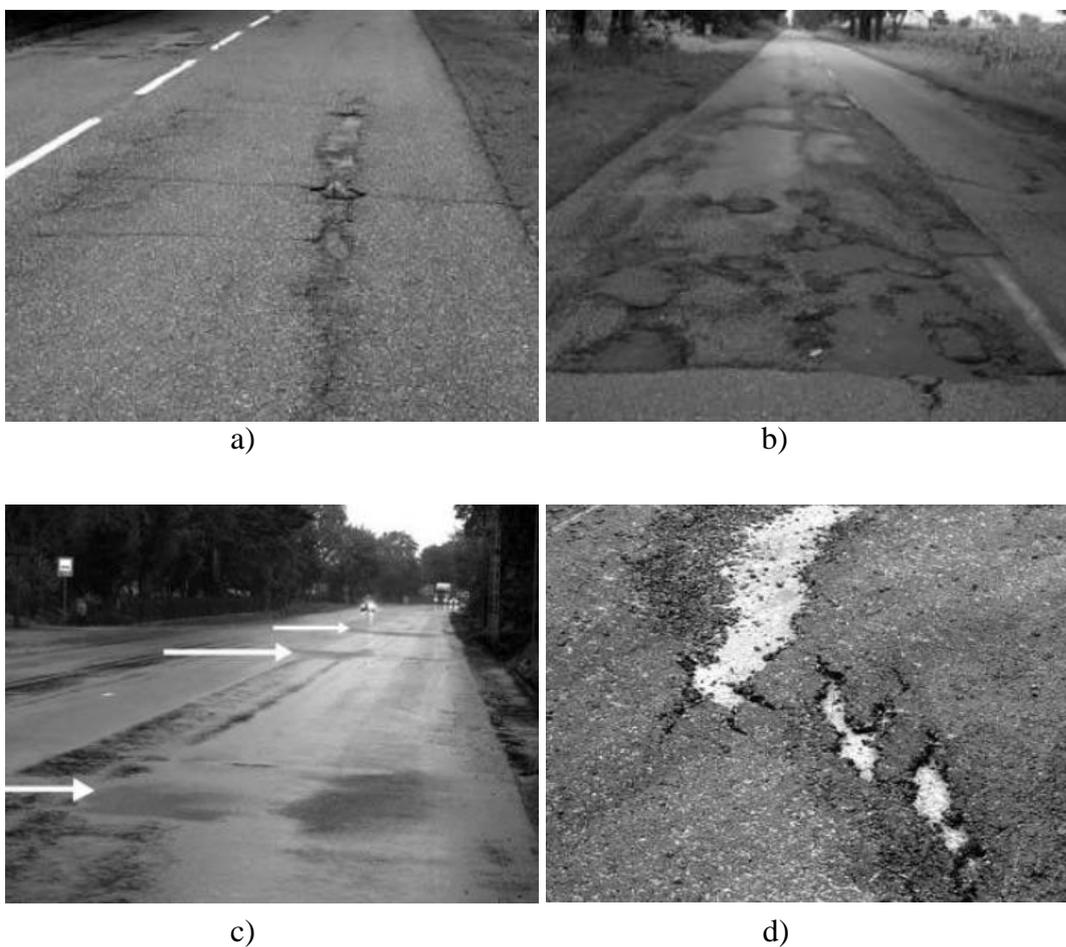


Figura 2.26 – Patologias relacionadas com a temperatura e aplicação da mistura: Porosidade longitudinal (a); aplicação a temperatura muito baixa (b); porosidade transversal (c) e falta de aderência da mistura à base (d) (Blazejowski, 2011)

2.2.9 Utilização das misturas SMA no mundo

Desde 1968 que as misturas SMA são usadas por todo o mundo, sendo vários os exemplos de aplicações bem-sucedidas que têm contribuído para a aquisição de experiência e conhecimento, possibilitando a criação de um importante fundo documental, o qual tem servido de suporte para a utilização das misturas SMA em várias obras.

De entre as diversas obras realizadas existem algumas de grande importância como, pistas aeroportuárias, autoestradas, portos marítimos, túneis, viadutos e pontes e, em geral, vias com muito tráfego e inclinações acentuadas.

Em Portugal a primeira aplicação prática ocorreu em 2004, mas só em 2009 as SMA começaram a ser usadas com mais frequência (Martinho et al, 2013).

De entre os vários projetos realizados, em Portugal, encontram-se as seguintes obras:

- Rua Morais Soares, em Lisboa, 2004;
- Autódromo do Algarve, em Portimão, 2009;
- Nó dos Francos na via de Cintura Interna, no Porto, 2009;
- Avenida do Brasil, em Lisboa, 2010;
- Rotunda do Relógio, em Lisboa, 2011;
- EN 12 e IC 29, no Porto, 2011;
- Caminho de circulação B/C do aeroporto de Lisboa, 2012;
- A7-viaduto de Ribeira da Pena, 2013;
- A25 entre Carvoeiro e Boa Aldeia, 2013;
- Avenida Sidónio Pais, no Porto, 2013;
- Porto de Setúbal, 2014;
- A24 lanços G e F, 2014;
- Aeroporto do Porto, 2015;
- Aeroporto de Lisboa -RWY, 2015;
- EN15, em Penafiel, 2015;
- EN13, na Maia, 2015;
- Túnel do Porto, 2015;
- A2, nó de Coima, 2015;
- IC2 entre Leiria e Barracão, 2015;
- Aeroporto de Faro, 2017.

Além de Portugal, como já referido, as misturas SMA têm sido aplicadas um pouco por todo o mundo, sendo algumas apresentadas em seguida:

- Porto de Civitavecchia, Itália;
- Porto de Burga, Bulgária;
- Porto de Hamburg, Aeroporto de Frankfurt, entre muitas outras obras na Alemanha;
- Porto de Dover, Inglaterra;

- Toda a rede de Autoestradas da Coreia do Sul;
- Autoestrada de Buenos Aires - Aeroporto de Ezeiza, Argentina;
- Autoestrada Silla, Porto de Barcelona, Aeroporto de Barajas, Aeroporto de Santiago de Compostela, entre outras em Espanha;
- Aeroporto Gardermoen em Oslo, Noruega;
- Aeroporto Johannesburg, África do Sul;
- Aeroporto de Santiago, Cabo Verde;
- Ponte em Roosteren, na Holanda;
- Ponte oeste do Great Belt, na Dinamarca;
- Ponte em Plock e em Wroclaw, na Polónia;

3. Ensaaios utilizados no estudo laboratorial

3.1 Enquadramento

Neste capítulo apresentam-se os ensaios utilizados no estudo laboratorial realizado sobre duas misturas temperadas, do tipo SMA, para aplicação em camada de desgaste.

A diferença entre cada uma das misturas betuminosas está no tipo de betume e nas fibras utilizadas. Para a mistura SMA_BN recorreu-se a um betume 35/50 e fibras celulósicas do tipo *Viatop CT 40*[®]. Para a mistura SMA_BR utilizou-se betume aditivado de refinaria e fibras celulósicas *Viatop Premium*.

Os principais trabalhos laboratoriais, desenvolvidos no âmbito desta dissertação foram os seguintes:

- Ensaaios de caracterização dos materiais constituintes utilizados:
 - Análise granulométrica dos agregados e caracterização do betume.
- Fabrico da mistura e moldagem de provetes cilíndricos;
- Ensaaios de caracterização das propriedades volumétricas da mistura e do escorrimento do betume:
 - Baridade, baridade máxima teórica e avaliação do escorrimento do betume;
- Ensaaios de avaliação de algumas características mecânicas da mistura:
 - Compressão de Marshall, sensibilidade à água, tração indireta por compressão diametral e deformação permanente em compressão uniaxial.

3.2 Materiais granulares

Para caracterizar os materiais granulares utilizados houve necessidade de realizar análises granulométricas, seguindo a norma NP EN 933-1 e utilizando como equipamento principal um conjunto de peneiros da marca *Impact* e um peneirador automático da marca *Rotasift* (Figura 3.1). Com o objetivo de aumentar o rigor do ensaio, o processo de peneiração foi efetuado inicialmente com o auxílio do peneirador automático, seguido de peneiração manual.



a)

b)

Figura 3.1 – Peneiração: a) série de peneiros; b) peneirador automático

3.3 Betume asfáltico

As propriedades de uma mistura betuminosa dependem das características do betume utilizado, pelo que é necessário tomar conhecimento destas características. Algumas destas características são regulamentadas pela norma NP EN 12591 e apresentadas no Quadro 3.1

Quadro 3.1 – Requisitos para o betume 35/50 indicados na norma NP EN 12591

Características [condições de ensaio]	Método de ensaio	NP EN 12591
Penetração (mm) [25°C;100g;5s]	EN 1426	35-50
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427	50-58

- **Temperatura de amolecimento – Método do anel e bola (EN 1427)**

A temperatura de amolecimento é determinada pelo método do anel e bola, tendo-se seguido o procedimento descrito na norma EN 1427. Este ensaio tem como objetivo medir a temperatura a que o betume adquire uma consistência mole, numa situação normalizada.

O ensaio consiste em verter o betume para dois anéis de latão padronizados, que são colocados horizontalmente num suporte metálico. Sobre a amostra betuminosa é colocada uma esfera de aço normalizada. O conjunto é colocado em banho de maria, em que a água é aquecida a uma taxa fixa, até que o betume flua sob o peso da esfera e toque no fundo do recipiente. A média das temperaturas a que isto ocorre é considerada como temperatura de amolecimento.



Figura 3.2 – Aspeto dos ensaios de medição da temperatura de amolecimento do betume pelo método do anel e bola

3.4 Fabrico e moldagem dos provetes

Antes de se proceder à realização dos ensaios é necessário fabricar os provetes. Depois de conseguida a combinação dos agregados a utilizar (Subcapítulo 4.2) procede-se à pesagem destes a frio, após secagem, e colocam-se na estufa para que atinjam a temperatura desejada. De seguida são pesadas as fibras celulósicas e o betume necessário, misturam-se todos os componentes num recipiente próprio aquecido, e procede-se à amassadura com auxílio de um misturador automático (Figura 3.3), durante quatro minutos, tempo de mistura necessário para um SMA segundo a norma EN 12697-35. Depois é colocado o material no molde aquecido e procede-se à compactação. Por se tratar de uma mistura betuminosa temperada definiu-se a temperatura alvo de mistura para a SMA-BN de 125°C e de 115°C para a SMA-BR. Inicialmente a temperatura alvo estava definida para 125°C, no entanto, devido ao facto do betume aditivado em refinaria não dever ultrapassar os 120°C, para não perder propriedades, baixou-se a temperatura alvo da mistura SMA-BR para 115°C.



Figura 3.3 – Fabrico dos provetes

Os provetes para avaliação da resistência à compressão de Marshall e para a sensibilidade à água são moldados recorrendo a um compactador de impacto (Figura 3.4), seguindo as regras definidas na norma EN 12697-30. Este método consiste em compactar de forma dinâmica provetes cilíndricos, com um diâmetro de $101,6 \pm 0,1$ mm e uma altura de $63,5 \pm 2,5$ mm, através da queda de uma massa de 4,5 kg, de uma altura de 0,45 m, com a aplicação de 50 pancadas por face.



Figura 3.4 – Compactador de Marshall

Os provetes para avaliação da resistência à deformação permanente são moldados em moldes cilíndricos de aproximadamente 150 mm de diâmetro e uma altura de 60 ± 2 mm. No presente estudo recorreu-se ao método de compactação por vibro-compressão, utilizando um martelo

vibrador com duas cargas de 16 kg (Figura 3.5), tendo sido aplicado um tempo de compactação de 1 minuto por face.



Figura 3.5 – Martelo de compactação por vibro-compressão

3.5 Propriedades volumétricas

De modo a conhecer as propriedades das misturas SMA em estudo, determinaram-se, a partir de ensaios realizados sobre provetes Marshall, várias propriedades volumétricas, tais como, baridade, baridade máxima teórica, porosidade, VMA e VFB.

3.5.1 Baridade

Na determinação da baridade dos provetes, ρ_b , foram seguidas as regras definidas na norma EN 12697-6. A norma define quatro métodos de ensaio para determinar a baridade de provetes compactados:

- A - Baridade de provete seco, $\rho_{b,dry}$ (para provetes com superfície muito fechada);
- B - Baridade de provete saturado com superfície seca, $\rho_{b,ssd}$ (para provetes com uma superfície fechada e porosidade até 5 %, ou 4 % no caso de misturas descontínuas);
- C - Baridade de provete selado, $\rho_{b,sea}$ (para provetes com uma superfície aberta, ou grosseira e porosidade entre 5 % e 15 %);
- D - Baridade por dimensões, $\rho_{b,dim}$ (para provetes com uma superfície homogénea e formas geométricas bem definidas e porosidade superior a 15 %)

Nesta dissertação os métodos utilizados foram o B e o C. Para o caso do método B a determinação da baridade é realizada da seguinte forma (Figura 3.6):

1. Determina-se a massa do provete seco, $m1$;
2. O provete é imerso até a sua massa ser constante. A norma EN 12967-6 indica que o tempo de imersão deverá ser, pelo menos, 30 minutos. Após este tempo é determinada a massa imersa, $m2$;
3. Retira-se o provete da água e a sua superfície é seca com auxílio de um pano, e determina-se a massa do provete nestas condições, $m3$.

A baridade é determinada através da Expressão 3.1:

$$\rho_{b,ssd} = \frac{m1}{m3 - m2} \times \rho_w \quad (3.1)$$

Em que:

$\rho_{b,ssd}$ – Baridade do provete saturado com a superfície seca (kg/m^3);

$m1$ – Massa do provete seco (g);

$m2$ – Massa do provete imerso (g);

$m3$ – Massa do provete saturado com superfície seca (g);

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m^3).



Figura 3.6 – Baridade do provete saturado com a superfície seca

Para o método C, a baridade é determinada da seguinte forma (Figura 3.7):

1. Determina-se a massa do provete seco, $m1$;
2. Selagem do provete com parafina e determinação da sua massa, $m2$;

3. Determina-se a massa imersa do provete selado, m_3 ;

A baridade é determinada através da Expressão 3.2

$$\rho_{b,sea} = \frac{m_1}{\left(\frac{m_2 - m_3}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}\right)} \quad (3.2)$$

Em que:

$\rho_{b,sea}$ – Baridade do provete selado (kg/m^3);

m_1 – Massa do provete seco (g);

m_2 – Massa do provete selado (g);

m_3 – Massa do provete selado e imerso (g);

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m^3);

ρ_{sm} – Massa volúmica do material de selagem à temperatura de ensaio (kg/m^3).



Figura 3.7 – Baridade do provete com selagem

3.5.2 Baridade máxima teórica

A determinação da baridade máxima teórica realizou-se segundo a norma EN 12697-5, a qual apresenta os seguintes três métodos possíveis: (A) volumétrico, (B) hidrostático e (C) matemático. Nos trabalhos realizados no âmbito desta dissertação foram utilizados os métodos A e C.

Pelo método A (Figura 3.8) a baridade máxima teórica é determinada a partir do quociente entre a massa seca da amostra e o seu volume. Este processo pressupõe a desagregação completa dos provetes e realiza-se da seguinte forma:

1. Pesagem do picnómetro vazio com tampa, $m1$;
2. Pesagem do picnómetro com a amostra desagregada, $m2$;
3. Enchimento do picnómetro com água destilada;
4. Aplicação de pressão negativa e vibração do picnómetro de forma a libertar o ar que se encontra dentro do picnómetro;
5. Completa-se o enchimento até à marca de referência e pesa-se o conjunto, $m3$.

A determinação da baridade máxima teórica nestas condições é dada pela Expressão 3.3:

$$\rho_{mv} = \frac{m1}{1000 \times Vp - \frac{m3 - m2}{\rho_w}} \quad (3.3)$$

Em que:

ρ_{mv} – Baridade máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m^3);

$m1$ – Massa do picnómetro com tampa (g);

$m2$ – Massa do picnómetro com tampa e amostra desagregada (g);

$m3$ – Massa do picnómetro com tampa, amostra e água (g);

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m^3);

V_p – Volume do picnómetro, cheio de água até à marca de referência (m^3).



Figura 3.8 – Baridade máxima teórica com auxílio do picnómetro de vácuo

No caso do método C a baridade máxima teórica é determinada com recurso à expressão 3.4, que considera a massa volúmica de cada material da mistura.

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\frac{p_b}{\rho_b} + \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\rho_i}} \quad (3.4)$$

Em que:

ρ_{mc} – Baridade máxima teórica da mistura betuminosa determinada por cálculo (kg/m^3);

ρ_b – Massa volúmica do ligante (kg/m^3);

ρ_i – Massa volúmica de cada agregado (kg/m^3);

p_b – Percentagem de ligante na mistura (%);

p_i – Percentagem de cada agregado na mistura (%).

3.5.3 Porosidade, VMA e VFB

Através dos valores obtidos para a baridade dos provetes e para a baridade máxima teórica da mistura, e tendo por base os procedimentos de cálculo definidos na norma EN 12697-8, foram determinadas propriedades volumétricas relacionadas com os vazios existentes, tais como a porosidade, o volume de vazios na mistura de agregados (VMA) e o volume de vazios preenchidos pelo betume (VFB).

A porosidade de uma mistura betuminosa (V_m) é o volume de ar retido entre as partículas de agregado, expresso como uma percentagem de volume total da mistura, dado pela expressão 3.5.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m} \times 100 \quad (3.5)$$

Em que:

V_m – Porosidade (%);

ρ_m – Baridade máxima teórica da mistura (kg/m^3);

ρ_s – Baridade do provete (kg/m^3).

Os vazios de uma mistura de agregados (VMA) correspondem ao volume de vazios entre as partículas de agregado sem considerar o betume de uma mistura betuminosa (expressão 3.6). Os vazios preenchidos pelo betume (VFB) dizem respeito à percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos pelo betume (expressão 3.7)

$$VMA = Vm + B \times \frac{\rho_s}{\rho_b} \quad (3.6)$$

$$VFB = \frac{B \times \rho_s}{VMA} \times 100 \quad (3.7)$$

Em que:

VMA – Percentagem de vazios na mistura de agregados (%);

Vm – Porosidade (%);

B – Percentagem de betume do provete (em 100% da mistura);

ρ_s – Baridade do provete (kg/m^3);

ρ_b – Densidade do betume (kg/m^3);

VFB – percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (%).

3.6 Avaliação do escorrimento de betume pelo método de *Schellenberg*

Devido ao facto de as misturas do tipo SMA apresentarem uma granulometria descontínua é aconselhável realizar uma análise à drenagem do betume. Este ensaio destina-se a avaliar a quantidade de fibras celulósicas necessárias para que não haja escorrimento do betume. A drenagem do betume ocorre durante o armazenamento e/ou transporte e pode dar origem a heterogeneidade da distribuição de betume na mistura, o que conseqüentemente poderá causar patologias no pavimento. Para avaliar o escorrimento de betume foi realizado o ensaio de *Schellenberg* de acordo com a norma EN 12967-18.

O ensaio de *Schellenberg* é efetuado com auxílio de um copo, no qual se coloca a mistura com massa conhecida, a uma temperatura de 25°C acima da temperatura de compactação, durante um período de 60 minutos \pm 1 minuto.

De acordo com a norma EN 12697-18, o valor resultante do ensaio corresponde à percentagem de massa que fica retida no copo, após se virar o copo com a base para cima durante 10 segundos (Figura 3.9), e é obtido através da expressão 3.8

$$D = 100 \times \frac{(W3 - W1 - W4)}{(W2 - W1)} \quad (3.8)$$

Em que:

D – Percentagem de material escorrido no copo – “drenagem máxima” (%)

W1 – Valor da massa inicial do copo (g);

W2 – Valor da massa inicial do copo com a amostra de mistura betuminosa (g);

W3 – valor da massa inicial do copo com a massa de material retido após viragem (g);

W4 – Valor da massa de material seco retido no peneiro de malha quadrada de dimensão de 1 mm (g)



Figura 3.9 – Ensaio de escorrimento

3.7 Características mecânicas

Os ensaios de avaliação das características mecânicas das misturas betuminosas permitem a avaliação de características de deformabilidade e resistência à ação da água e à deformação permanente. Para tal foram realizados ensaios de compressão de Marshall, sensibilidade à água e de resistência à deformação permanente.

3.7.1 Compressão de Marshall

O ensaio de compressão de Marshall é um dos mais utilizados atualmente para caracterizar misturas betuminosas, embora não seja adequado para o estudo de misturas betuminosas do tipo SMA, pois geralmente apresenta valores de estabilidade baixos o que conduz, erradamente,

à conclusão de que este tipo de misturas apresenta baixa resistência à deformação (Drüschner et al, 2000).

Na realização deste ensaio foram seguidas as indicações definidas pela norma EN 12697-34. O ensaio consiste em manter os provetes imersos em água à temperatura de $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 40 a 60 minutos. De seguida são colocados na prensa de Marshall onde são comprimidos através de duas “meias canas” de aço até à rotura (Figura 3.10).

A força máxima medida no momento da rotura é definida por “estabilidade de Marshall” e caracteriza a resistência mecânica da mistura, enquanto a deformação obtida aquando a rotura é definida por “deformação de Marshall”.



Figura 3.10 – Ensaio de compressão de Marshall (Antunes, 2014)

3.7.2 Sensibilidade à água

Na presença de água, algumas misturas betuminosas compactadas perdem resistência ao longo dos anos. Este fenómeno é conhecido como sensibilidade à água. O desempenho e durabilidade das misturas betuminosas estão diretamente relacionados com a resistência à ação da água destes materiais.

A análise da sensibilidade à água foi efetuada de acordo com o método A da norma EN 12697-12. Este método baseia-se na comparação entre os valores médios de resistência à tração indireta medidos com recurso a ensaios de compressão diametral, executados de acordo com a norma EN 12697-23, realizados sobre dois grupos de provetes acondicionados em condições distintas. O primeiro grupo é mantido seco à temperatura de 25°C , enquanto que o segundo grupo é primeiramente submetido a vácuo em água durante 30 ± 5 minutos e posteriormente colocado em banho-maria à temperatura de $40 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 48 a 72 horas (Figura 3.11).

Após terminar o tempo de condicionamento é realizado o ensaio para determinar a resistência à tração indireta dos provetes secos (ITS_d) e dos imersos (ITS_w). A resistência conservada em tração indireta ($ITSR$), ou seja, a resistência à água em percentagem é dada pela expressão 3.9.

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (\%) \quad (3.9)$$



Figura 3.11 – Ensaio para determinação da sensibilidade à água

3.7.3 Resistência à deformação permanente

A existência de elevadas temperaturas na superfície do pavimento, o elevado tráfego pesado, a espessura e resistência da camada de desgaste são fatores que influenciam a resistência do pavimento a assentamentos, ou seja, a sua resistência à deformação permanente. Por este motivo a avaliação desta resistência é importante na formulação de misturas betuminosas. Esta avaliação pode ser realizada através de ensaios laboratoriais, os quais podem ser classificados em três grupos de ensaios (Feiteira, 2011):

- Ensaios empíricos (Marshall e Hveem);

- Ensaio fundamentais (compressão uniaxial estático ou cíclico, triaxial, de corte, de compressão diametral e em cilindro oco);
- Ensaio de simulação.

A Figura 3.12 apresenta uma breve descrição dos exemplos de cada um dos tipos de ensaios que podem ser usados.

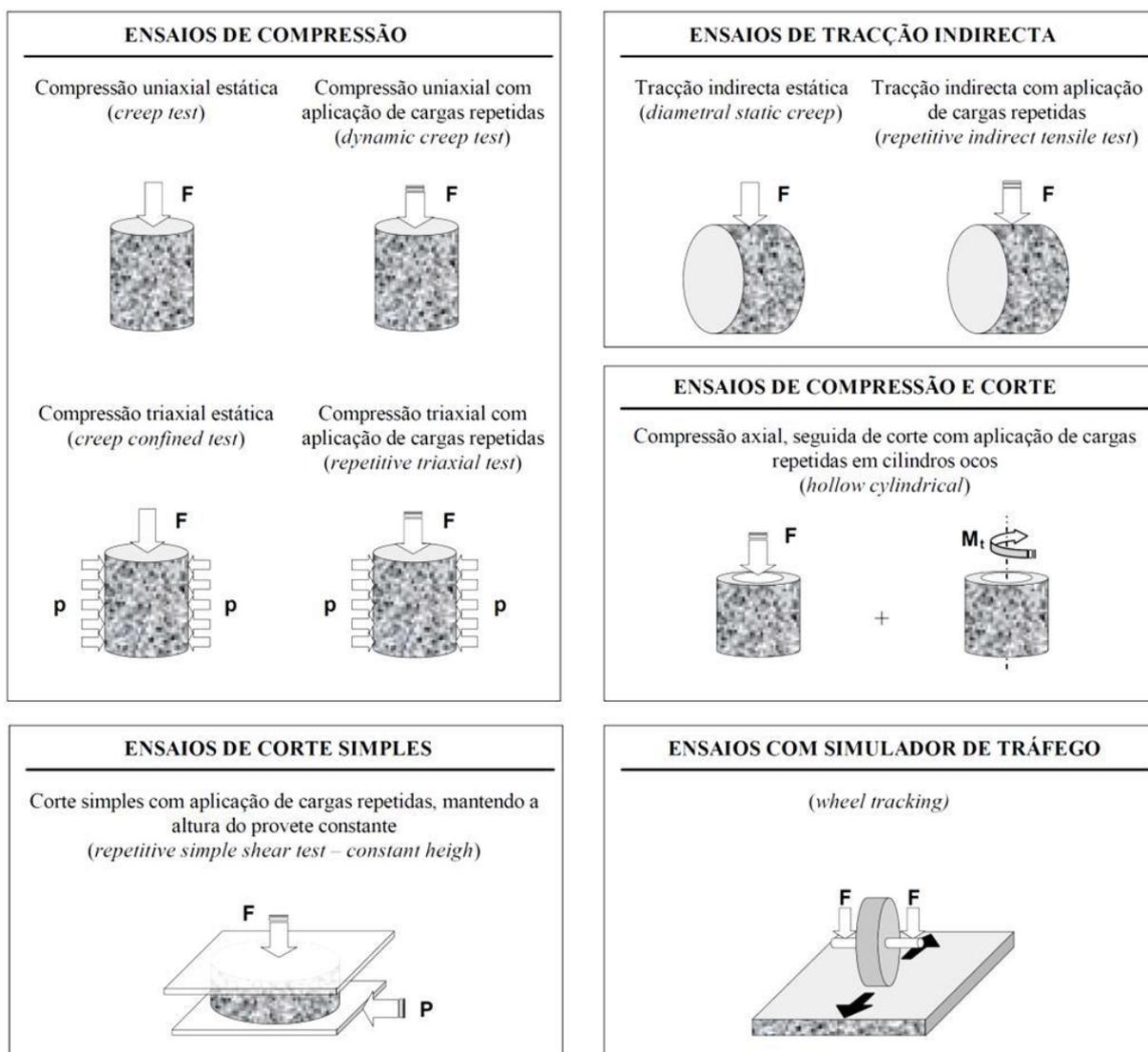


Figura 3.12 – Ensaio usados para avaliação da resistência à deformação permanente (Capitão, 2003).

Como se dispunha de equipamento necessário para a realização do ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, optou-se por usar este procedimento para caracterizar as misturas. Este ensaio foi realizado de acordo com o método A – compressão uniaxial de carga repetidas com confinamento, da norma EN 12697-25.

Os provetes foram moldados por vibro-compressão, em moldes cilíndricos, de forma a que resultassem provetes com diâmetro de 148 ± 5 mm e altura de 60 ± 2 mm.

Antes de começar a realização do ensaio colocaram-se os provetes e a estrutura de carga durante 4 horas na câmara climática à temperatura a que iam ser ensaiados (60°C). De seguida aplicou-se uma mistura de glicerina e pó talco nas placas de carga, de forma a minimizar o atrito entre as bases dos provetes e os pratos da máquina de ensaio e, conseqüentemente, evitar a formação de campos de tensões não uniformes no provete, que influenciam os resultados.

Este ensaio pressupõe um certo confinamento que é obtido através do facto da placa superior ter diâmetro inferior ao do provete (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Aspeto geral do ensaio

Segundo a norma, é necessário realizar um pré-carregamento de 10% do valor máximo de carga aplicado no ensaio, para que haja um bom ajuste entre o prato e a superfície do provete. De seguida são aplicados impulsos de carga periódicos, com uma tensão máxima de 100 ± 2 kPa, durante um segundo, seguidos de um período de repouso, também este de um segundo, como ilustrado na Figura 3.14. O ensaio tem a duração de 3600 ciclos, o que devido às condições de carregamento, corresponde a duas horas.

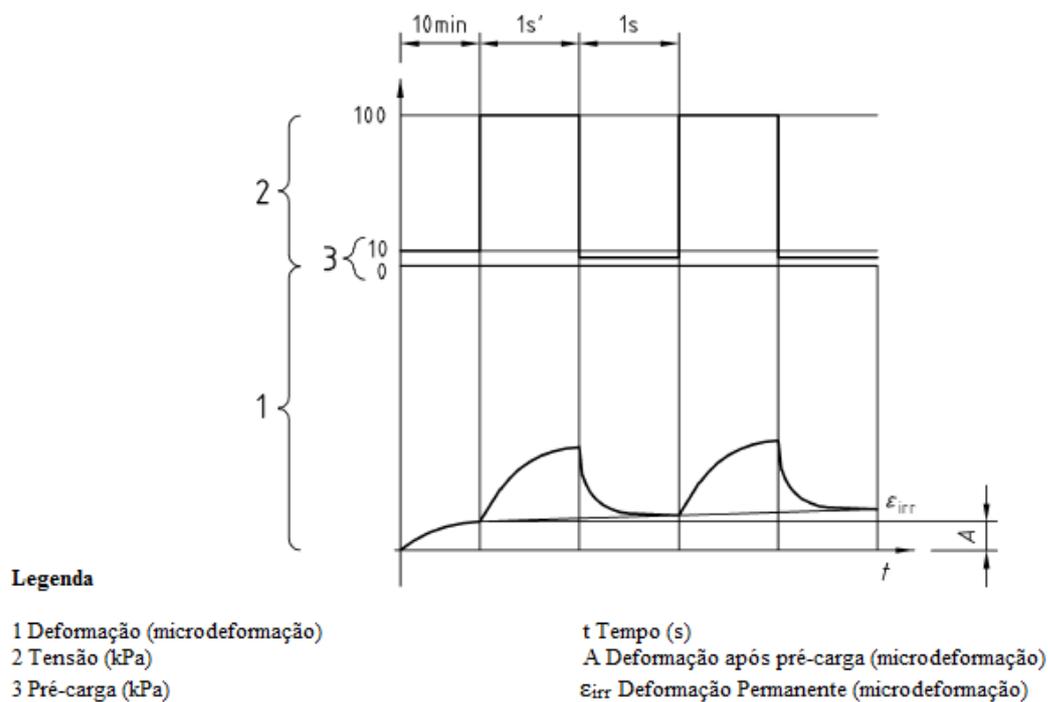


Figura 3.14 – Curva de tensão-deformação (adaptado EN 12697-25)

Os resultados são obtidos através do software do equipamento utilizado, sendo estes a força exercida na célula de carga e as leituras dos dois LVDTs, os quais registam as deformações axiais do provete, traduzidas por curvas de deformação em função do tempo (Figura 3.15).

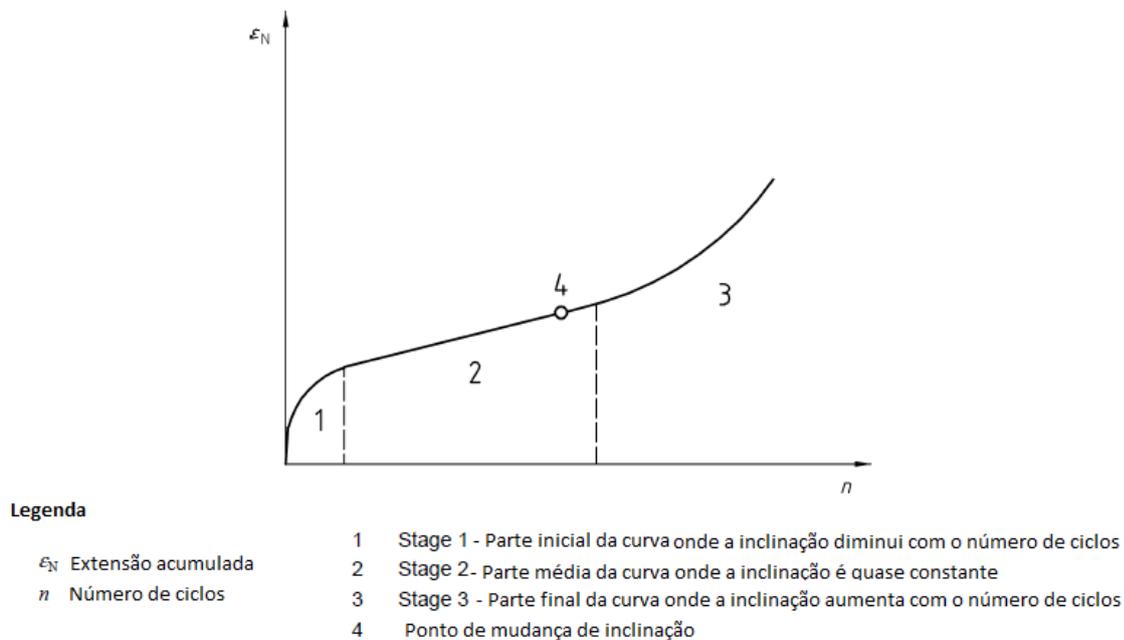


Figura 3.15 – Exemplo de curva deformação-tempo (adaptado EN 12697-25)

Segundo a norma EN12697-25 podem determinar-se vários parâmetros, tais como a taxa de deformação, f_c , num dado intervalo de ciclos em que a deformação é constante e quase linear, e a deformação axial acumulada no provete, ε_n , em percentagem, depois de finalizado o ensaio. O cálculo dos respetivos parâmetros é dado pelas expressões 3.10 e 3.11, respetivamente.

$$f_c = \frac{\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}}{n_1 - n_2} \quad (3.10)$$

Em que:

f_c – taxa de deformação ($\mu\varepsilon/\text{ciclo}$);

ε_{n1} ; ε_{n2} – deformação axial acumulada do provete após n_1 e n_2 aplicações de carga ($\mu\varepsilon$);

n_1 ; n_2 – número de aplicações de ciclos de carga.

$$\varepsilon_n = 100 \left(\frac{h_0 - h_n}{h_0} \right) \quad (3.11)$$

Em que:

ε_n – deformação axial acumulada do provete após n aplicações de carga (%);

h_0 – altura do provete medida após aplicação da pré-carga (mm);

h_n – altura média do provete após n aplicações de carga (mm).

A norma indica, ainda, que se a deformação permanente exceder os 40 000 microns e o gráfico extraído do software apresentar ponto de inflexão (Figura 3.15), o valor da taxa de deformação é dado pela linha extrapolada de menor inclinação.

4. Discussão e apresentação de resultados

4.1 Enquadramento

O estudo experimental que serviu de base a esta dissertação tem como objetivo contribuir para o conhecimento do comportamento mecânico de misturas do tipo SMA. Como já foi referido anteriormente, este estudo foi realizado sobre dois tipos de misturas betuminosas temperadas, do tipo SMA, com diferenças nos seus constituintes.

Neste capítulo são apresentados os constituintes das misturas, os resultados provenientes do estudo laboratorial, assim como a sua análise e interpretação.

4.2 Formulação da mistura a estudar

A estabilidade de uma mistura betuminosa depende muito do esqueleto de agregado e do tipo de betume utilizado, pelo que é necessário conhecer algumas das características destes elementos. As fichas técnicas dos materiais granulares e das fibras celulósicas encontram-se no Apêndice I.

Como já referido anteriormente foram usados dois tipos de ligante no presente estudo, nomeadamente o betume 35/50 e o betume aditivado em refinaria também da classe 35/50. Segundo o fornecedor, ambos cumprem os requisitos da norma EN 12591. Foram ainda utilizados dois tipos de fibras celulósicas, *Viatop CT 40*[®] e *Viatop premium*, ilustradas na Figura 4.1. As primeiras contêm ceras para reduzir a temperatura de fabrico e as segundas contêm apenas betume.



Viatop CT 40[®]

Viatop premium

Figura 4.1 – Fibras celulósicas utilizadas

Antes de começar a moldagem de provetes é necessário proceder à formulação da mistura a analisar. Para isso recolheram-se das fichas técnicas dos agregados as suas características físicas mais relevantes, as quais se encontram resumidas nos Quadros 4.1 a 4.3. Em cada quadro são também indicados os requisitos, de acordo com a NP EN 13043.

Quadro 4.1 – Características físicas do agregado de granulometria 4/12 mm

Propriedade	Massa volúmica			Granulometria	FI (%)	SI (%)	LA (%)	MDE (%)	Baridade (Mg/m ³)	WA (%)	PSV (%)
	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}								
Material											
Brita 4/12	2,62	2,59	2,61	Gc 90-15	FI ₁₅	SI ₁₅	LA ₂₀	MDE ₁₀	1,38	0,6	PSV ₅₀
NP EN 13043											
Requisitos/categoria	A declarar			A declarar	FI ₂₀	ND	LA ₂₀ *	MDE ₁₅	A declarar	≤1	PSV ₅₀

*Para rochas granitoides LA30

Quadro 4.2 – Características físicas do agregado de granulometria 0/4 mm granítico

Propriedade	Massa volúmica			Granulometria	MB _F (g/kg)	Baridade (Mg/m ³)	WA (%)
	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}				
Material							
Pó 0/4 granítico	2,65	2,62	2,63	GA ₈₀	MB _{F10}	1,61	0,4
NP EN 13043							
Requisitos/categoria	A declarar			A declarar	MB _F 10	A declarar	≤1

Quadro 4.3 – Características do fíler utilizado

Propriedade	Massa volúmica (Mg/m ³)	Vazios de fíler seco compacto – <i>Ridgen</i> (%)	Baridade (Mg/m ³)
Material			
Fíler	2,7	32	0,9
NP EN 13043			
Requisitos/categoria	≤0,2 Mg/m ³ do valor declarado	v 28/38	Entre 0,5 e 0,9 Mg/m ³ do valor declarado

Na Figura 4.2 é possível observar as diferentes frações de agregado usado na formulação e na Figura 4.3 estão representadas as respectivas curvas granulométricas.



Figura 4.2 – Agregados naturais utilizados (1ª tentativa)

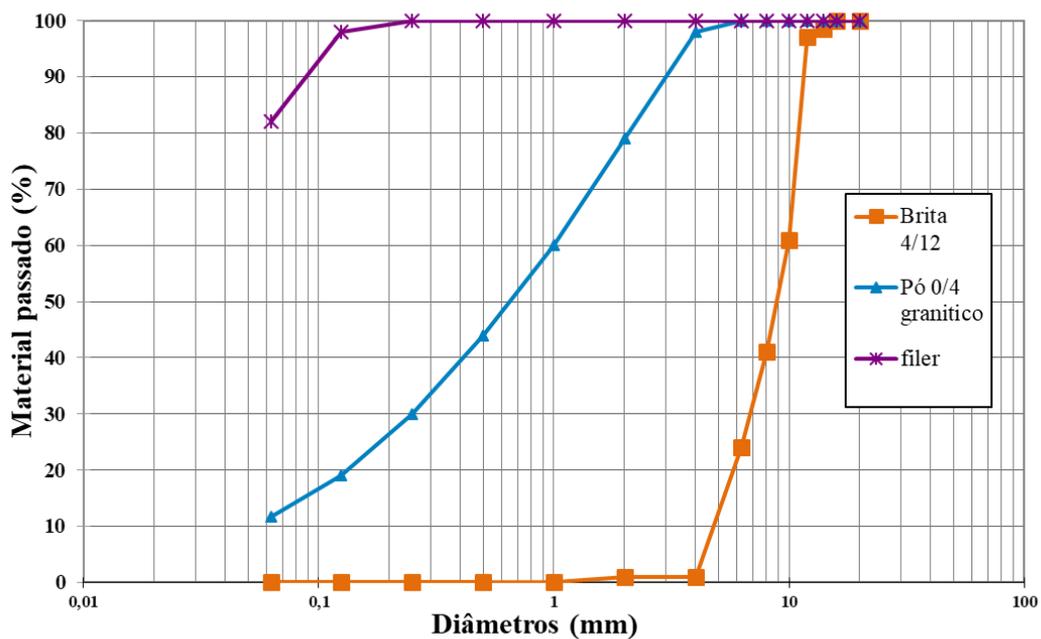


Figura 4.3 – Curvas granulométricas dos agregados (1ª tentativa)

A curva granulométrica da mistura a estudar é obtida através da junção dos diversos agregados, em quantidades diferentes, tendo como referência as indicações da norma EN 13108-5, para misturas betuminosas do tipo SMA. Segundo esta norma, a curva granulométrica da mistura, deverá cumprir os limites apresentados no Quadro 4.4. Os limites definidos pela norma EN 13108-5 para misturas SMA 12,5, são apresentados graficamente na Figura 4.4.

Quadro 4.4 – Limites do fuso granulométrico (adaptado EN13108-5:2006)

D	4	6 (6,3)	8	10	12 (12,5)	14	16	20
Peneiro (mm)	Passados no peneiro % em massa total							
1,4D ^a	100	100	100	100	100	100	100	100
D	95 a 100	95 a 100	95 a 100	95 a 100	95 a 100	95 a 100	95 a 100	95 a 100
2	25 a 45	20 a 40	20 a 40	20 a 35	20 a 35	15 a 30	15 a 30	15 a 30
0,063	5 a 14	5 a 14	5 a 14	5 a 13	5 a 13	5 a 12	5 a 12	5 a 12

^a Quando o valor calculado não é exato segundo a série ISO 565/R20 deve-se adotar o valor de peneiro mais próximo no conjunto.

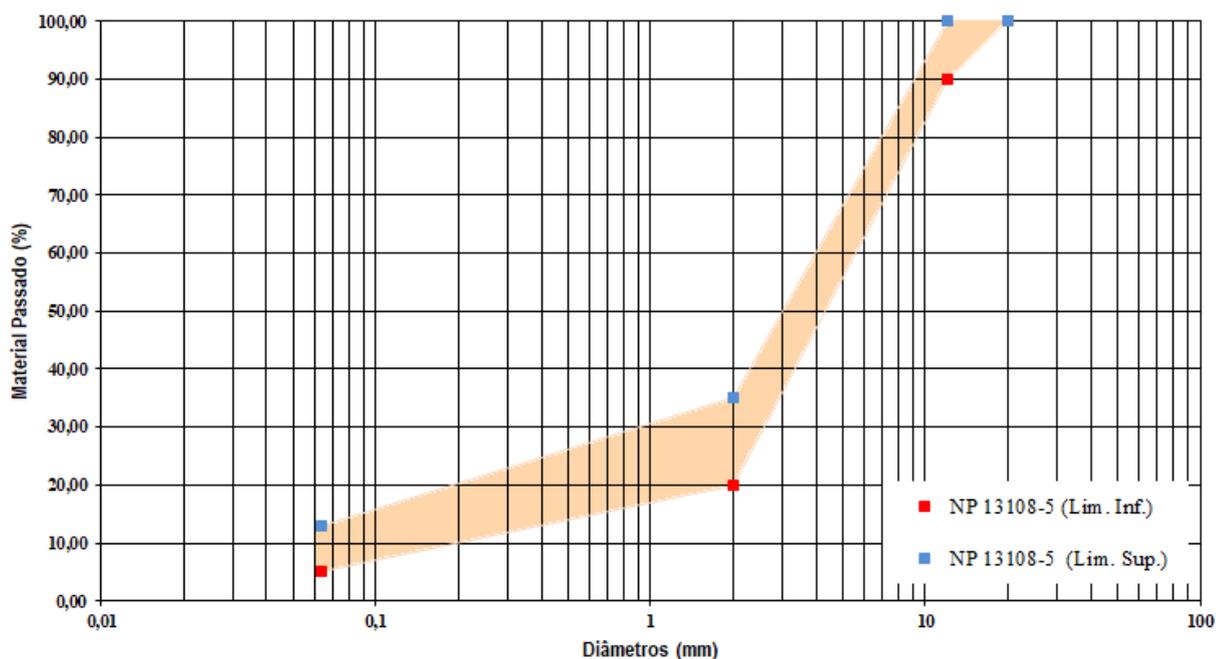


Figura 4.4 – Apresentação gráfica dos limites para SMA 12,5

Com o auxílio das curvas granulométricas dos materiais anteriormente apresentados foram determinadas as percentagens de cada uma das frações de agregado na mistura final, tendo como finalidade obter uma mistura de agregados cuja curva cumpra os pontos de controlo apresentados na Figura 4.4. É importante referir que este processo foi alvo de várias tentativas, seguidamente apresentas.

- **1ª Tentativa**

No Quadro 4.5 são apresentadas as percentagens de cada fração de agregado a utilizar na mistura final.

Quadro 4.5 – Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (1ª tentativa)

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/12	74
Pó 0/4 granítico	20
Fíler	6

Na Figura 4.5 encontra-se a curva granulométrica relativa à mistura indicada no Quadro 4.5 assim como os pontos de controlo referidos na norma EN 13108-5.

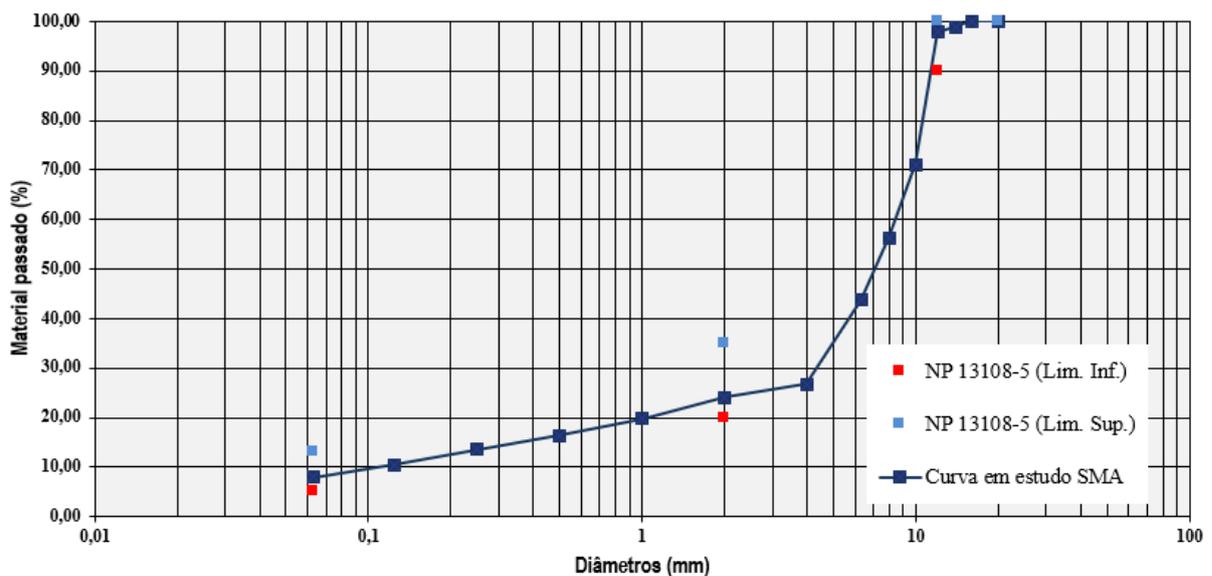


Figura 4.5 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (1ª tentativa)

Através da observação da Figura 4.5 verifica-se que a mistura de agregados cumpre os limites impostos pela norma EN 13108-5. Como o cumprimento dos limites granulométricos, apresentados pela norma europeia, não parece ser suficiente para se obter uma mistura do tipo SMA com a estrutura esperada, torna-se necessário comparar a curva da mistura com outras especificações utilizadas em outros países, nomeadamente nos EUA (Prowell et al, 2009), em Espanha (Proyecto SMA, 2014), na Alemanha (Drüschner et al, 2000) e na Suécia (EAPA,1998) (Figuras 4.6 a 4.10).

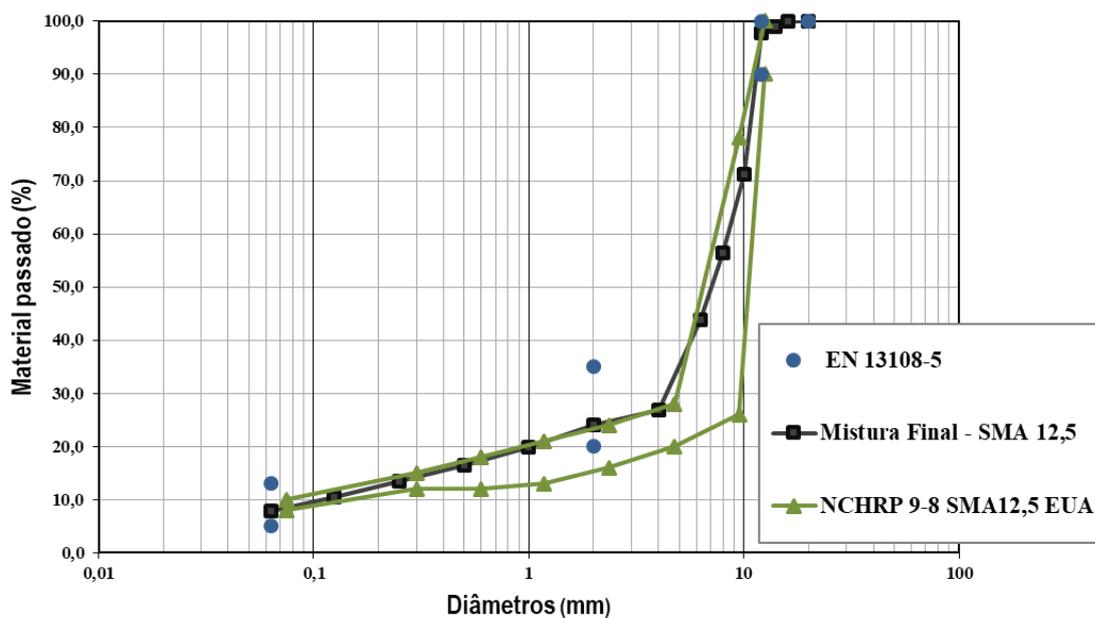


Figura 4.6 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos no projeto NCHRP 9-8 e na EN 13108-5 (1ª tentativa)

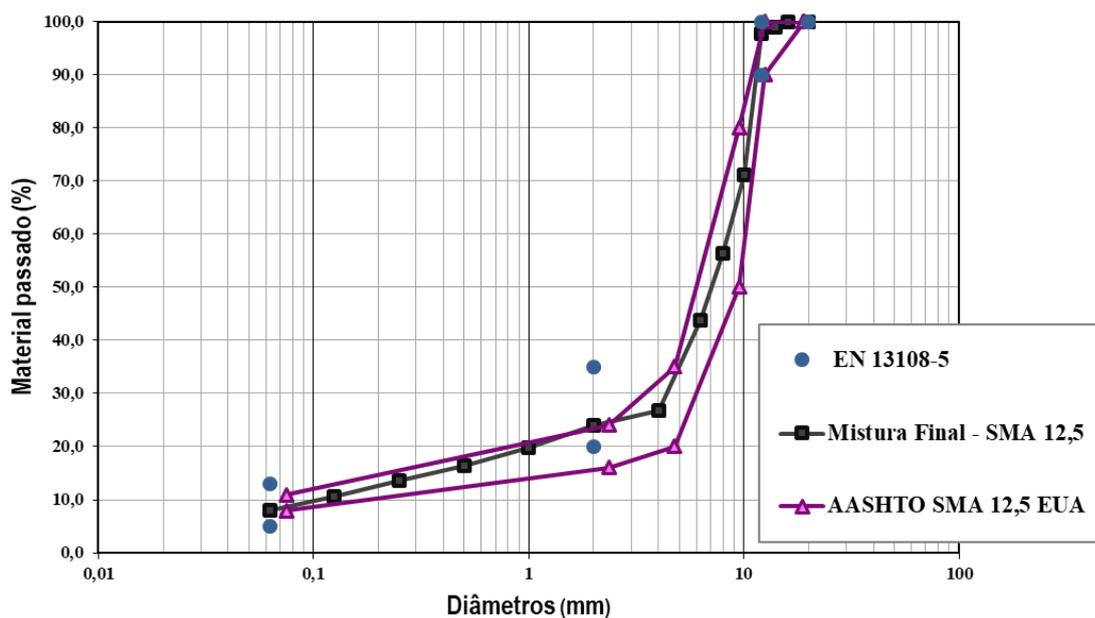


Figura 4.7 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos no projeto AASHTO e na EN 13108-5 (1ª tentativa)

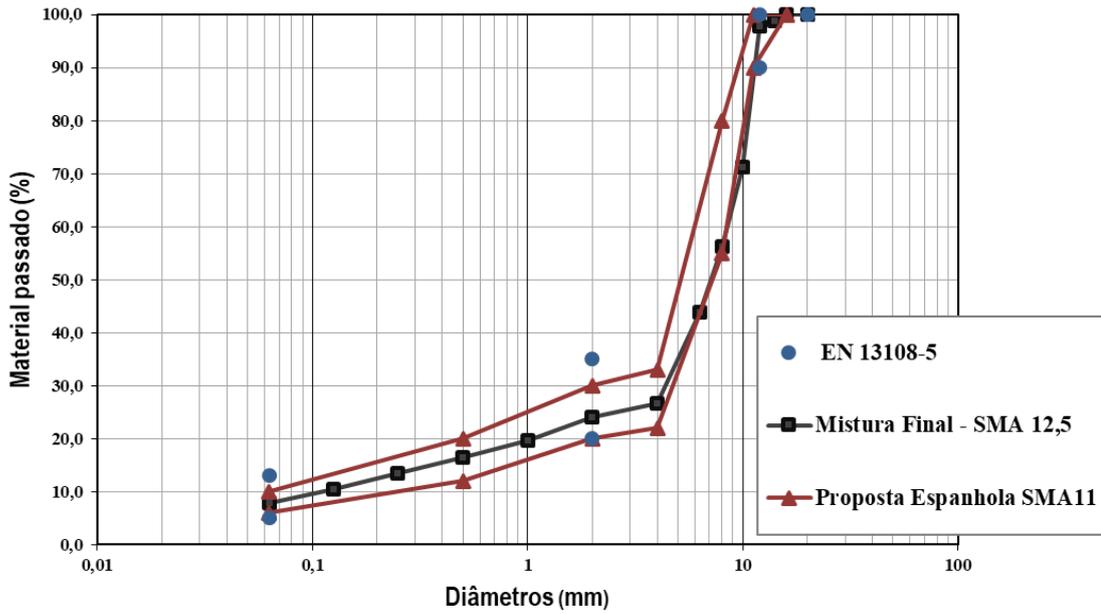


Figura 4.8 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos pelo projeto espanhol e na EN 13108-5 (1ª tentativa)

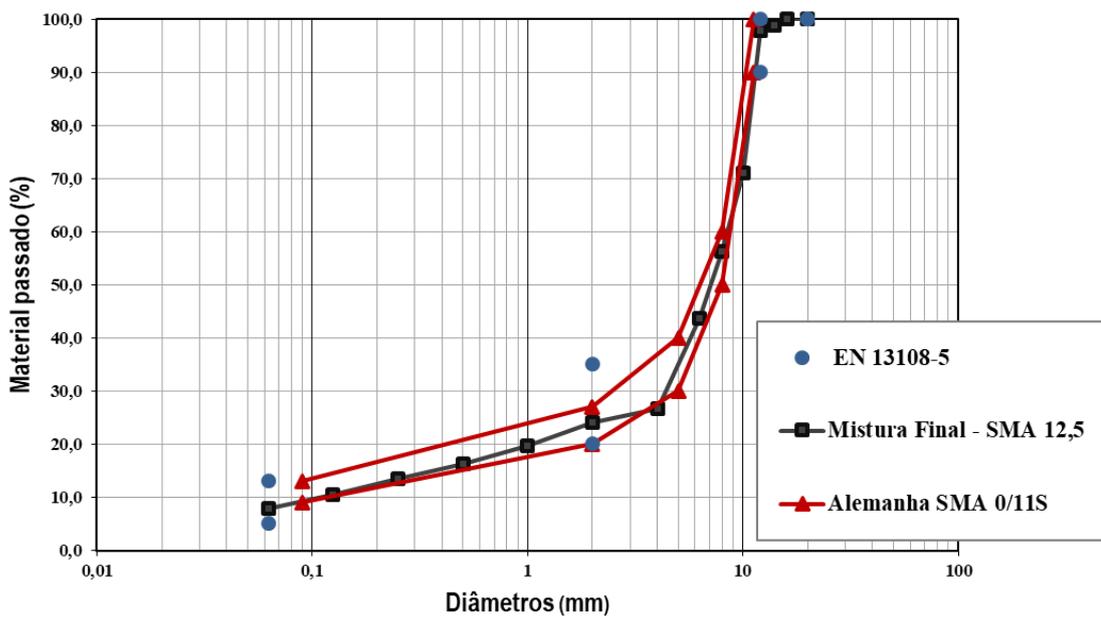


Figura 4.9 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Alemanha e na EN 13108-5 (1ª tentativa)

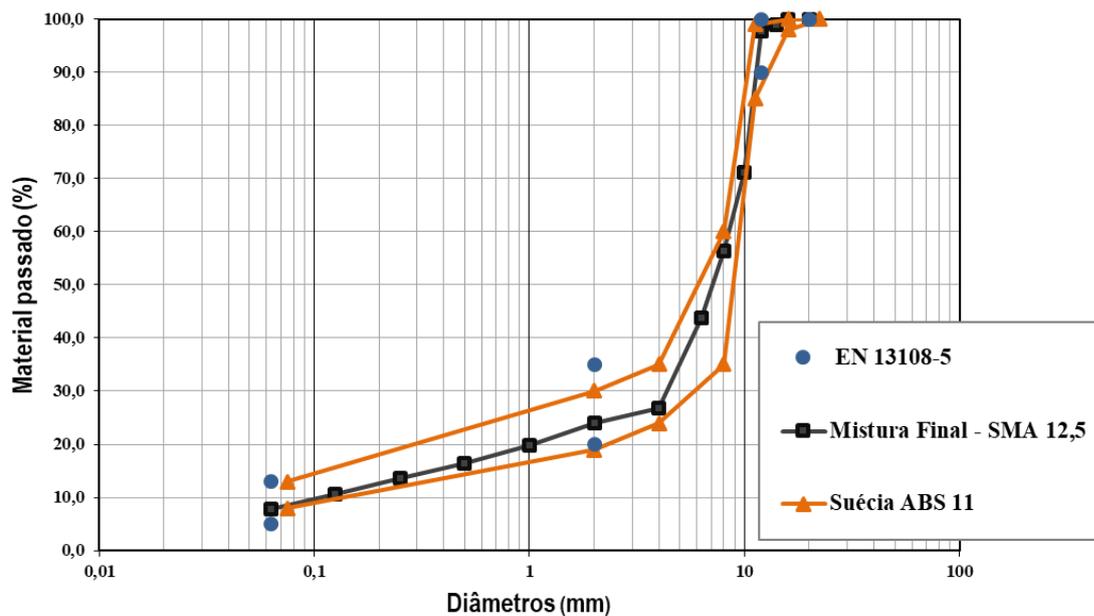


Figura 4.10 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (1ª tentativa)

Da análise dos gráficos acima expostos pode concluir-se, de um modo geral, que a principal diferença entre os diversos fusos granulométricos apresentados e os pontos de controlo definidos pela EN 13108-5 está relacionada com a percentagem de agregado que passa entre os peneiros 2 e 8 mm. A granulometria da mistura de agregados enquadra-se dentro dos fusos granulométricos definidos no projeto NCHRP 9-8 e nas especificações espanhola e sueca.

Com a mistura de agregados definida, o betume de refinaria, na percentagem de 6,5% e 7,0%, e as fibras celulósicas *Viatop Premium*, na percentagem de 0,4% da massa de betume, foi realizado o ensaio de escorrimento, tendo-se obtido o valor de 0,162% e 0,106%, respetivamente, inferior ao máximo admissível de 0,3%.

Foi também realizado o ensaio de anel e bola sobre os betumes. Para o betume de refinaria a temperatura de amolecimento obtida foi de 52,75°C e para o betume 35/50 foi de 51,2°C, pelo que cumprem o requisito para betumes da classe 35/50.

Além dos ensaios acima referidos foram também realizados quatro provetes, dois com 6,5% de betume e dois com 7,0% de betume para avaliar as baridades, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Baridade dos provetes selados (1ª tentativa)

Provete	Betume (%)	Massa do provete (g)			Temp. da água (°C)	Densidade da água (kg/m ³)	Densidade parafina (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)
		Pesado ao ar	Selado com parafina	Imerso em água após selagem				
2.1	6,5	1039,2	1086,3	568,4	18,8	998,54	942,7	2217
2.2	6,5	1135,6	1192,5	615,4	18,8	998,54	942,7	2194
3.1	7	984,6	1040,8	537,9	18,8	998,54	942,7	2217
3.2	7	1023,9	1076,7	548,4	18,8	998,54	942,7	2164

Foi ainda realizado o ensaio de compressão de Marshall, sendo os valores obtidos os apresentados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de Marshall

Provete	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)
2.1	8,06	5,337
2.2	9,35	4,228
3.1	6,08	3,857
3.2	4,07	5,733

De seguida foi realizado, sobre dois provetes, o ensaio para avaliar a baridade máxima teórica e respetiva porosidade, tendo sido registados os valores apresentados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Baridade máxima teórica e porosidade dos provetes (1ª tentativa)

Provete	Betume (%)	Volume do picnómetro (m ³)	Massa do picnómetro com tampa (g)	Massa do picnómetro com tampa e água (g)	Massa do picnómetro com tampa, água e amostra (g)	Densidade da água (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (kg/m ³)	Porosidade (%)
2.1	6,5	0,002260	1467,2	2478,2	4309,9	997,5	2388,3	7,2
3.2	7,0	0,002259	1467,3	2472,7	4304,6	997,9	2372,8	8,8

Analisando os valores obtidos, conclui-se que os valores da baridade são um pouco inferiores ao esperado (entre 2250 e 2300 kg/m³), a estabilidade e a deformação não se encontram dentro dos limites definidos para misturas tradicionais: estabilidade mínima de 8 kN e deformação de 2 a 4 mm (Antunes, 2014). Também os valores da porosidade são superiores ao valor desejado de 4%. De modo a verificar se a granulometria obtida era próxima da curva estabelecida, decidiu-se realizar a análise granulométrica da mistura (Apêndice II) (Figura 4.11).

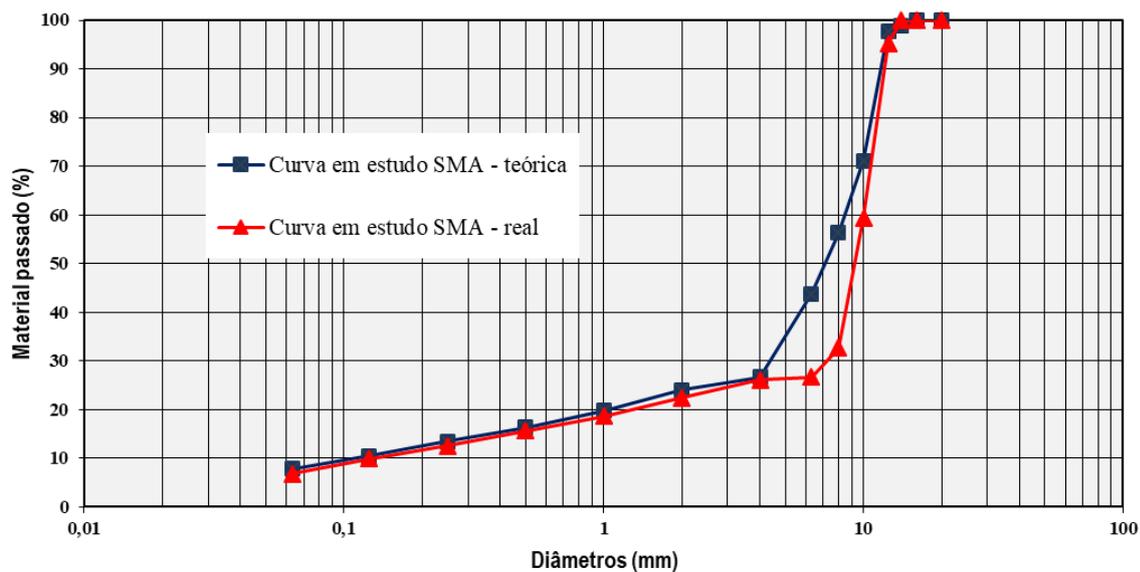


Figura 4.11 – Comparação entre a curva teórica da mistura e a curva resultante da análise granulométrica (1ª tentativa)

Após observação do gráfico anterior verificou-se que existia uma grande diferença entre as duas curvas, principalmente na percentagem de grossos, pelo que se efetuou a análise granulométrica da fração de agregado 4/12 (Apêndice II) e procedeu-se a uma nova formulação.

• 2ª Tentativa

Na Figura 4.12 estão representadas graficamente as curvas dos agregados, sendo a curva da fração 4/12 determinada através da análise granulométrica.

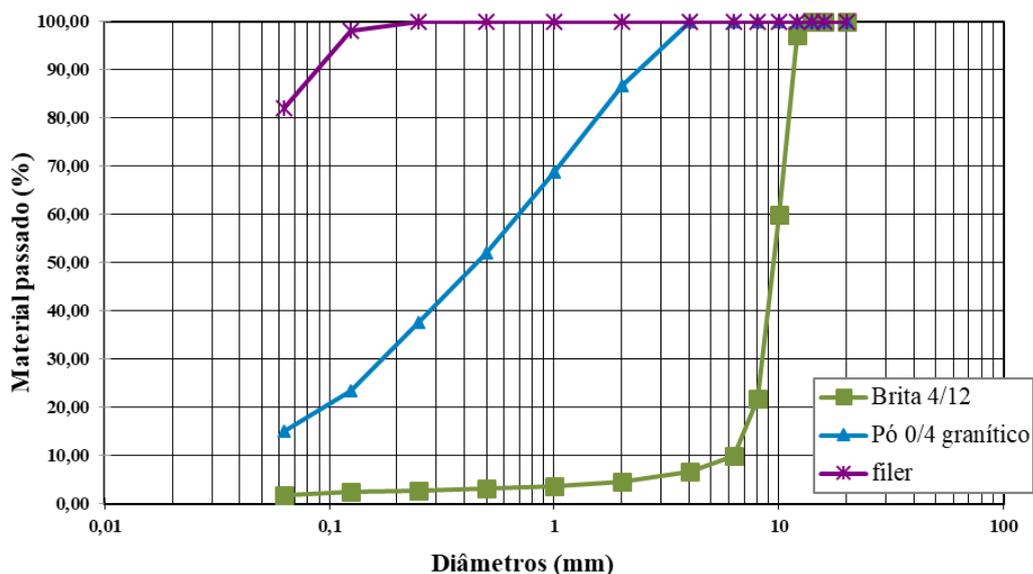


Figura 4.12 – Curvas granulométricas dos agregados (2ª tentativa)

No Quadro 4.9 são apresentadas as percentagens de cada fração de agregado a utilizar.

Quadro 4.9 – Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (2ª tentativa)

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/12	71
Pó 0/4 granítico	25
Fíler	4

A curva granulométrica da respetiva mistura, assim como os pontos de controlo referidos na norma EN 13108-5, encontram-se representados na Figura 4.13.

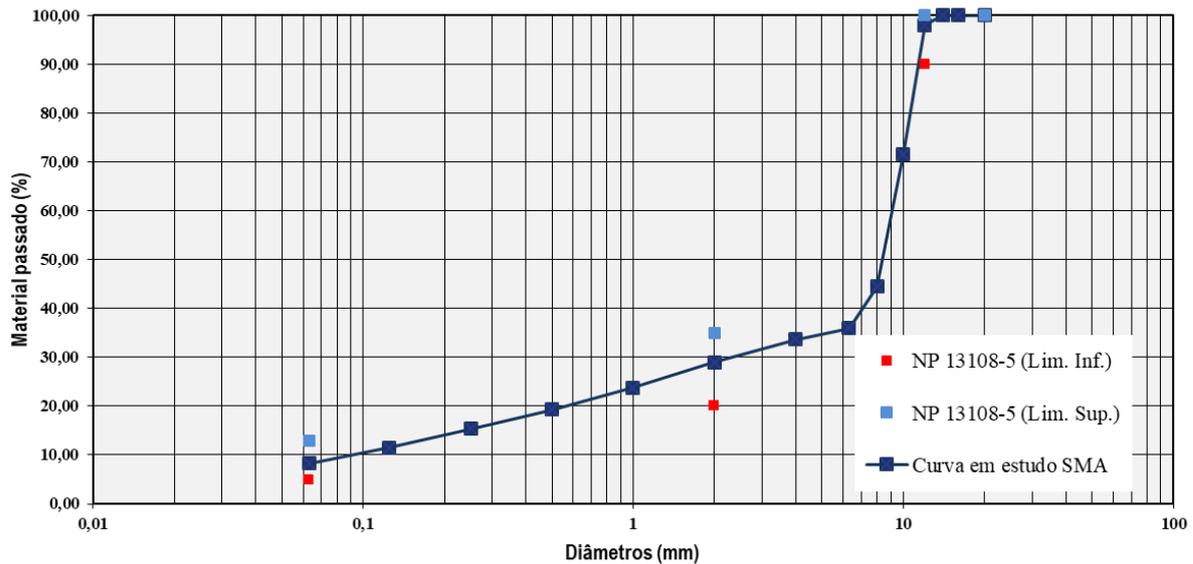


Figura 4.13 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (2ª tentativa)

Através da observação da Figura 4.13 verifica-se que a mistura de agregados cumpre os limites impostos pela norma EN 13108-5. Como já realizado na tentativa anterior, ajustou-se a curva aos diversos fusos, sendo representado na Figura 4.14 o melhor ajuste.

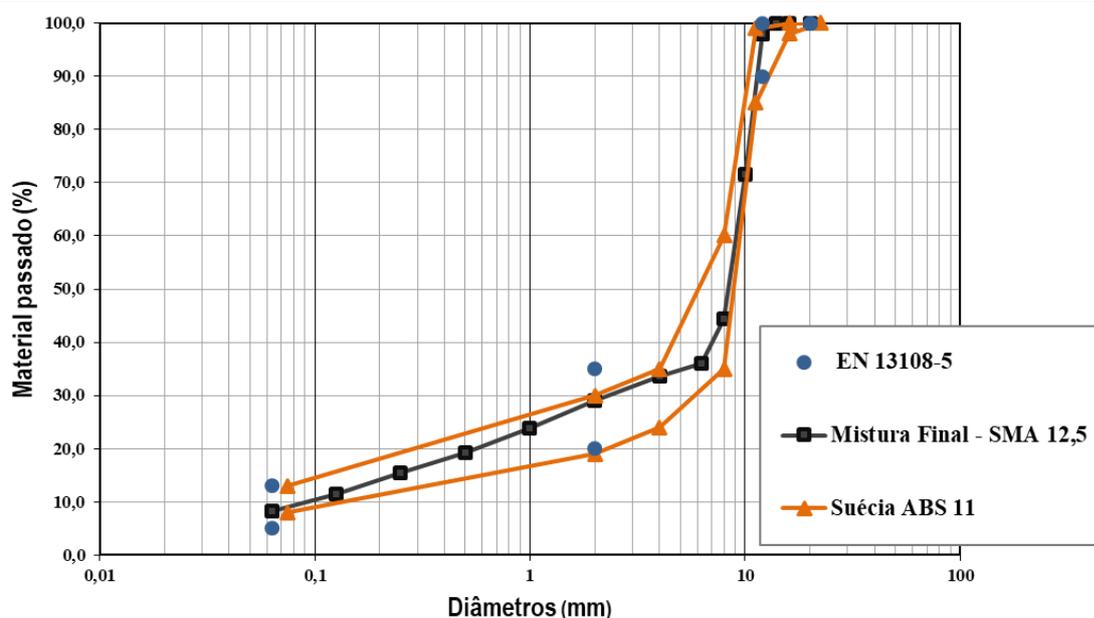


Figura 4.14 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (2ª tentativa)

Com a mistura de agregados definida, o betume de refinaria, na percentagem de 6,5% e as fibras celulósicas *Viatop Premium*, na percentagem de 0,4% da massa de betume, foi realizado um provete e foram analisados os valores da baridade, baridade máxima teórica e respetiva porosidade (Quadros 4.10 e 4.11).

Quadro 4.10 – Baridade dos provetes selados (2ª tentativa)

Betume (%)	Massa do provete (g)			Temp. da água (°C)	Densidade da água (kg/m³)	Densidade parafina (kg/m³)	Baridade (kg/m³)
	Pesado ao ar	Selado com parafina	Imerso em água após selagem				
6,5	1168	1205,2	642,2	17,5	998,75	975,63	2222

Quadro 4.11 – Baridade máxima teórica e porosidade (2ª tentativa)

Betume (%)	Volume do picnómetro (m³)	Massa do picnómetro com tampa (g)	Massa do picnómetro com tampa e água (g)	Massa do picnómetro com tampa, água e amostra (g)	Densidade da água (kg/m³)	Baridade máxima teórica (kg/m³)	Porosidade (%)
6,5	0,002259	1467,1	2585,5	4375,3	998,2	2400,5	7,4

Através da análise dos quadros anteriores conclui-se que o valor da baridade continua inferior ao esperado e a porosidade superior, pelo que se tomou a decisão de efetuar a análise granulométrica da fração de agregado 0/4 (Apêndice II) e efetuar nova formulação.

- **3ª Tentativa**

A representação gráfica da curva resultante da análise granulométrica efetuada sobre o pó 0/4, encontra-se ilustrada na Figura 4.15.

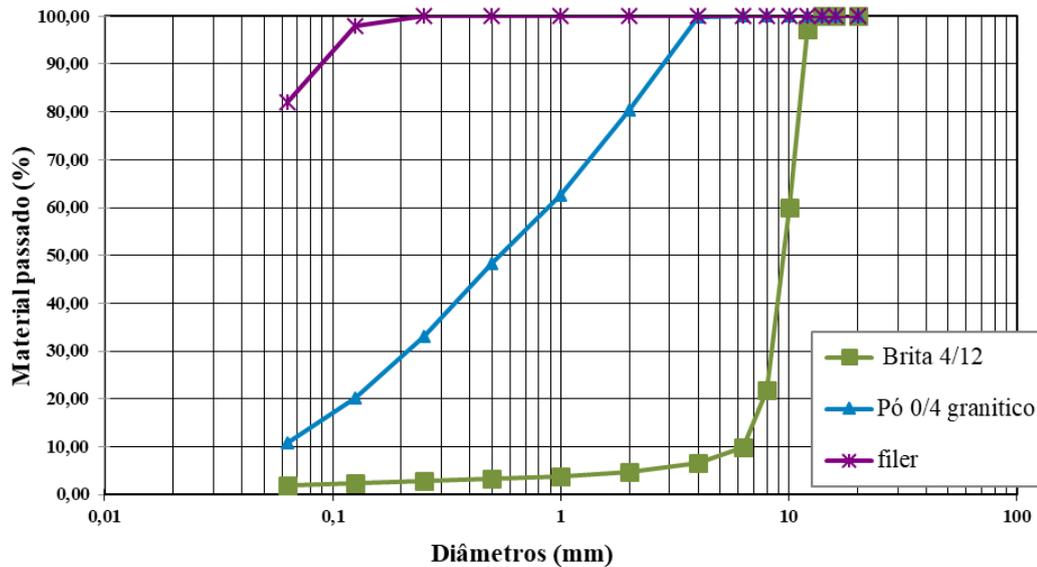


Figura 4.15 – Curvas granulométricas dos agregados (3ª tentativa)

No Quadro 4.12 encontram-se as percentagens de cada fração na mistura de agregados.

Quadro 4.12 – Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (3ª tentativa)

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/12	77
Pó 0/4 granítico	19
Fíler	4

A curva granulométrica da respetiva mistura, assim como os pontos de controlo referidos na norma EN 13108-5, encontram-se representados na Figura 4.16.

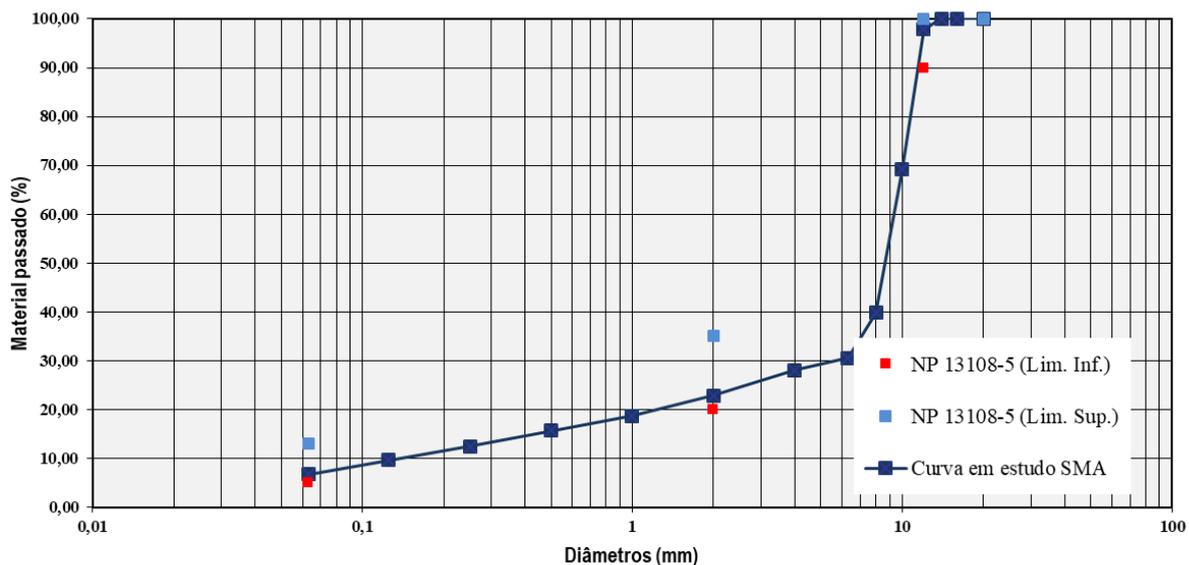


Figura 4.16 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (3ª tentativa)

Através da observação da Figura 4.16 verifica-se que a mistura de agregados cumpre os limites impostos pela norma EN 13108-5. Como já realizado nas tentativas anteriores, ajustou-se a curva aos diversos fusos, na Figura 4.17 encontra-se representado o melhor ajuste.

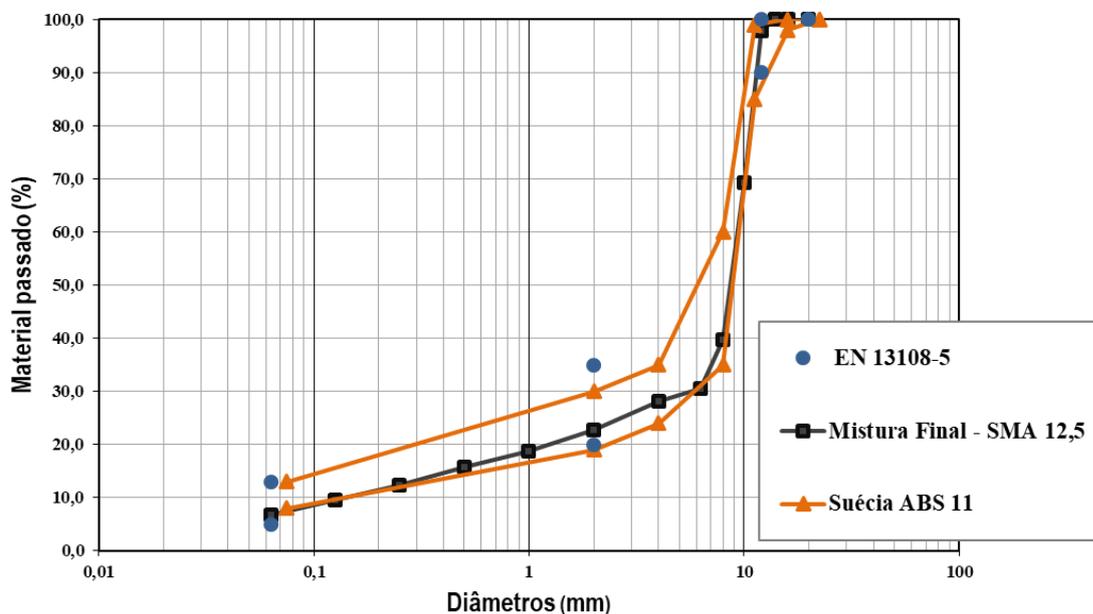


Figura 4.17 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (3ª tentativa)

Com a mistura de agregados definida, o betume de refinaria, na percentagem de 7,0% e as fibras celulósicas *Viatop Premium*, na percentagem de 0,4% da massa de betume, foi realizado um provete, posteriormente selado, e analisada a sua baridade (Quadro 4.13).

Quadro 4.13 – Baridade dos provetes selados (3ª tentativa)

Betume (%)	Massa do provete (g)			Temp. da água (°C)	Densidade da água (kg/m ³)	Densidade parafina (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)
	Pesado ao ar	Selado com parafina	Imerso em água após selagem				
7	1137	1215,1	601	17,5	998,50	975,63	2125

O valor da baridade é muito inferior ao esperado. Foi necessário proceder à substituição do pó 0/4 granítico utilizado, por pó 0/4 calcário, devido à escassez do primeiro e não havendo possibilidade de obter mais com características idênticas, sendo por isso necessário realizar uma nova formulação da mistura a estudar.

- **4ª Tentativa**

As características físicas mais relevantes do pó 0/4 calcário foram recolhidas das fichas técnicas do produto, e encontram-se resumidas no Quadro 4.14, onde se encontra também indicados os requisitos, de acordo com a NP EN 13043. As diferentes frações de agregado usado e as suas curvas granulométricas podem ser observadas nas Figuras 4.18 e 4.19, respetivamente. No Quadro 4.15 são apresentadas as percentagens de cada fração na mistura.

Quadro 4.14 – Características físicas do agregado de granulometria 0/4 mm calcário

Propriedade	Massa volúmica			Granulometria	MB _F (g/kg)	WA (%)
	ρ _a	ρ _{rd}	ρ _{ssd}			
Material						
Pó 0/4 calcário	2,65	2,61	2,63	GA ₈₅	MB _F 10	0,6
NP EN 13043						
Requisitos/categoria	A declarar			A declarar	MB _F 10	≤1



Fíler

Pó 0/4 calcário

Brita 4/12

Figura 4.18 – Agregados naturais (4ª tentativa)

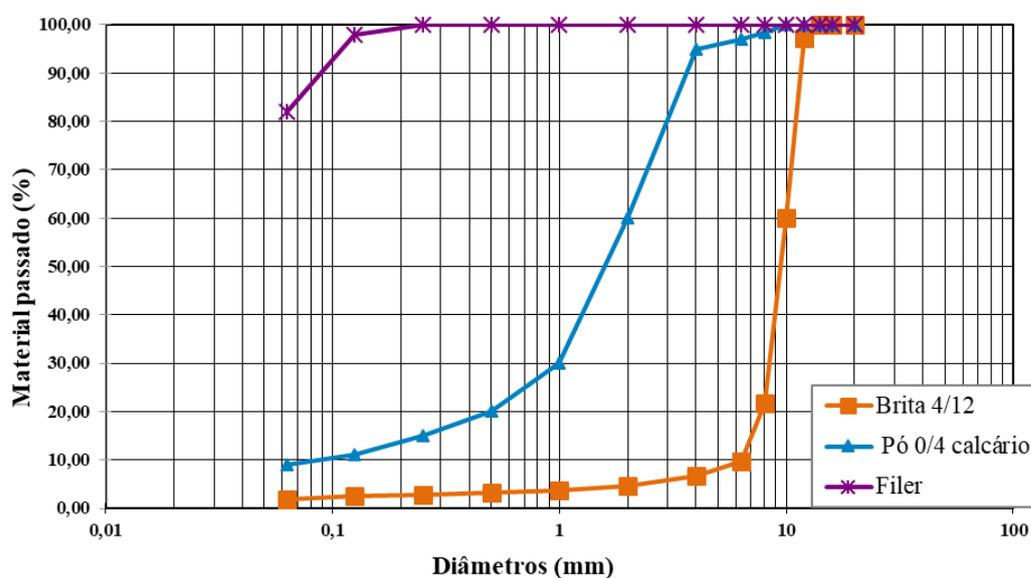


Figura 4.19 – Curvas granulométricas dos agregados (4ª tentativa)

Quadro 4.15 – Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (4ª tentativa)

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/12	76
Pó 0/4 calcário	14
Fíler	10

A curva granulométrica da mistura de agregados encontra-se na Figura 4.20.

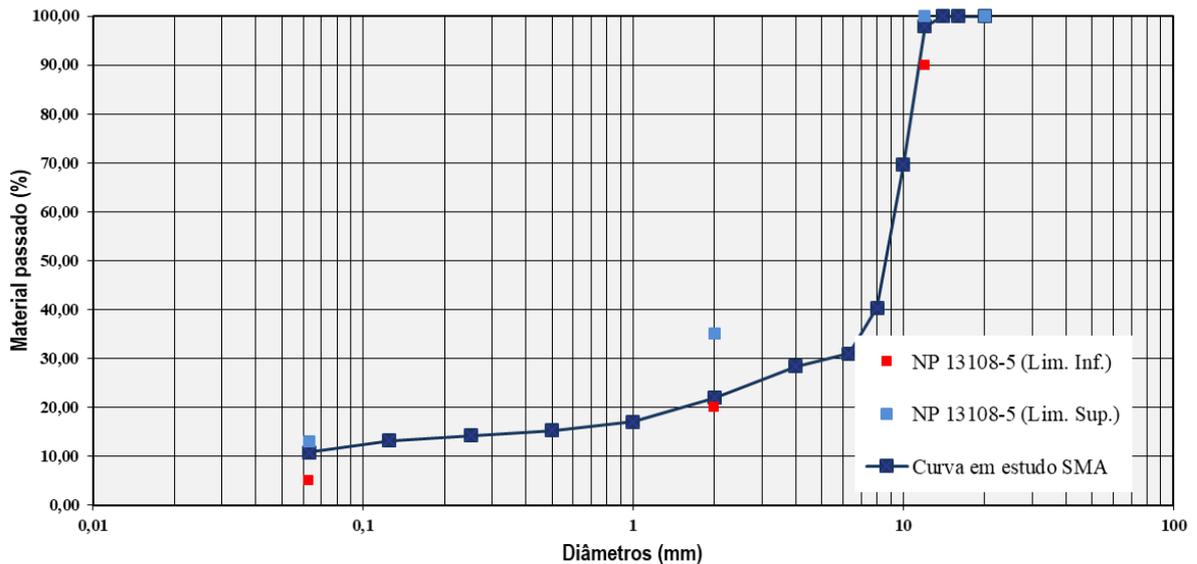


Figura 4.20 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (4ª tentativa)

Através da observação da Figura 4.20 verifica-se que a mistura de agregados cumpre os limites impostos pela norma EN 13108-5. Como já realizado nas tentativas anteriores, ajustou-se a curva aos diversos fusos, na Figura 4.21 encontra-se representado o melhor ajuste.

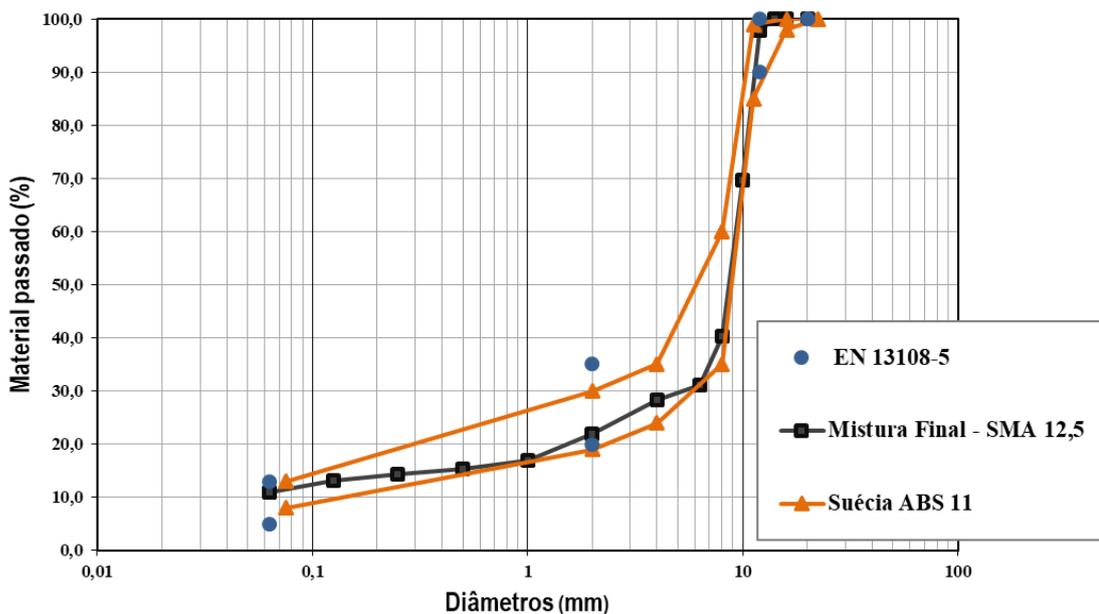


Figura 4.21 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (4ª tentativa)

Com a mistura de agregados definida, o betume de refinaria, na percentagem de 6,5% e as fibras celulósicas *Viatop Premium*, na percentagem de 0,4% da massa de betume, foram moldados

dois provetes, mas não foi possível realizar ensaios uma vez que os provetes se desagregaram no processo de moldagem (Figura 4.22).



Figura 4.22 – Aspeto do provete após a compactação

Decidiu-se repartir o pó 0/4 em duas frações, 0/2 e 2/4 (Apêndice II), de modo a garantir a quantidade de finos necessária à mistura. Realizou-se uma nova formulação da mistura.

- **5ª Tentativa**

As curvas granulométricas dos agregados encontram-se representadas na Figura 4.23. No Quadro 4.16 são apresentadas as percentagens de cada fração na mistura final, sendo a curva granulométrica desta apresentada na Figura 4.24.

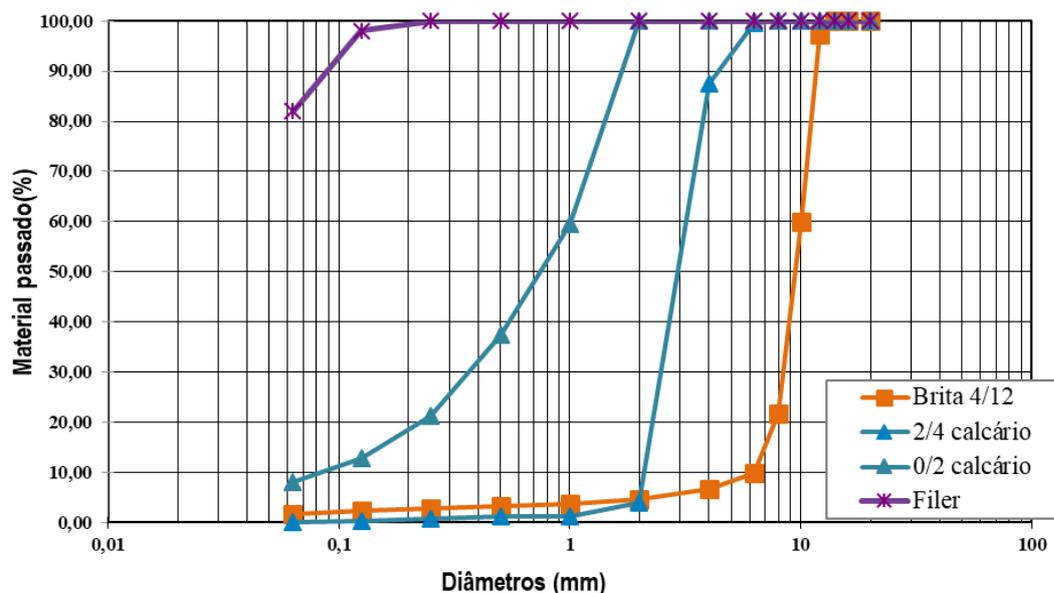


Figura 4.23 – Curvas granulométricas dos agregados (5ª tentativa)

Quadro 4.16 - Percentagem de cada fração de agregado presente na mistura final (5ª tentativa)

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/12	76
2/4 calcário	6
0/2 calcário	9
Fíler	9

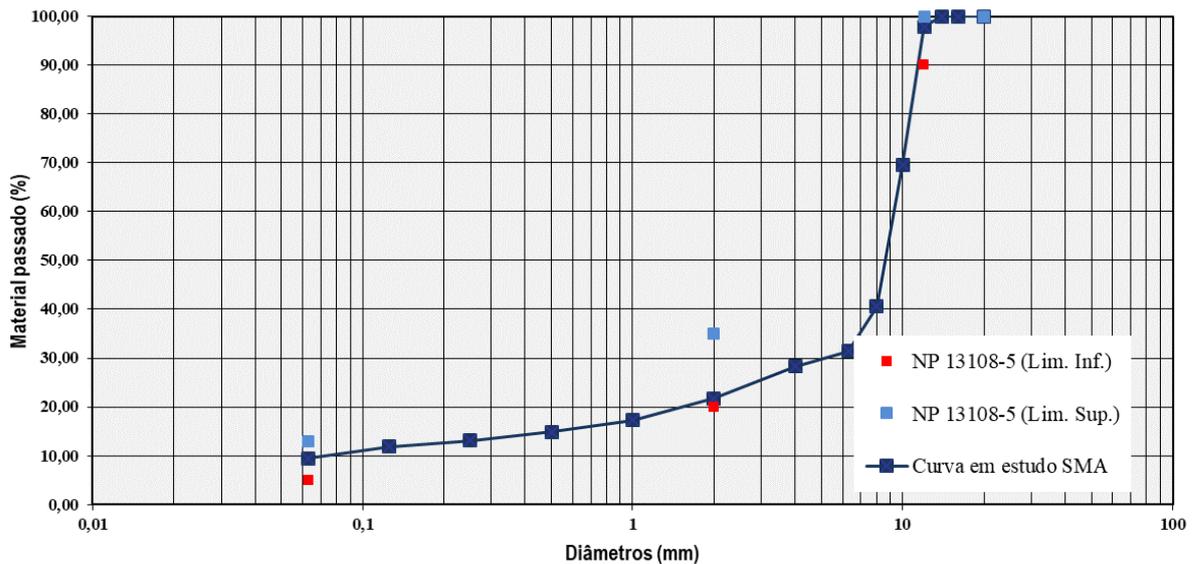


Figura 4.24 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5 (5ª tentativa)

Através da observação da Figura 4.24 verifica-se que a mistura de agregados cumpre os limites impostos pela norma EN 13108-5. À semelhança do que foi feito nas tentativas anteriores, ajustou-se a curva aos diversos fusos. Na Figura 4.25 encontra-se representado o melhor ajuste.

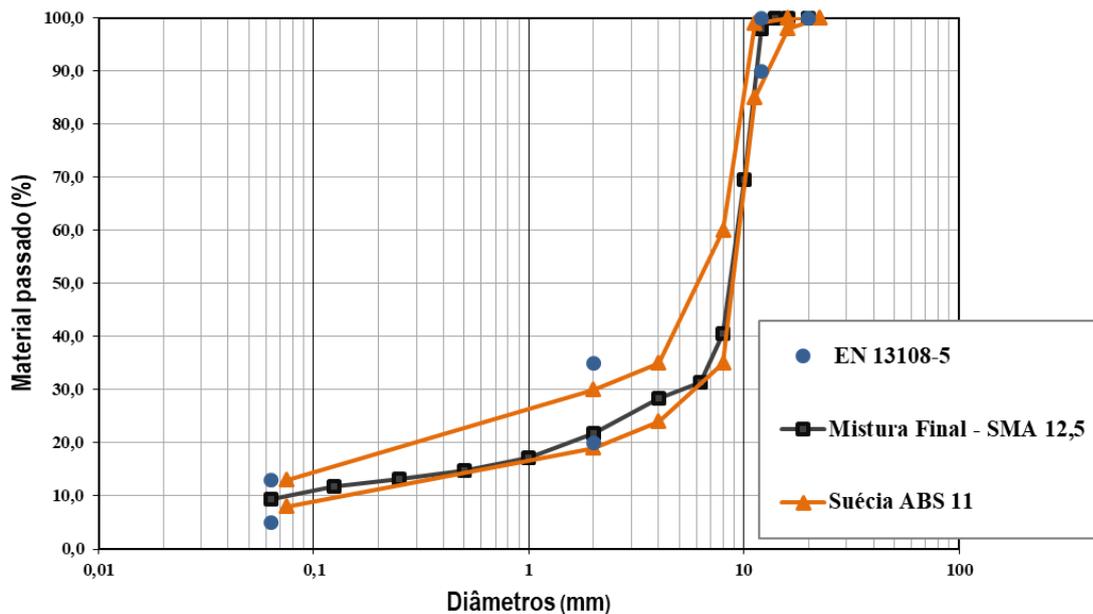


Figura 4.25 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Suécia e na EN 13108-5 (5ª tentativa)

Com a mistura de agregados definida, o betume de refinaria, nas percentagens de 6,0% e 6,5%, e as fibras celulósicas *Viatop Premium*, na percentagem de 0,4% da massa de betume, foram realizados dois provetes, um para cada percentagem de betume.

Como os valores das baridades SSD e das baridades dos provetes selados são muito próximos, e uma vez que a baridade SSD pode ser utilizada em SMA (Gardete, 2016), optou-se por estudar a baridade SSD.

Analisando os valores de baridade máxima teórica, para provetes de 6,5% de betume, calculados anteriormente, obteve-se um valor médio de 2394 kg/m³, o que é muito próximo do valor calculado pelo método matemático, 2393 kg/m³, pelo que se decidiu usar os valores de baridade máxima teórica calculados através do método matemático.

Para os provetes realizados foi analisada a baridade SSD e a respetiva porosidade, apresentando-se os resultados no Quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Baridade SSD e porosidade (5ª tentativa)

Betume (%)	Massa do provete (g)			Temp. da água (°C)	Densidade da água (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (kg/m ³)	Porosidade (%)
	Pesado ao ar	Imerso	Saturado com a superfície seca					
6,0	1119,2	630,1	1126,7	21,6	997,92	2249	2410	6,7
6,5	1112,4	641,4	1123,6	21,6	997,92	2302	2393	3,8

Os valores encontram-se dentro do esperado, mas ainda houve alguma desagregação dos provetes.

Decidiu-se fabricar dois provetes, um com betume de refinaria e fibras celulósicas *Viatop Premium* e outro com betume 35/50 e fibras celulósicas *Viatop CT40*, ambos com 6,5% de betume e 0,4% da massa de betume em fibras. O provete com betume de refinaria continuou a apresentar desagregação, o que indicava a possibilidade de existir algum problema com o betume. Tratando-se de um betume aditivado em refinaria, uma explicação possível seria a quantidade de aditivo usada que poderia ser superior à necessária e a temperatura de compactação teria de ser ainda mais reduzida. Tentou-se comprovar esta hipótese através de processo tentativa e erro, produzindo provetes de 5,5% de betume de refinaria e fibras *Viatop Premium*, na percentagem de 0,5% da massa de betume, baixando a temperatura de compactação. Chegou-se à conclusão de que para temperaturas de compactação da ordem dos 95°C os provetes não apresentam desagregação. Uma vez que temperaturas desta ordem de grandeza correspondem a misturas semitemperadas e as condições de compacidade da mistura não eram adequadas, decidiu-se alterar o modo operativo, deixando a base do molde a suportar o material do provete por forma a evitar a desagregação deste até ao arrefecimento.

A mistura de agregados anteriormente apresentada foi a escolhida para prosseguir com o trabalho, pois dos valores de baridade e porosidade recolhidos, esta mistura é a que apresenta melhores resultados.

4.3 Caracterização da mistura em estudo

Depois de decidida a composição da mistura de agregados procedeu-se ao estudo das características volumétricas e mecânicas das SMA produzidas.

- SMA-BN

Com a mistura de agregados definida, o betume 35/50 e as fibras celulósicas *Viatop CT 40*[®], na percentagem de 0,3% da massa de betume, foram produzidas séries de quatro provetes para cada percentagem de betume, 5,5%, 6,0% e 6,5%, e foram determinadas as propriedades volumétricas já referidas anteriormente, nomeadamente a baridade SSD, baridade máxima teórica calculada pelo método matemático, porosidade, VMA, VFB, e as características mecânicas como a estabilidade e deformação de Marshall, a sensibilidade à água e resistência à deformação permanente. Os resultados obtidos encontram-se integralmente no Apêndice III.

No Quadro 4.18 e na Figura 4.26 são apresentados os valores médios, para cada percentagem de betume, das propriedades volumétricas. Na Figura 4.27 encontram-se representados graficamente os valores de estabilidade e deformação retirados do ensaio de compressão de Marshall.

Quadro 4.18 – Propriedades volumétricas SMA-BN (valores médios)

Betume (%)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (kg/m ³)	Porosidade (%)	VMA (%)	VFB (%)
5,5	2250	2420	7,0	19,20	63,47
6,0	2264	2402	5,7	19,11	70,04
6,5	2218	2385	7,0	21,21	66,89

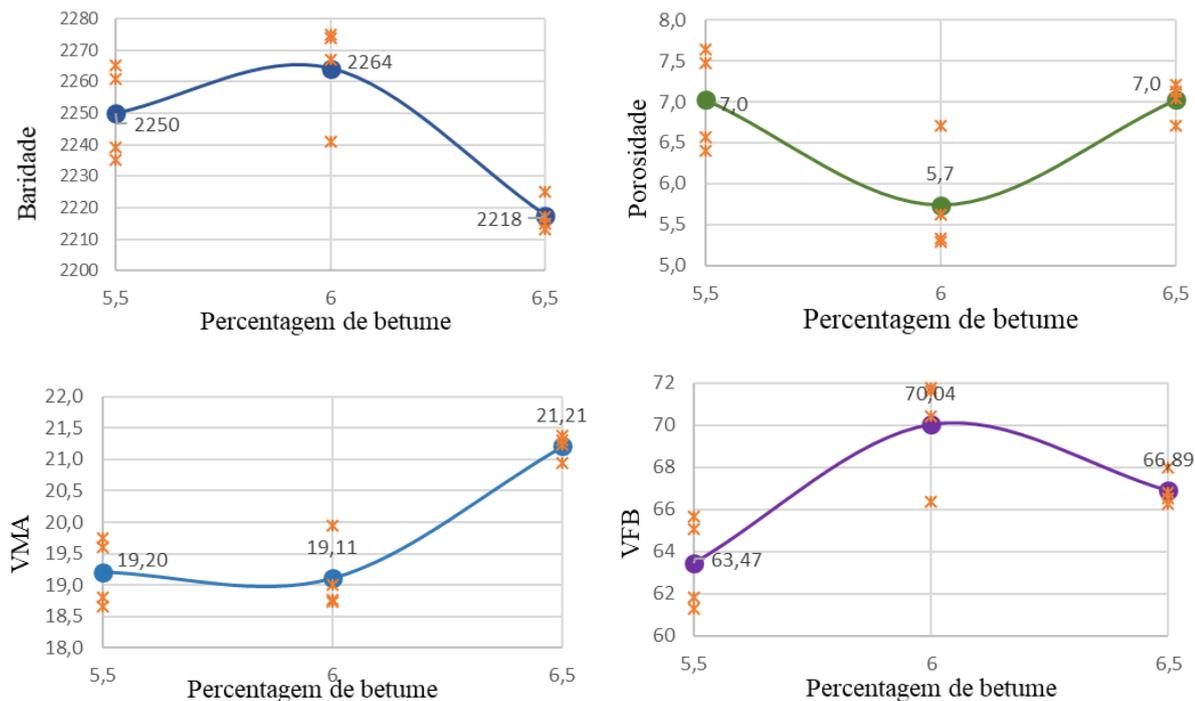


Figura 4.26 – Representação gráfica das propriedades volumétricas da mistura em função da percentagem de betume (SMA-BN)

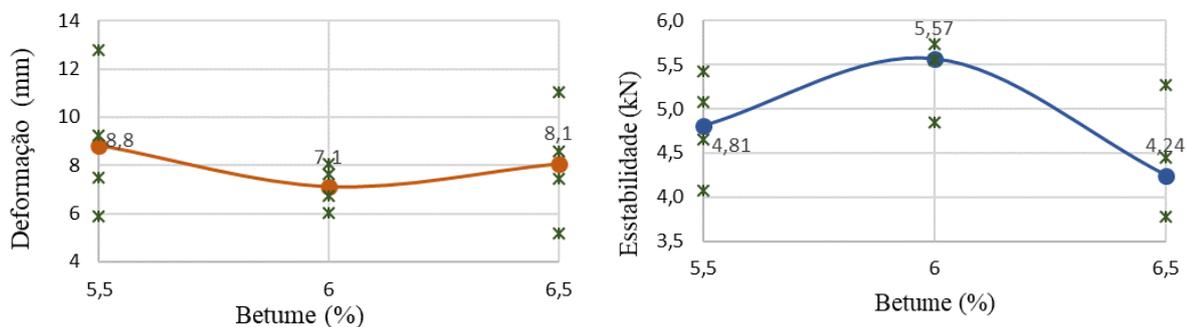


Figura 4.27 – Resultados dos ensaios de compressão de Marshall (SMA_BN)

Analisando os valores acima expostos, principalmente a porosidade, pode-se concluir que os melhores valores são os obtidos para a percentagem de betume de 6,0%, pelo que esta foi considerada como percentagem ótima.

No Quadro 4.19 apresenta-se a comparação de algumas características da mistura, para a percentagem ótima de betume, com os valores definidos em algumas especificações de referência, nomeadamente, a ZTV-Asphalt StB 2001 (Drüschner et al, 2000), a AASHTO MP8 (Prowell et al, 2009) , a DER-ST ET-DE-P00/0031 (DER-ST, 2007), o Proyecto SMA (Proyecto SMA, 2014). Da sua observação, conclui-se que as propriedades volumétricas da mistura formulada respeitam a maioria dos valores definidos nas especificações referidas.

Quadro 4.19 – Comparação das propriedades volumétricas obtidas com os valores definidos nas especificações (SMA-BN)

Especificação Propriedade	Limites para SMA 0/11S definidos na ZTV - Asphalt StB 2001	Limites definidos na AASHTO MP8	Limites definidos na DER-ST ET-DE-P00/0031	Limites definidos no Proyecto SMA 11 2014	Valores obtidos para a mistura em estudo
Percentagem de betume (%)	≥ 6,5	≥ 6,0	---	≥ 5,8	6,0
Percentagem de aditivo (%)	0,3 - 1,5	≥0,3**	0,3 - 1,5 ****	0,3 - 1,0	0,3
Porosidade * (%)	3,0 - 4,0	4,0***	4,0	4,0 - 6,0	5,7
VMA (%)	---	≥ 17	≥ 17	≥ 17	19,11
VFB (%)	---	---	---	≤ 83	70,09
Drenagem máxima (%)	---	0,3	0,3	0,3	0,24

* Em provetes Marshall compactados com 50 pancadas/face

** No caso de fibras minerais é recomendado um mínimo de 0,4%

*** Em estradas com tráfego leve pode utilizar-se 3%

**** O aditivo são fibras celulósicas

De seguida foi realizado o ensaio de sensibilidade à água. Para tal foram produzidos seis provetes com 6,0 % de betume 35/50 e fibras *Viatop CT 40*[®], na percentagem de 0,3% da massa de betume. De acordo com os resultados obtidos o parâmetro ITSR foi de 70%. No Quadro 4.20 apresentam-se as categorias de valores de ITSR definidas na norma EN 13108-5, segundo o qual o ensaio de sensibilidade à água cumpre o limite mínimo para a categoria ITSR₇₀.

Quadro 4.20 – Categorias de valores de ITSR relativas ao ensaio de sensibilidade à água (EN 13108-5)

Limites Mínimos de ITSR (%)	Categoria ITSR
90	ITSR ₉₀
80	ITSR ₈₀
70	ITSR ₇₀
60	ITSR ₆₀
Sem requisitos	ITSR _{NR}

Foram, ainda, fabricados em laboratório quatro provetes para realização do ensaio de resistência à deformação permanente, apresentando-se os resultados na Figura 4.28 e no Quadro 4.21. Alguns provetes, nomeadamente o B1 e o B2, não completaram os 3600 ciclos de carga pois atingiram os 40 000 microns de deformação antes do final do ensaio.

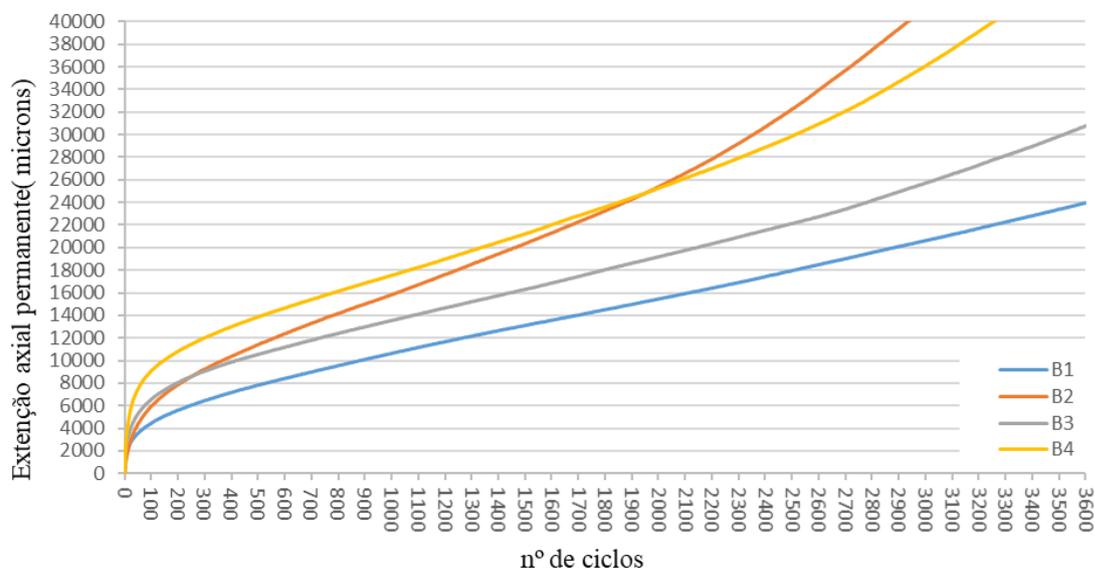


Figura 4.28 – Curvas de deformação axial permanente para cada provete ensaiado (SMA-BN)

Quadro 4.21 – Resultados do ensaio de deformação permanente para a mistura SMA-BN

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
B1	7,8	7,3	1,460	2,067	2,386	3,370	5,247	7,330
B2	7,9		2,440		4,007		9,323	
B3	6,9		1,863		3,079		7,064	
B4	6,7		2,504		4,007		7,687	

Através da análise dos resultados anteriores é possível verificar que a mistura em estudo apresenta fraco comportamento à deformação permanente. Este facto poderá estar relacionado com o esqueleto da mistura, ou seja, o arranjo das partículas de agregado não confere o atrito interno necessário para que haja uma dispersão adequada das cargas sem deformação permanente, como ilustrado na Figura 4.29. Outro motivo que poderá originar os valores apresentados é a falta de adesividade entre o betume e as partículas do agregado, ou seja, a película de betume que se forma em redor dos agregados tem pouca aderência e consequentemente existe falta de coesão na mistura (Figura 4.30).



Figura 4.29 – Distribuição da carga pelo esqueleto (Martinho et al, 2013)

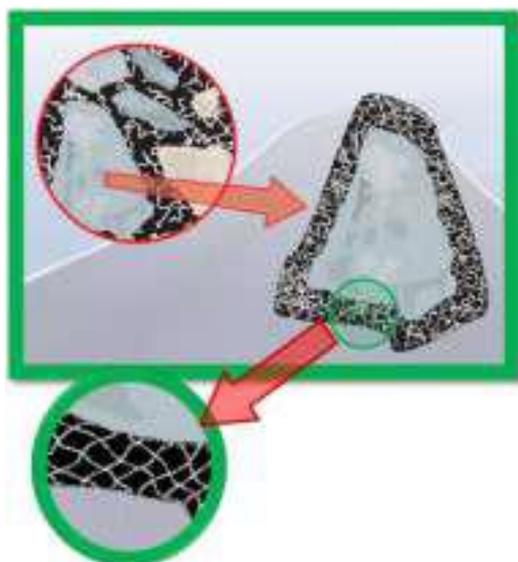


Figura 4.30 – Película de betume em redor dos agregados (Martinho et al, 2013)

- SMA-BR

Como já referido foi realizada a análise da mistura betuminosa com uso de betume de refinaria, sabendo que os resultados obtidos não iriam ser os pretendidos.

Com a mistura de agregados definida, o betume de refinaria e as fibras celulósicas *Viatop Premium*, na percentagem de 0,4% da massa de betume, foram produzidas séries de quatro provetes para cada percentagem de betume, 5,5%, 6,0% e 6,5%, e foram determinadas as propriedades volumétricas já referidas anteriormente, nomeadamente a baridade SSD, baridade máxima teórica calculada pelo método matemático, porosidade, VMA, VFB, e as características mecânicas como a estabilidade e deformação de Marshall, a sensibilidade à água e resistência à deformação permanente. Os resultados obtidos encontram-se integralmente no Apêndice IV.

No Quadro 4.22 e na Figura 4.31, são apresentados os valores médios, para cada percentagem de betume, das propriedades volumétricas. Na Figura 4.32 encontram-se representados graficamente os valores de estabilidade e deformação retirados do ensaio de compressão de Marshall.

Quadro 4.22 – Propriedades volumétricas SMA-BR (valores médios)

Betume (%)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (kg/m ³)	Porosidade (%)	VMA (%)	VFB (%)
5,5	2278	2427	6,1	18,18	66,34
6,0	2238	2410	7,1	20,06	64,37
6,5	2234	2393	6,6	20,61	67,76

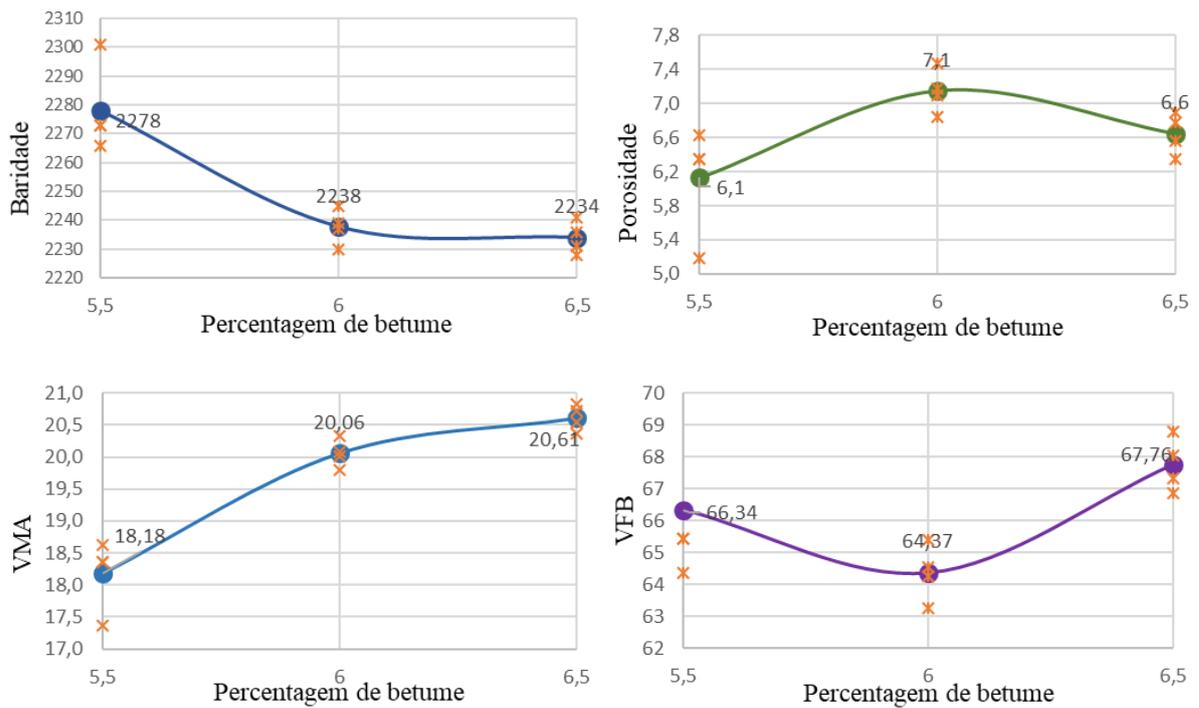


Figura 4.31 – Representação gráfica das propriedades volumétricas da mistura em função da percentagem de betume (SMA-BR)

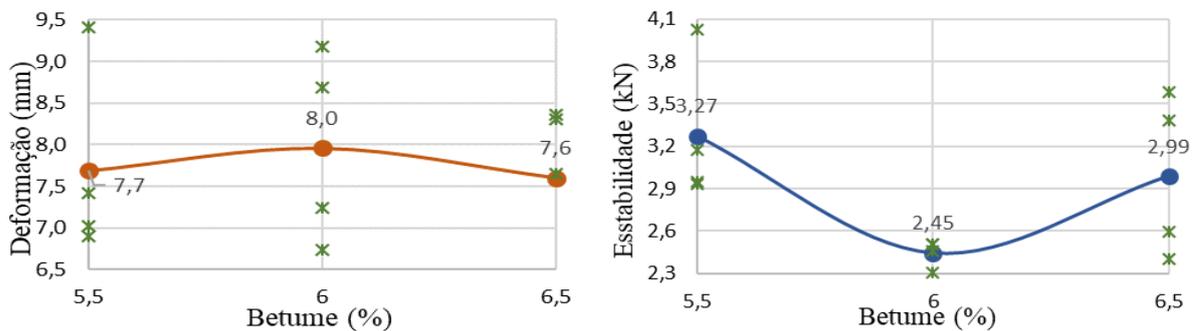


Figura 4.32 – Resultados dos ensaios de compressão de Marshall (SMA_BR)

Analisando os valores acima expostos, principalmente a porosidade, pode concluir-se que os melhores valores são os obtidos para a percentagem de betume de 5,5%. Por motivos de coerência para realizar a comparação entre os dois tipos de misturas, os provetes foram realizados com 6,0% de betume.

No Quadro 4.23 apresenta-se a comparação de algumas características da mistura, para 6,0% de betume, com os valores definidos em algumas especificações de referência, nomeadamente, a ZTV-Asphalt StB 2001 (Drüschner et al, 2000), a AASHTO MP8 (Prowell et al, 2009) , a DER-ST ET-DE-P00/0031 (DER-ST, 2007), o Proyecto SMA (Proyecto SMA, 2014). Da sua observação, conclui-se que a maioria das propriedades volumétricas da mistura formulada não respeitam os valores definidos nas especificações referidas.

Quadro 4.23 – Comparação das propriedades volumétricas obtidas com os valores definidos nas especificações (SMA-BR)

Especificação / Propriedade	Limites para SMA 0/11S definidos na ZTV - Asphalt StB 2001	Limites definidos na AASHTO MP8	Limites definidos na DER-ST ET-DE-P00/0031	Limites definidos no Projecto SMA 11 2014	Valores obtidos para a mistura em estudo
Percentagem de betume (%)	≥ 6,5	≥ 6,0	---	≥ 5,8	6,0
Percentagem de aditivo (%)	0,3 - 1,5	≥ 0,3**	0,3 - 1,5 *****	0,3 - 1,0	0,4
Porosidade * (%)	3,0 - 4,0	4,0***	4,0	4,0 - 6,0	7,1
VMA (%)	---	≥ 17	≥ 17	≥ 17	20,06
VFB (%)	---	---	---	≤ 83	64,37
Drenagem máxima (%)	---	0,3	0,3	0,3	Não determinado ⁺

* Em provetes Marshall compactados com 50 pancadas/face

** No caso de fibras minerais é recomendado um mínimo de 0,4%

*** Em estradas com tráfego leve pode utilizar-se 3%

***** O aditivo são fibras celulósicas

+ Devido ao facto de valores calculados anteriormente respeitarem o limite

De seguida foram fabricados quatro provetes para realização do ensaio de resistência à deformação permanente, os resultados encontram-se representados na Figura 4.33 e no Quadro 4.24. Os provetes não completaram os 3600 ciclos, pois atingiram os 40 000 microns de deformação antes disso.

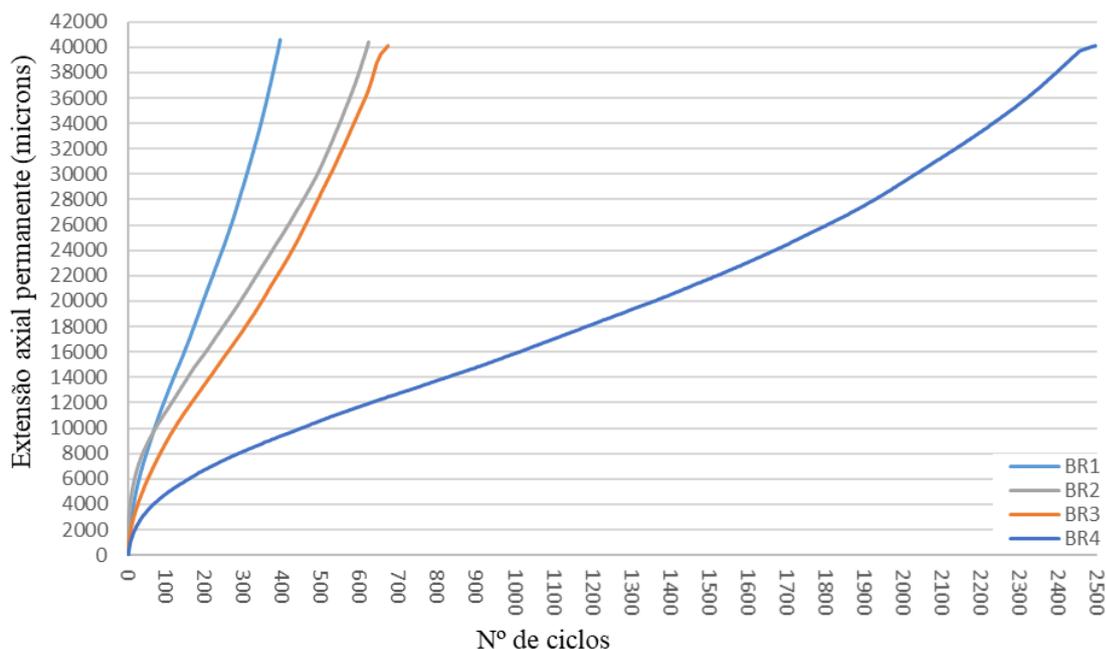


Figura 4.33 – Curvas de deformação axial permanente para cada provete ensaiado (SMA-BR)

Quadro 4.24 – Resultados do ensaio de deformação permanente para a mistura SMA-BR

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon$ /ciclo)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
BR1	9,1	9,0	2,446	2,457	4,072	4,035	83,889	50,469
BR2	9,5		2,496		4,043		47,239	
BR3	9,5		2,435		4,016		47,501	
BR4	8,0		2,450		4,008		23,249	

Através da análise dos valores acima apresentados é possível concluir, como era de esperar, que a mistura SMA-BR apresenta uma resistência à deformação permanente muito fraca. Os motivos anteriormente referidos, nomeadamente a existência de um fraco esqueleto pétreo, a falta de adesividade do betume ao agregado e o próprio betume, podem estar na origem destes resultados.

Como os resultados de resistência à deformação permanente foram muito fracos optou-se por não realizar o ensaio de sensibilidade à água, sendo de esperar resultados, igualmente, baixos.

Na Figura 4.34 é possível observar a comparação entre a mistura SMA-BN e SMA-BR, das propriedades analisadas para a percentagem de betume considerada como ótima, 6%.

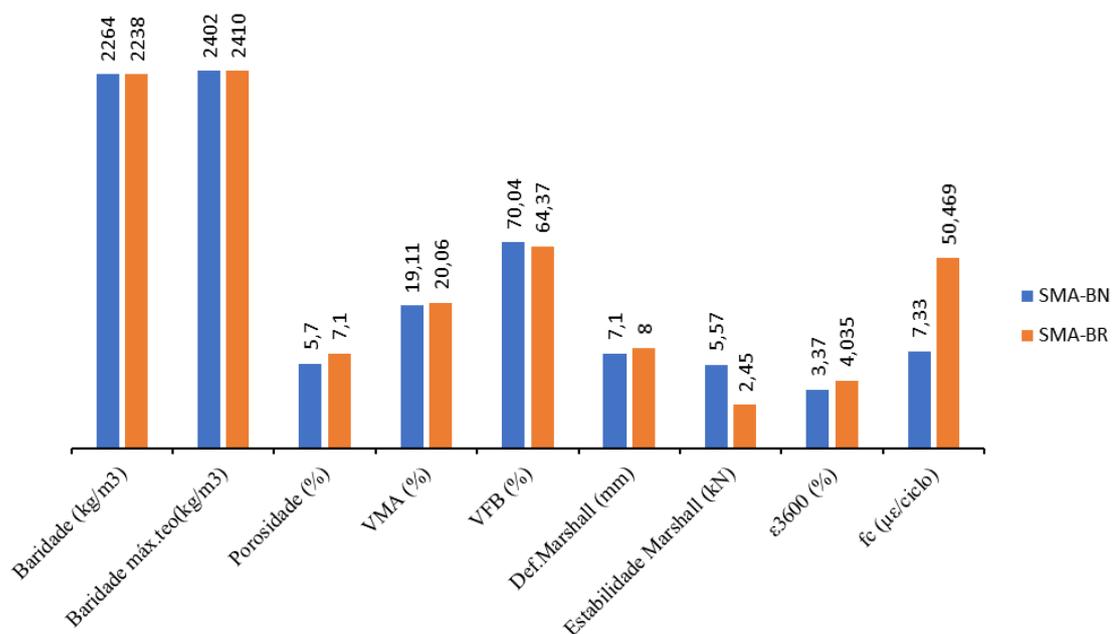


Figura 4.34 – Comparação entre SMA-BN e SMA-BR (6% de betume)

4.4 Discussão baseada na resistência à deformação permanente

Analisando os valores de deformação permanente apresentados para ambas as misturas em estudo, surgiu a hipótese de a mistura de agregados utilizada apresentar um inadequado esqueleto pétreo, apesar de cumprir os requisitos necessários, e/ou existir falta de adesividade entre o agregado e o betume. Para provar a veracidade destas hipóteses realizou-se uma análise com base nos valores resultantes do ensaio de resistência à deformação permanente sobre provetes.

Inicialmente optou-se por trocar os agregados utilizados e realizar o ajuste da curva. As características físicas dos agregados, mais relevantes, foram recolhidas das fichas técnicas do produto, e encontram-se resumidas nos Quadros 4.25 a 4.26. Em cada quadro são também indicados os requisitos, de acordo com a NP EN 13043.

Quadro 4.25 – Características físicas dos agregados de granulometrias 2/5 mm e 4/16 mm

Propriedade	Massa volúmica			Granulometria	FI (%)	SI (%)	LA (%)	MDE (%)	Baridade (Mg/m ³)	WA (%)	PSV (%)
	ρ _a	ρ _{rd}	ρ _{ssd}								
Material											
Areia 2/5	2,71	2,65	2,67	Gc 85-20	ND	ND	ND	ND	ND	0,9	ND
Brita 4/16	2,65	2,6	2,62	Gc 90-15	FI ₁₅	SI ₂₀	LA ₂₀	MDE ₁₀	1,38	0,7	PSV ₅₆
NP EN 13043											
Requisitos/categoria	A declarar			A declarar	FI ₂₀	ND	LA ₂₀ *	MDE ₁₅	A declarar	≤1	PSV ₅₀

*Para rochas granitoides LA30

ND – Não definido na ficha técnica

Quadro 4.26 – Características físicas do agregado de dimensão 0/4 mm granítico

Propriedade	Massa volúmica			Granulometria	MB _F (g/kg)	Baridade (Mg/m ³)	WA (%)
	ρ _a	ρ _{rd}	ρ _{ssd}				
Material							
Pó 0/4 granítico	2,65	2,62	2,63	GA ₈₀	MB _{F10}	1,61	0,4
NP EN 13043							
Requisitos/categoria	A declarar			A declarar	MB _{F 10}	A declarar	≤1

Quadro 4.27 – Características físicas do filler

Propriedade	Massa volúmica (Mg/m ³)	Vazios de filler seco compacto - <i>Ridgen</i> (%)	Baridade (Mg/m ³)
Material			
Fíler	2,7	32	0,9
NP EN 13043			
Requisitos/ categoria	≤0,2 Mg/m ³ do valor declarado	v 28/38	Entre 0,5 e 0,9 Mg/m ³ do valor declarado

Na Figura 4.35 é possível observar os agregados utilizados, estando representadas as respetivas curvas granulométricas na Figura 4.36. Seguindo o procedimento já referido, realizou-se o ajuste da curva aos limites impostos, sendo as percentagens de cada agregado usado na mistura apresentadas no Quadro 4.28 e a curva granulométrica representada na Figura 4.37.



Figura 4.35 – Agregados naturais utilizados

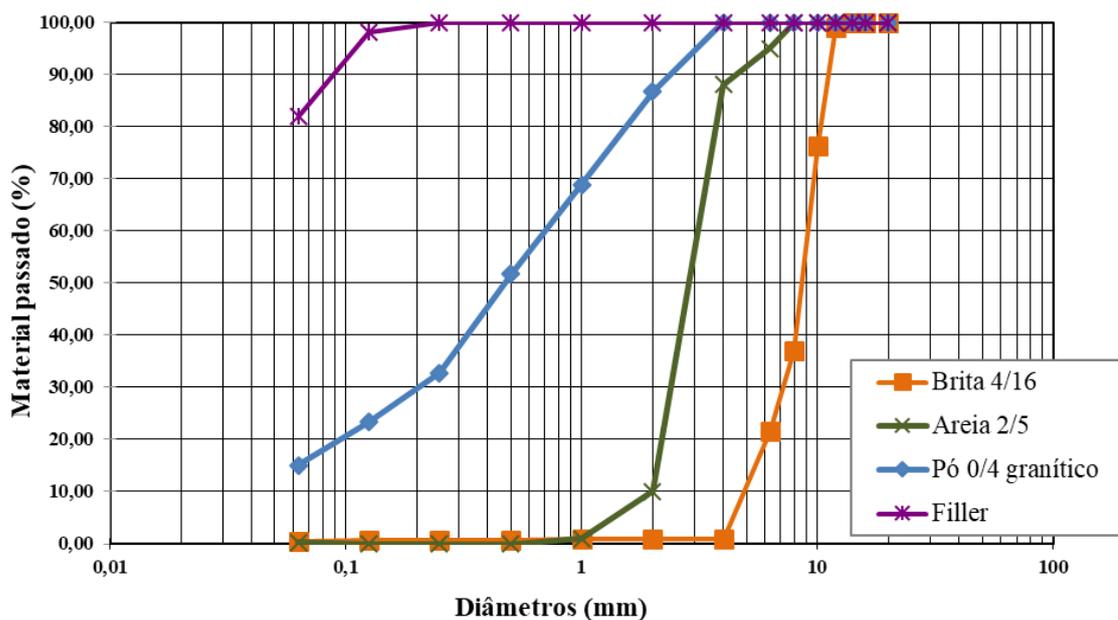


Figura 4.36 – Curvas granulométricas das várias frações de agregado

Quadro 4.28 – Percentagem de cada fração de agregado na mistura final

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/16	72
Areia 2/5	5
Pó 0/4 granítico	15
Fíler	8

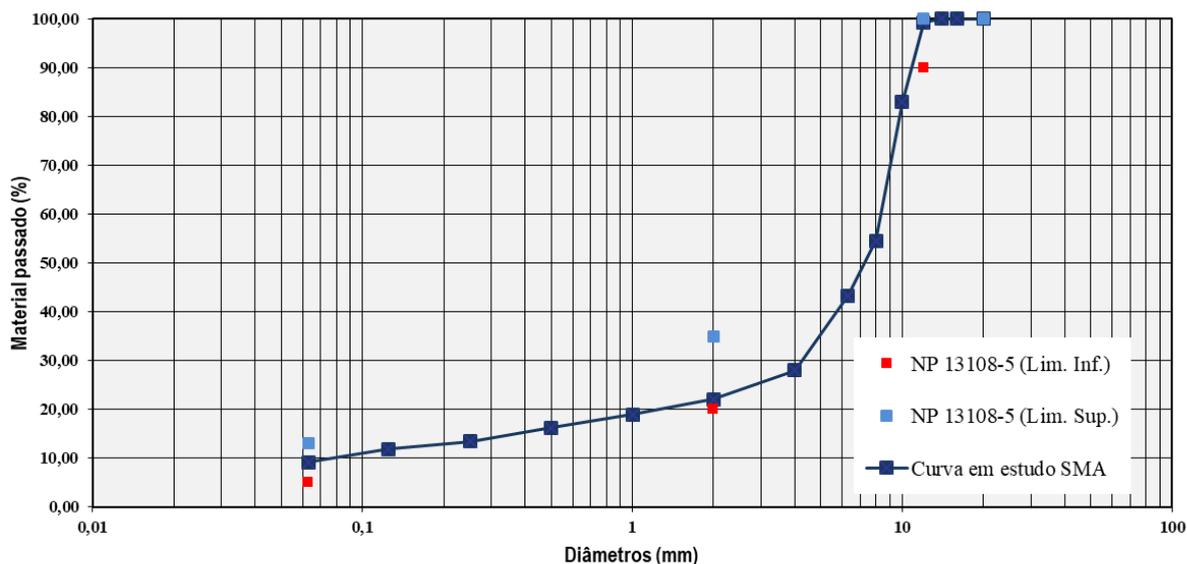


Figura 4.37 – Curva granulométrica da mistura em comparação com os pontos de controlo da norma EN13108-5

Através da observação da Figura 4.37 verifica-se que a mistura de agregados cumpre os limites impostos pela norma EN 13108-5. Como já realizado anteriormente, ajustou-se a curva aos diversos fusos, na Figura 4.38 encontra-se representado o melhor ajuste.

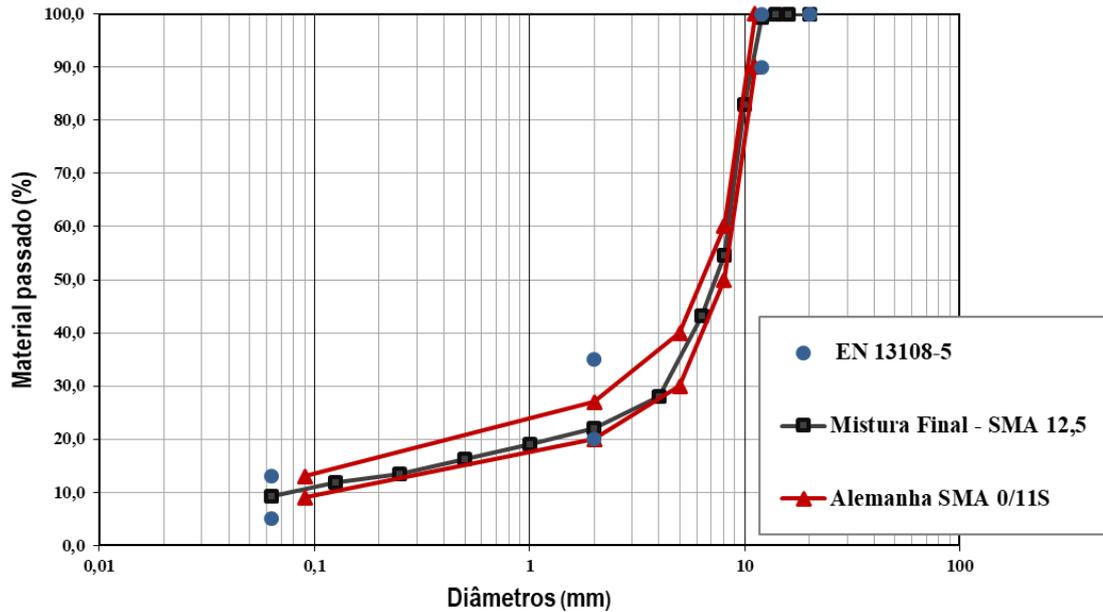


Figura 4.38 – Comparação da curva granulométrica da mistura com os limites definidos na Alemanha e na EN 13108-5

Com a mistura definida, foram produzidos em laboratório três provetes com o betume 35/50, e realizou-se o ensaio de deformação permanente, do qual não foi possível obter resultados dos parâmetros habituais, pois os provetes deformaram-se rapidamente e o limite dos LVDT foi atingido muito antes do final do ensaio. Decidiu-se realizar a análise granulométrica (Apêndice II) e comparar com a curva teórica (Figura 4.39).

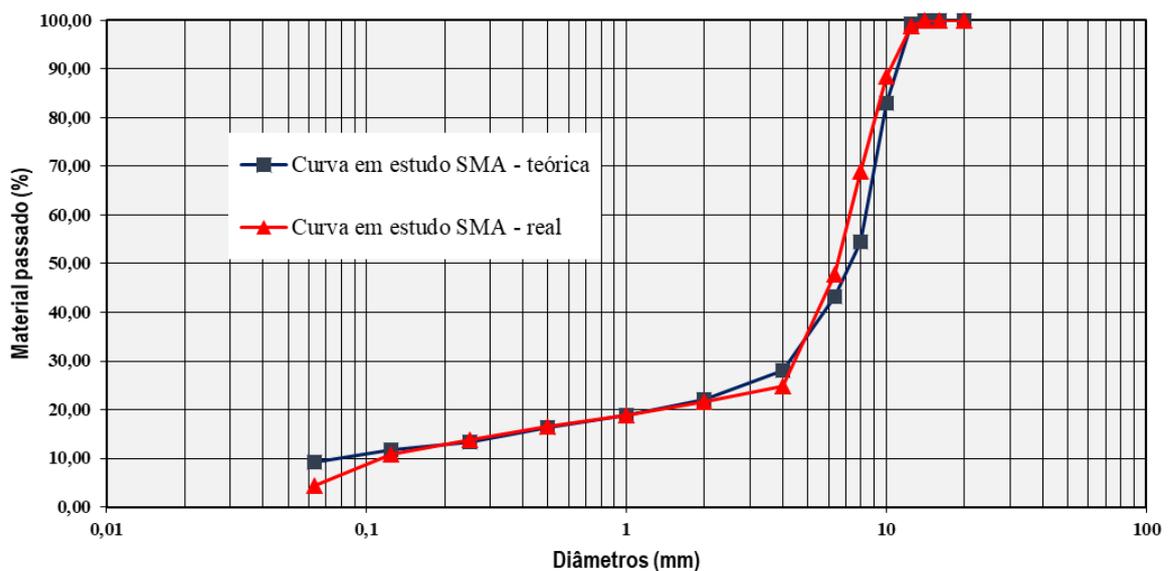


Figura 4.39 – Comparação entre a curva teórica da mistura e a curva resultante da análise granulométrica

Após observação do gráfico anterior verifica-se que existe diferenças entre as duas curvas, pelo que se efetuou a análise granulométrica da fração de agregado 4/16 (Apêndice II) e procedeu-se a uma nova formulação, tendo-se decidido excluir o material de dimensão 2/5 mm, com a finalidade de se obter um melhor ajuste da curva da mistura ao fuso utilizado na Alemanha.

Na Figura 4.40 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados utilizados, as percentagens destes na mistura final e sua curva granulométrica encontram-se no Quadro 4.29 e na Figura 4.41, respetivamente.

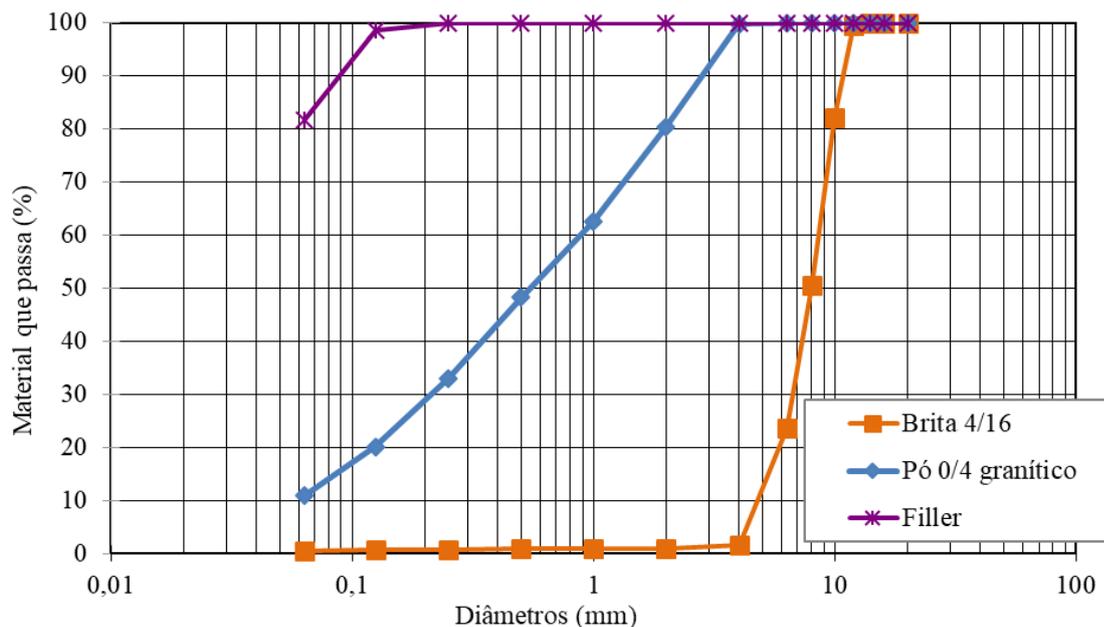


Figura 4.40 – Curvas granulométricas dos agregados

Quadro 4.29 – Percentagens dos agregados na mistura final

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/16	70
Pó 0/4 granítico	22
Fíler	8

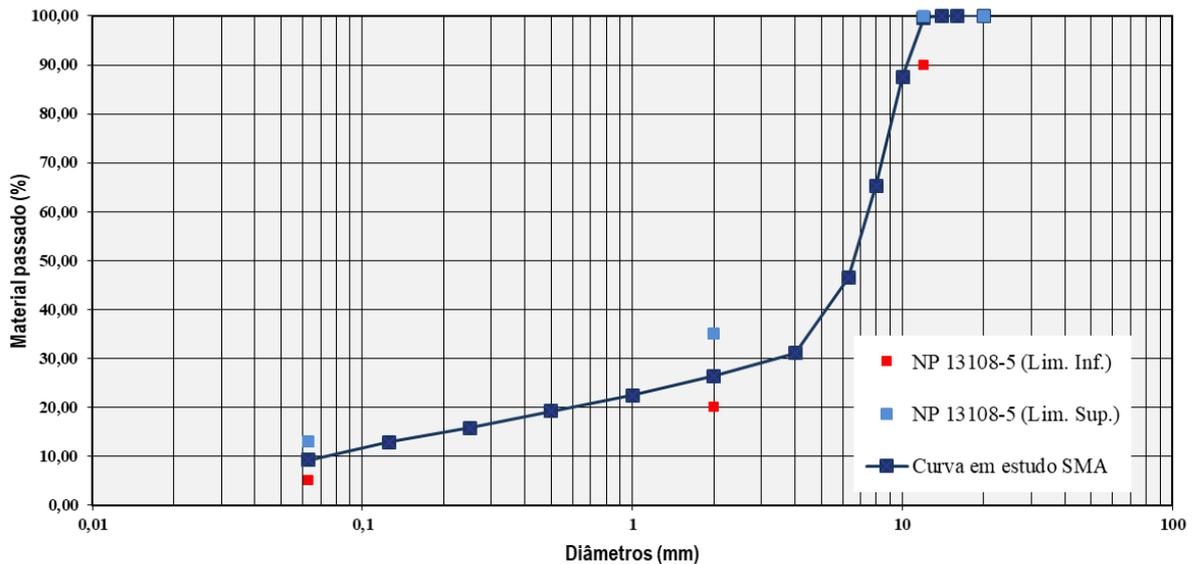


Figura 4.41 – Pontos de controlo da norma EN13108-5 em comparação com a curva granulométrica da mistura

Através da observação da Figura 4.41 verifica-se que a mistura de agregados cumpre os limites impostos pela norma EN 13108-5. Como já realizado anteriormente, ajustou-se a curva aos diversos fusos, na Figura 4.42 encontra-se representado o melhor ajuste.

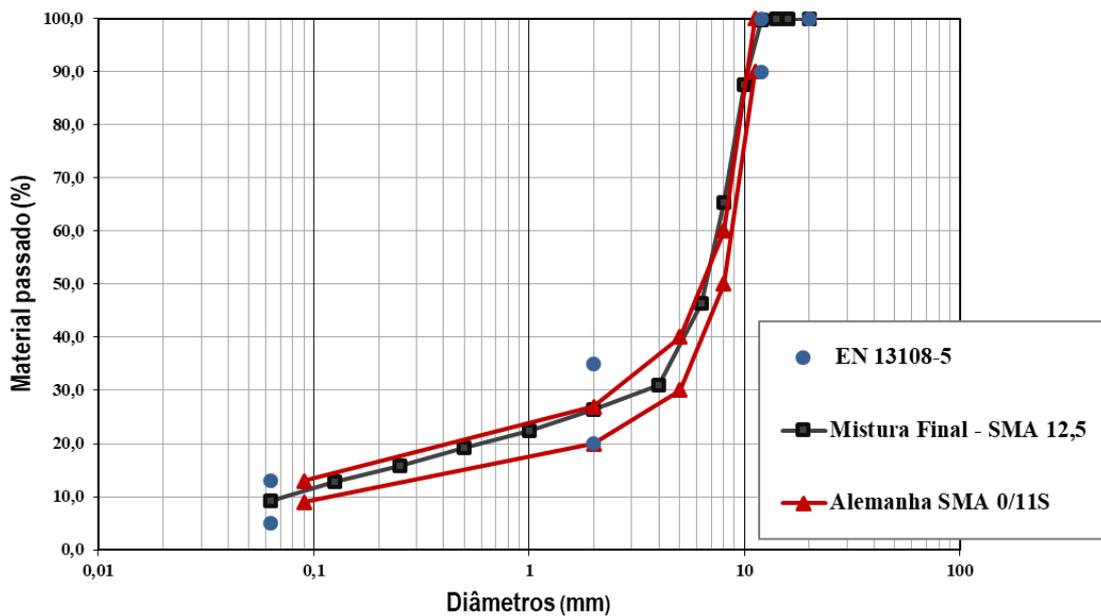


Figura 4.42 – Comparação dos limites definidos na Alemanha e na EN 13108-5 com a curva granulométrica da mistura

Com a mistura anterior foram realizados três provetes com o betume 35/50, na percentagem de 6,0% e fibras celulósicas *Viatop CT 40*[®], na percentagem de 0,3% da massa de betume. De seguida foram ensaiados à deformação permanente sendo os valores obtidos apresentados na Figura 4.43 e no Quadro 4.30.

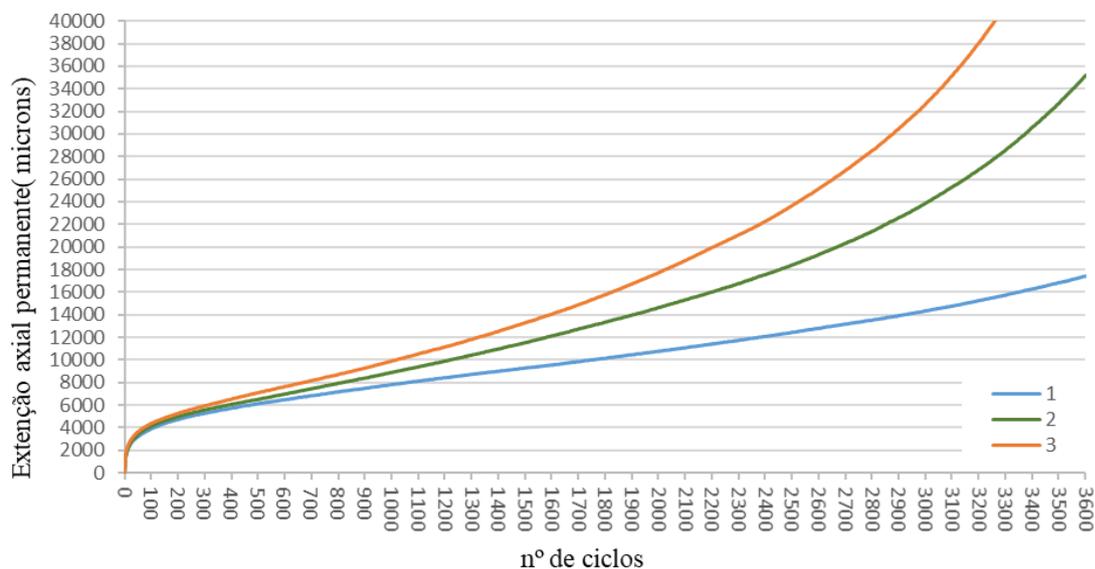


Figura 4.43 – Curvas resultantes do ensaio de deformação para cada provete ensaiado

Quadro 4.30 – Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente para os provetes 1, 2 e 3

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, fc ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
1	7,7	8,6	0,962	1,709	1,745	3,093	4,045	5,583
2	9,7		1,943		3,518		5,703	
3	8,3		2,221		4,015		7,001	

Analisando os valores acima apresentados é possível concluir que o comportamento à deformação permanente é fraco. Através da comparação destes valores com os valores anteriormente apresentados, nomeadamente com os provetes B1 a B4 da mistura SMA-BN, é possível verificar que, em média, para as mesmas condições de fabrico e de ensaio, os provetes com o esqueleto pétreo acima referido apresentam melhorias em termos de deformação (Quadro 4.31).

Quadro 4.31 – Comparação entre os valores resultantes do ensaio de deformação permanente

Provetes	Deformação axial (mm)	Deformação axial, ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
B1, B2, B3, B4	2,067	3,370	7,330
1, 2, 3	1,709	3,093	5,583

Verifica-se então que a deformação axial em milímetros, a taxa de deformação e a deformação acumulada (ϵ_{3600}) apresentam uma redução de 17, 8 e 24%, respetivamente, em relação aos valores para a mistura SMA-BN.

Para verificar se se conseguiria reduzir os valores de deformação para valores mais aceitáveis, decidiu-se repetir o processo anterior trocando o betume 35/50 por um betume mais duro, betume 10/20, ou seja, mantendo as mesmas percentagens de agregados, as fibras celulósicas para reduzir a temperatura, *Viatop CT 40*[®], na percentagem de 0,3% da massa de betume, a percentagem de betume de 6,0%, e com temperatura de fabrico de 130°C. Os resultados do ensaio de deformação permanente são apresentados na Figura 4.44 e no Quadro 4.32, a sua comparação com os valores retirados do procedimento anterior encontra-se no Quadro 4.33.

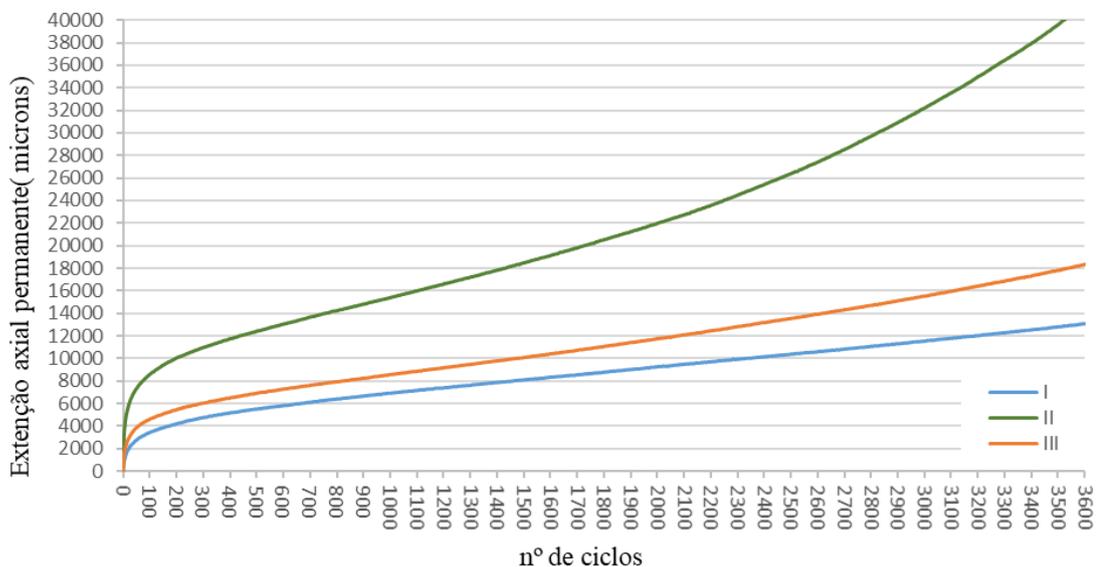


Figura 4.44 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de deformação permanente para cada provete com betume 10/20

Quadro 4.32 – Resultados do ensaio à deformação permanente para os provetes com betume 10/20

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, fc ($\mu\epsilon$ /ciclo)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
I	8,3	8,2	0,748	1,395	1,313	2,386	2,380	4,365
II	8,3		2,351		4,006		6,668	
III	8,0		1,086		1,838		4,049	

Quadro 4.33 – Comparação dos valores obtidos do ensaio de resistência à deformação permanente

Provetes	Deformação axial (mm)	Deformação axial, ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, fc ($\mu\epsilon$ /ciclo)
1, 2, 3	1,709	3,093	5,583
I, II, III	1,395	2,386	4,365

Analisando os resultados acima expostos pode concluir-se que o contributo do betume duro não é significativo para obter os valores desejáveis, apesar, de como é possível observar no Quadro 4.33, haver melhorias, em média, da deformação, nomeadamente uma redução de 18% na deformação axial, de 23% na deformação acumulada (ϵ_{3600}) e de 22% na taxa de deformação.

Como o contributo do betume 10/20 não foi significativo optou-se por fazer uma mistura a quente com betume 35/50 na percentagem de 5,7% e utilizar fibras com promotor de adesividade e sem aditivos para redução de temperatura, *Viatop Plus AD 10*, na percentagem de 0,35% da massa de betume, produzindo três provetes. Os resultados do ensaio à deformação permanente encontram-se representados na Figura 4.45 e no Quadro 4.34. No Quadro 4.35 é apresentada a comparação com os valores resultantes do ensaio realizado sobre os provetes que foram produzidos com pequenas diferenças destes, ou seja, os provetes 1, 2 e 3.

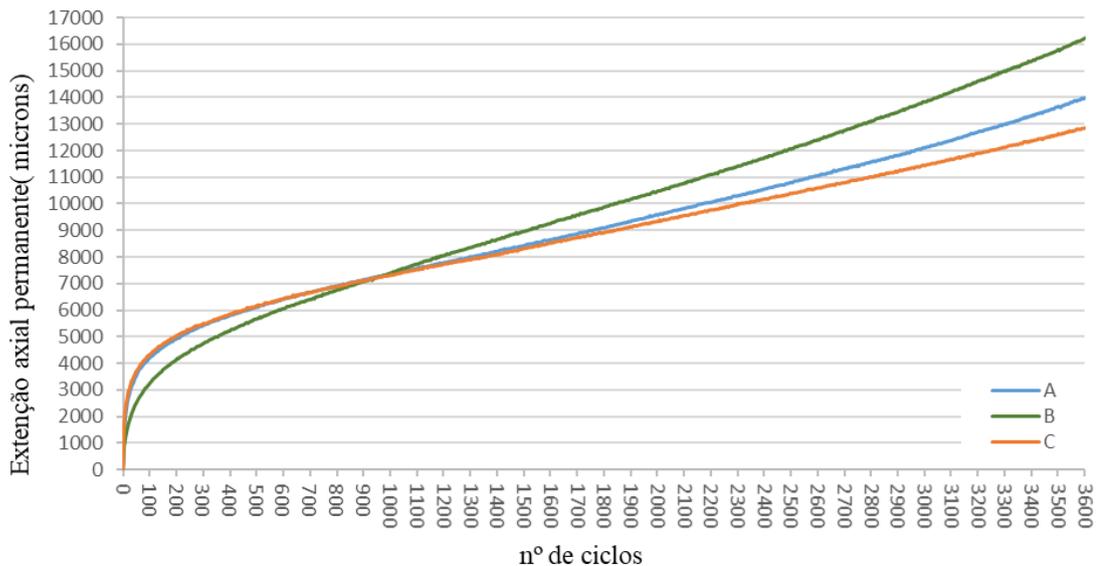


Figura 4.45 – Resultados do ensaio de deformação permanente de cada provete realizado com fibras com promotor de adesividade

Quadro 4.34 – Resultados do ensaio de deformação permanente para os provetes com fibras *Viatop Plus AD 10*

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
A	7,6	7,3	0,817	0,831	1,399	1,437	2,723	2,813
B	7,3		0,940		1,626		3,532	
C	7,0		0,736		1,285		2,182	

Quadro 4.35 – Comparação dos resultados obtidos

Provetes	Deformação axial (mm)	Deformação axial, ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
1, 2, 3	1,709	3,093	5,583
A, B, C	0,831	1,437	2,813

Através da observação dos valores acima apresentados é possível verificar que houve melhorias na deformação permanente, nomeadamente uma redução de 51% na deformação axial em milímetros, de 54% na deformação acumulada e de 50% na taxa de deformação.

Os valores apresentados para estes provetes são considerados aceitáveis. Contudo, a produção incluiu a alteração de diversos fatores, nomeadamente a temperatura de fabrico (mais alta), as fibras celulósicas (com promotor de adesividade) e a percentagem de betume (5,7 em vez de 6%), não é possível concluir qual dos fatores foi mais importante na melhoria dos resultados obtidos.

O *Stone Matrix Asphalt* faz referência a uma regra valiosa intitulada de regra 30-20-10, segundo a qual no peneiro 0,075mm, 2,36mm e 4,75mm deverão existir 10%, 20% e 30% de passados, respetivamente. Para o caso em estudo tentou-se que nos peneiros 0,063mm, 2mm e 4mm a percentagem de passados fosse aproximadamente 10%, 20% e 30%, respetivamente. Apesar de a curva anterior respeitar a regra 30-20-10, decidiu-se fazer um uso mais aperfeiçoado desta, procedendo a um reajuste da curva, tendo-se obtido a curva granulométrica apresentada na Figura 4.46 e a sua comparação com o fuso alemão na Figura 4.47. As percentagens de cada fração de agregado na mistura são apresentadas no quadro 4.36. Em laboratório produziram-se três provetes com as mesmas características dos anteriores (A, B, C), os resultados obtidos do ensaio à deformação permanente encontram-se na Figura 4.48 e no Quadro 4.37, e no Quadro 4.38 a comparação de ambos.

Quadro 4.36 – Percentagens de cada fração de agregado na mistura (regra 30-20-10)

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/16	75
Pó 0/4 granítico	15
Fíler	10

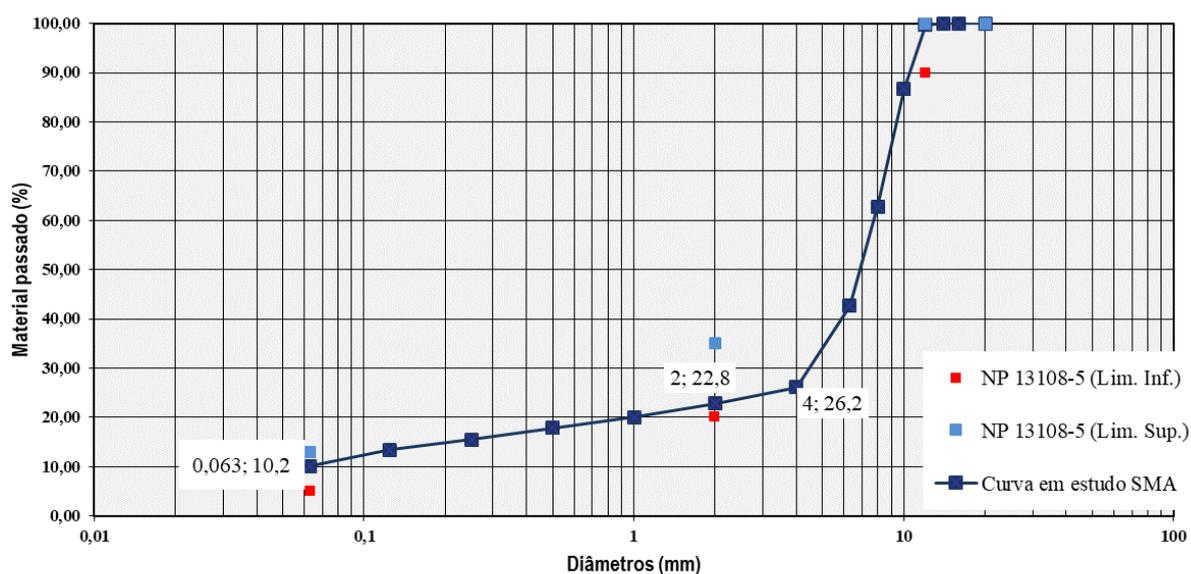


Figura 4.46 – Curva granulométrica seguindo a regra 30-20-10

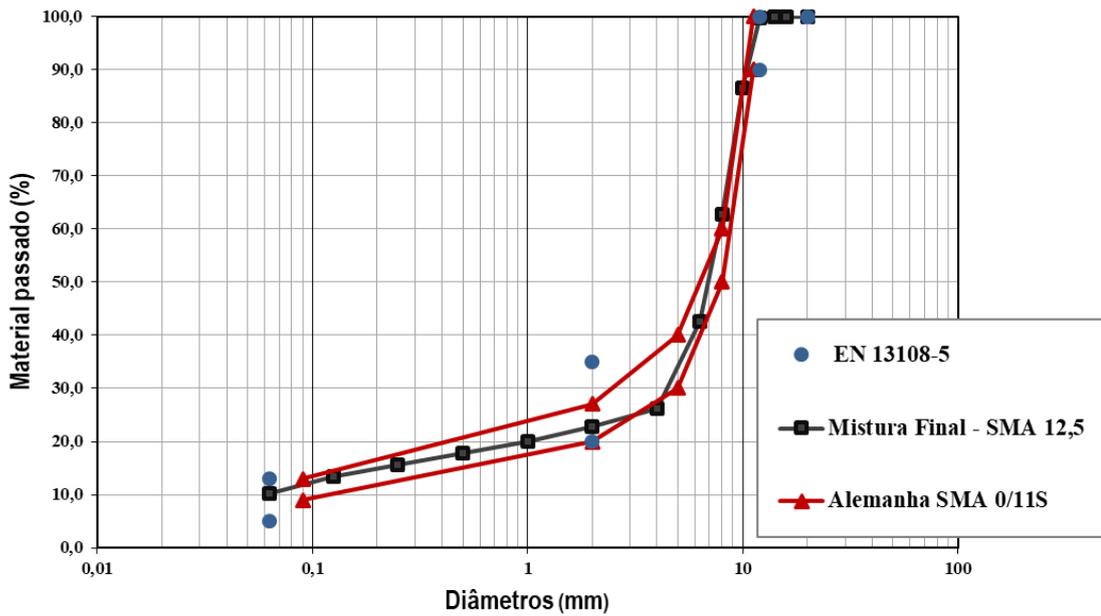


Figura 4.47 – Comparação dos limites definidos na EN 13108-5 e na Alemanha com a curva seguindo a regra 30-20-10

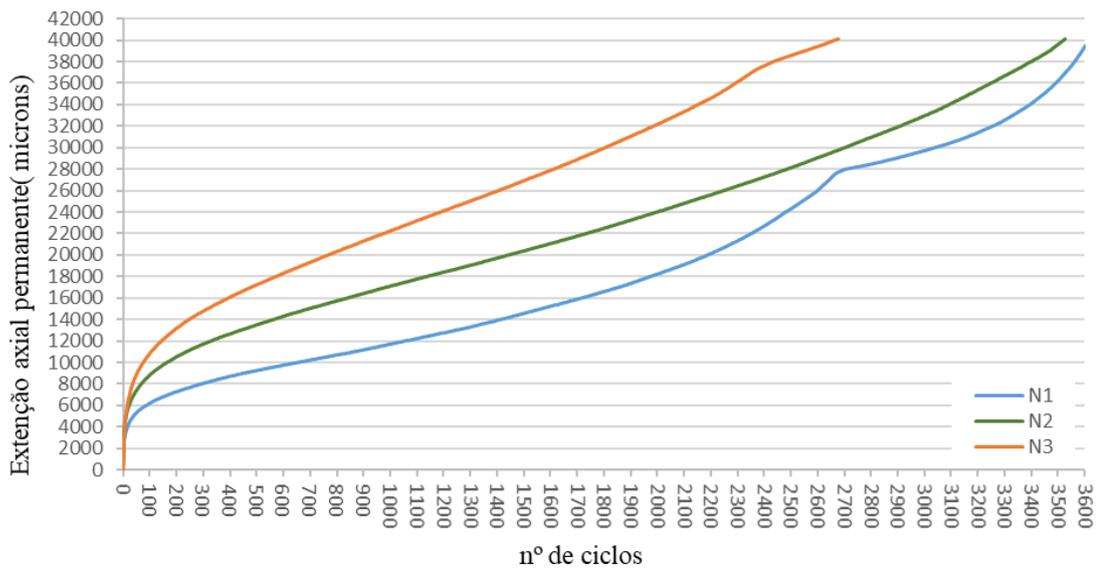


Figura 4.48 – Curvas resultantes do ensaio à deformação permanente (regra 30-20-10)

Quadro 4.37 – Resultados deformação permanente, regra 30-20-10

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
N1	10,5	9,9	2,366	2,407	3,949	3,993	6,075	13,868
N2	9,6		2,436		4,022		15,112	
N3	9,7		2,419		4,007		20,418	

Quadro 4.38 – Comparação dos valores obtidos da regra 30-20-10 com os calculados anteriormente

Provetes	Deformação axial (mm)	Deformação axial, ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
A, B, C	0,831	1,437	2,813
N1, N2, N3	2,407	3,993	13,868

Analisando os valores acima expostos é possível verificar que os resultados pioraram em cerca de 70% em relação aos anteriormente calculados, pelo que se pode afirmar que a composição dos agregados na mistura tem grande influência na resistência à deformação do pavimento.

Decidiu-se prosseguir o estudo com a mistura de agregados definida antes da alteração mencionada, ou seja, com os agregados 4/16mm, 0/4mm e o fíler nas percentagens de 70%, 22% e 8%, respetivamente. Foram, então, produzidos três provetes, semelhantes aos anteriores (5,7% de betume 35/50 e mistura a quente), trocando as fibras celulósicas *Viatop Plus AD 10* pelas Fibras celulósicas *Viatop Premium*, na percentagem de 0,3% da massa de betume, com o objetivo de averiguar o contributo das fibras com promotor de adesividade. Os resultados do ensaio são apresentados na Figura 4.49 e no Quadro 4.39. No Quadro 4.40 é apresentada a comparação dos valores para as duas situações referidas.

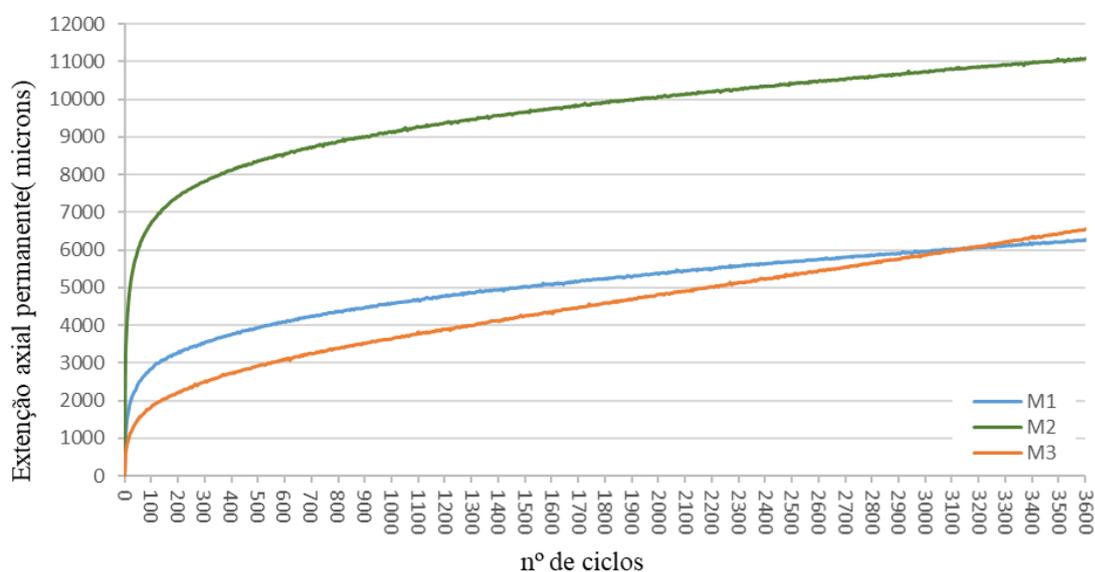


Figura 4.49 – Curvas resultantes do ensaio de deformação permanente para os Provetes M1, M2, M3

Quadro 4.39 – Resultados do ensaio de deformação permanente para os provetes M1, M2, M3

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, fc ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
M1	6,1	7,0	0,360	0,451	0,628	0,797	0,575	0,774
M2	7,0		0,627		1,109		0,653	
M3	7,9		0,367		0,655		1,093	

Quadro 4.40 – Comparação dos valores para contabilizar efeito das fibras com promotor de adesividade

Provetes	Deformação axial (mm)	Deformação axial, ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, fc ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
A, B, C	0,831	1,437	2,813
M1, M2, M3	0,451	0,797	0,774

Analisando os valores obtidos, conclui-se que o material não apresenta problemas de adesividade pois os valores resultantes do ensaio de resistência à deformação permanente apresentaram melhorias em relação aos anteriores.

Os valores acima referidos podem ainda ser comparados com os valores calculados para os provetes 1, 2 e 3 que foram produzidos nas mesmas condições, apenas com diferença na temperatura de fabrico e na percentagem de betume (Quadro 4.41).

Quadro 4.41 – Comparação dos valores obtidos

Provetes	Tipo de betume, Percentagem de betume (%)	Tipo de mistura	Fibras	Deformação axial (mm)	Deformação axial, ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, fc ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
1, 2, 3	35/50 em 6,0%	Temperada	Viatop CT 40	1,709	3,093	5,583
M1, M2, M3	35/50 em 5,7%	Quente	Viatop Premium	0,451	0,797	0,774

Analisando os valores obtidos, conclui-se que os provetes M1, M2 e M3 apresentam melhorias na resistência à deformação, mas não se consegue concluir se estas melhorias são resultantes da redução da percentagem de betume ou do aumento da temperatura de fabrico. Assim,

decidiu-se produzir três provetes com betume 35/50, com uma percentagem de 5,7% de ligante, e fibras celulósicas *Viatop CT 40*[®], com cera para reduzir a temperatura, na percentagem de 0,3% da massa de betume. Os resultados obtidos do ensaio de resistência à deformação permanente são apresentados na Figura 4.50 e no Quadro 4.42. A sua comparação com os valores acima referidos encontra-se no Quadro 4.43.

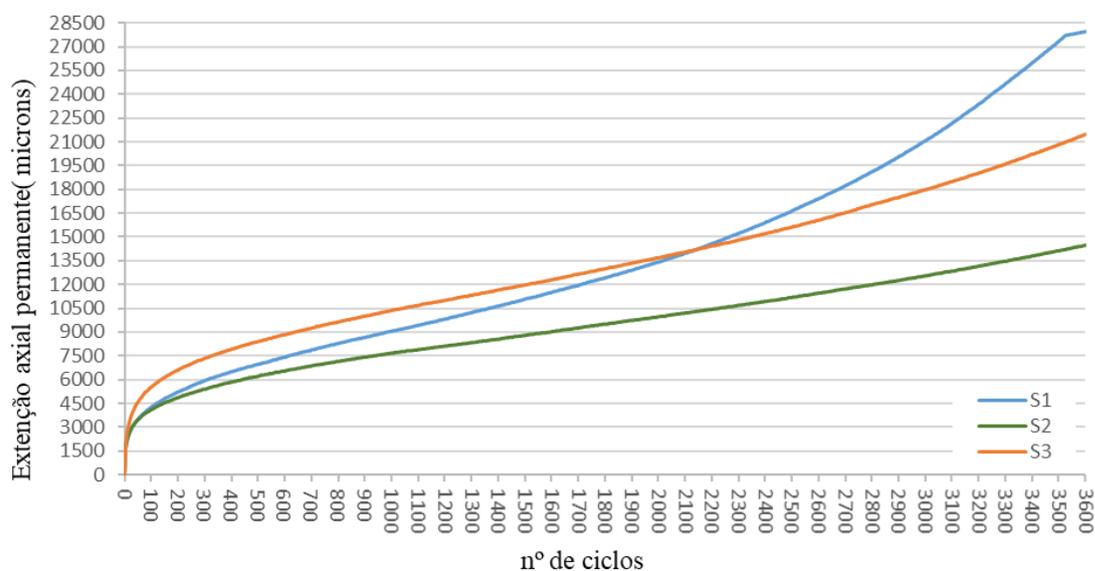


Figura 4.50 – Curvas resultantes do ensaio de deformação permanente para os provetes S1, S2, S3

Quadro 4.42 – Resultados do ensaio de deformação permanente para dos provetes S1, S2, S3

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
S1	7,9	7,8	1,649	1,245	2,799	2,131	4,683	3,740
S2	7,6		0,840		1,445		2,751	
S3	7,9		1,245		2,148		3,786	

Quadro 4.43 – Comparação dos valores obtidos

Provetes	Deformação axial (mm)	Deformação axial, ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
S1, S2, S3	1,245	2,131	3,740
1, 2, 3	1,709	3,093	5,583
M1, M2, M3	0,451	0,797	0,774

Analisando os valores anteriores é possível concluir que a diminuição da quantidade de betume, apesar de pequena, contribui para a melhoria da resistência à deformação em cerca de 40%. Também se pode concluir que a mistura a quente apresenta melhorias em relação à mistura temperada, cifrando-se em cerca de 70%.

Por fim, produziu-se três provetes com betume temperado de refinaria na percentagem de 5,7% e fibras *Viatop Premium*, na percentagem de 0,4 %, para avaliar o contributo do uso deste betume na resistência à deformação permanente. Os resultados são apresentados na Figura 4.51 e no Quadro 4.44. A sua comparação com os valores calculados para as mesmas condições de ensaio, mas com o betume 35/50 encontra-se no Quadro 4.45.

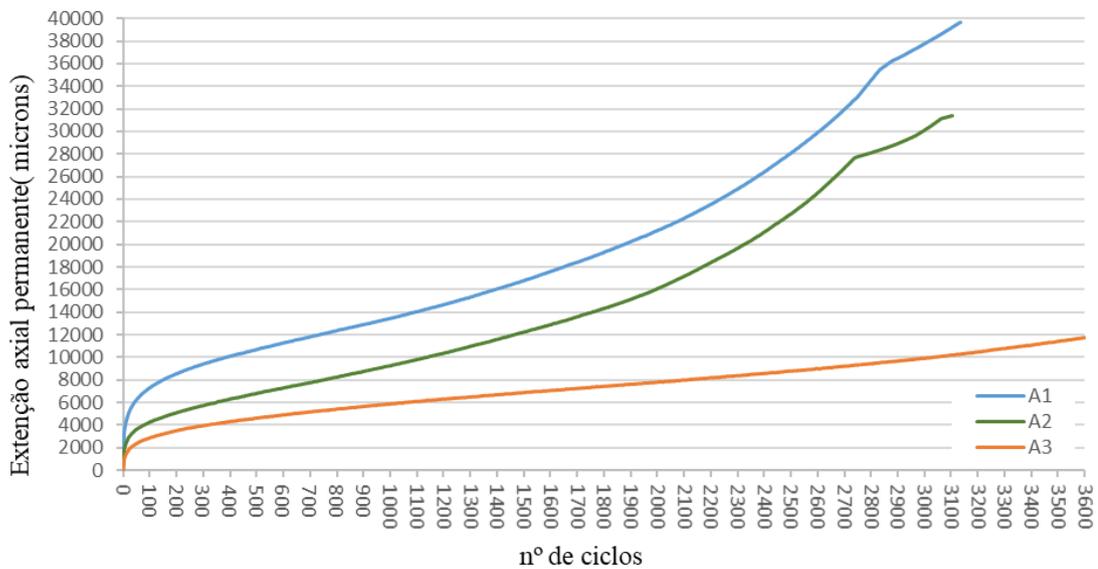


Figura 4.51 – Resultados do ensaio de deformação permanente de cada provete com o betume de refinaria

Quadro 4.44 – Resultados do ensaio de deformação permanente para o betume de refinaria

Provete	Porosidade (%)		Deformação axial (mm)		Deformação axial, ϵ_{3600} (%)		Taxa de deformação, fc ($\mu\epsilon$ /ciclo)	
	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média	Valor	Média
A1	8,0	7,7	2,302	1,589	3,965	2,761	6,567	4,874
A2	8,4		1,805		3,140		5,667	
A3	6,8		0,661		1,178		2,389	

Quadro 4.45 – Comparação dos valores obtidos para o ensaio de deformação permanente para ambos os betumes

Provetes	Deformação axial (mm)	Deformação axial, ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
A1, A2, A3	1,589	2,761	4,874
S1, S2, S3	1,245	2,131	3,740

Como era esperado os provetes com betume de refinaria apresentam piores resultados do que os provetes com betume 35/50, com níveis de deformação cerca de 20% mais elevados.

Na figura 4.52 é feita a comparação dos resultados obtidos através da análise com base na deformação permanente.

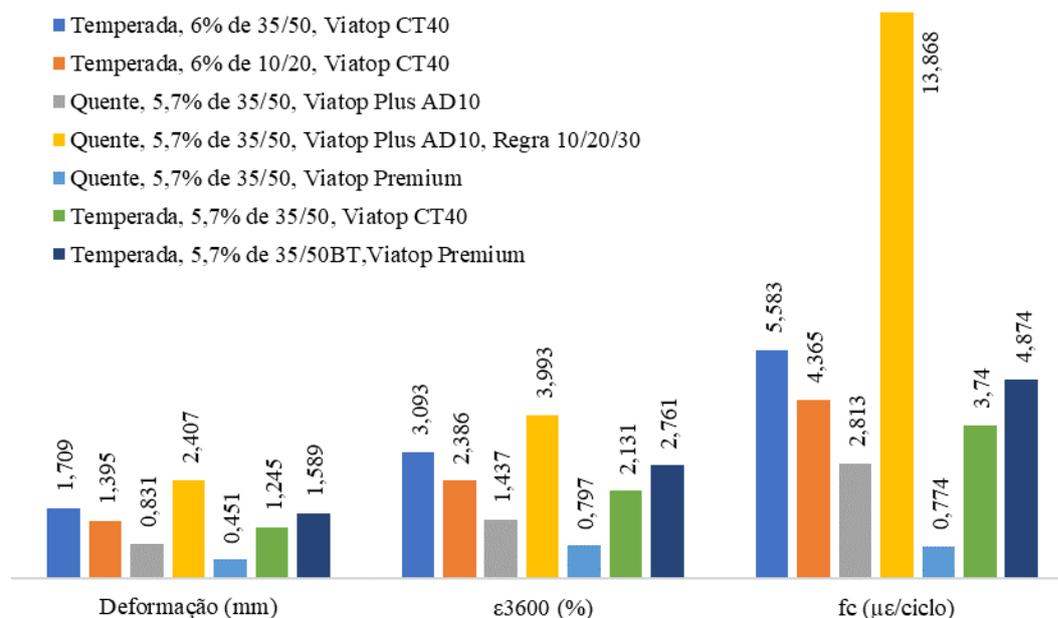


Figura 4.52 – Comparação dos valores obtidos para as diversas análises

4.5 Comparação das características das misturas em estudo com as obtidas em outros estudos similares

Para realizar uma melhor análise dos resultados obtidos, será apresentada de seguida uma comparação desses resultados com outros observados em estudos semelhantes, nomeadamente, os trabalhos de Carvalho (Carvalho, 2016).

Além das duas misturas em estudo, SMA-BN e SMA-BR, também são apresentados os melhores resultados da análise com base na resistência à deformação permanente, nomeadamente, o melhor obtido para a mistura a quente e para mistura temperada.

Quadro 4.46 – Comparação dos valores obtidos em estudos similares

Mistura Propriedades	(Carvalho, 2016)	SMA-BR em estudo	SMA-BN em estudo	Análise com base na resistência à deformação permanente	
				1 ^a	2 ^a
Tipo de mistura	MBT	MBT	MBT	MBQ	MBT
Camada	SMA 12,5 (desgaste)	SMA 12,5 (desgaste)	SMA 12,5 (desgaste)	SMA 12,5 (desgaste)	SMA 12,5 (desgaste)
Tipo de betume	35/50	35/50 BT	35/50	35/50	35/50
Agregados Naturais	Granito e calcário	Granito e calcário	Granito e calcário	Granito e calcário	Granito e calcário
Agregados da Mistura Betuminosa Reciclada	Granito	-	-	-	-
Aditivos	<i>Viatop CT 40[®]</i>	<i>Viatop Premium</i>	<i>Viatop CT 40[®]</i>	<i>Viatop Premium</i>	<i>Viatop CT 40[®]</i>
Propriedades Volumétricas					
Porcentagem de Betume (%)	6,5	6,0	6,0	5,7	5,7
Porosidade (%)	3,70	7,10	5,70	7,00	7,8
VMA (%)	18,60	20,06	19,11	19,69	20,12
VFB (%)	76,90	64,37	70,04	64,49	61,03
Características Mecânicas					
Estabilidade Marshall (kN)	8,97	2,45	5,57	-	-
Deformação Marshall (mm)	4,20	8,00	7,10	-	-
fc ($\mu\epsilon$ /ciclo)	0,406	50,469	7,330	0,774	3,740
Deformação axial acumulada ϵ_{3600} (%)	0,388	4,035	3,337	0,797	1,245

Analisando os valores é possível afirmar que as misturas em estudo apresentam piores resultados do que a mistura avaliada por Carvalho (2016). Também é possível afirmar que os resultados da análise com base na resistência à deformação permanente apresentam melhores valores que as misturas em estudo, sendo a mistura a quente a mais satisfatória e aproximada da mistura considerada para comparação.

4.6 Considerações finais

Através da análise do programa experimental realizado é possível concluir que o estudo de um SMA envolve algumas especificidades que influenciam o comportamento da mistura.

O tipo de betume que se escolhe para uma mistura do tipo SMA influencia o comportamento desta, o que pode ser verificado através da comparação dos valores obtidos para ambas as misturas em estudo. É possível afirmar que a mistura SMA-BR apresenta piores resultados que a mistura SMA-BN, tanto nas propriedades volumétricas como nas características mecânicas, o que poderá estar relacionado com o facto de a temperatura alvo (115°C) ser elevada para o betume de refinaria, como provado experimentalmente.

No que diz respeito à sensibilidade à água, a mistura SMA-BN considera-se razoável. Uma vez que os resultados da mistura SMA-BR são sempre piores que os da mistura SMA-BN e que o valor de resistência à água, para este, já se encontram no limite inferior, mesmo não se tendo realizado o ensaio para a mistura SMA-BR, é de esperar que os resultados para a sensibilidade à água desta mistura não sejam satisfatórios.

Através da análise realizada, no que diz respeito à resistência à deformação permanente, é possível afirmar que os resultados ficaram abaixo do esperado. Apesar de o esqueleto pétreo, que resultou do cumprimento dos limites fixados na EN 13108-5 para a granulometria, as misturas SMA-BN e SMA-BR deformaram-se significativamente. Observa-se que pequenas alterações na mistura de agregados influenciam bastante a resistência à deformação permanente.

Pode também concluir-se que a alteração, mesmo que pequena, da percentagem de betume tem uma influência assinalável nos resultados quando se utilizam betumes 35/50 ou 35/50 BT. A menores percentagens correspondem menores resistências à deformação permanente. Como era esperado, as misturas a quente apresentam melhores resultados que as temperadas. Concluiu-se ainda que o uso de betumes duros, do tipo 10/20, contribui para a resistência à deformação das misturas do tipo SMA.

5. Conclusões gerais e trabalhos futuros

5.1 Síntese do trabalho e Conclusões gerais

Uma alternativa às misturas betuminosas tradicionais a quente são as misturas betuminosas temperadas, as quais compreendem um grande número de misturas betuminosas, podendo ser fabricadas e aplicadas como misturas densas, descontínuas ou abertas, com diversos tipos de betumes, e com incorporação, ou não, de subprodutos industriais.

Neste trabalho procurou-se contribuir para a caracterização de misturas betuminosas temperadas do tipo SMA, com o uso de betume não modificado com polímeros, mas aditivado em refinaria para ser possível utilizá-lo durante a produção de misturas betuminosas a temperaturas mais baixas.

O estudo iniciou-se com a recolha de elementos disponíveis na literatura, nomeadamente sobre as diversas tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas e sobre as características das misturas do tipo SMA.

Nos trabalhos laboratoriais foi feita a caracterização das misturas em estudo através de diversos ensaios, designadamente a avaliação de escorrimento de betume (ensaio de *Shellennberg*), estabilidade e deformação de Marshall, sensibilidade à água e resistência à deformação permanente.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada, tiram-se as seguintes conclusões acerca das misturas betuminosas temperadas:

- As misturas betuminosas temperadas podem ser espalhadas e compactadas utilizando as tecnologias tradicionais;
- A redução de temperatura pode ser conseguida através do uso de uma larga gama de aditivos (orgânicos, químicos ou mistos), ou através de técnicas de formação de espuma de betume;
- As tecnologias que utilizam aditivos introduzidos durante o fabrico, não necessitam de grandes alterações da central, podendo ser necessário alterações mais significativas para produção de espumas de betume;
- As misturas betuminosas temperadas apresentam um grande número de vantagens quando comparadas com as misturas a quente, particularmente no que se refere à economia de energia, o que origina uma redução das emissões de gases com efeito de estufa e poluentes;
- No que diz respeito ao transporte, uma vez que as misturas temperadas mantêm a sua trabalhabilidade a temperaturas mais baixas que as misturas a quente, é possível obter distâncias de transportes maiores ou intervalos de tempo mais longos desde o fabrico até à aplicação;

- São apontadas também algumas desvantagens, como por exemplo, os custos dos aditivos, a possível redução na resistência à deformação permanente e as dúvidas sobre a durabilidade. Estas desvantagens poderão ser compensadas pelos benefícios destas misturas.

A revisão da literatura no que diz respeito às misturas betuminosas do tipo SMA permitiu concluir o seguinte:

- As suas principais características são a existência de um esqueleto mineral robusto e descontínuo com elevado atrito interno, elevada percentagem de ligante e existência de fibras que permite evitar o escorrimento do ligante, favorecendo o revestimento dos agregados;
- No processo de fabrico não existe necessidade de utilizar equipamentos especiais, a não ser que se pretenda ter um doseador automático para a adição de fibras; a única recomendação especial é garantir que o tempo de mistura é suficiente para garantir a perfeita homogeneidade da mesma;
- As misturas SMA não necessitam de equipamento especial no seu fabrico e espalhamento;
- É recomendado o uso de cilindros pesados para a compactação;
- Em geral, apresentam um bom desempenho mecânico e oferecem boas características funcionais, além de apresentarem uma vida útil superior à das misturas do tipo AC (betão betuminoso);
- O elevado custo inicial é compensado pelo menor custo no ciclo de vida, devido à sua maior durabilidade.

A combinação de duas tecnologias, redução das temperaturas de produção com recurso a aditivos e a utilização de uma granulometria descontínua típica de uma SMA, envolvia algum grau de incerteza, uma vez que a combinação era suscetível de produzir contributos antagónicos no que se refere ao desempenho mecânico. A título de exemplo, pode referir-se a esperada boa resistência à deformação permanente das SMA e a diminuição dessa resistência pela utilização de aditivos e de temperaturas de fabrico mais baixas. Além disso, no caso da SMA-BR o betume em utilização era aditivado em refinaria, não se conhecendo os aditivos utilizados nem a percentagem incorporada.

Antes de dar início aos trabalhos experimentais foi necessário realizar um estudo sobre a mistura de agregados pretendida, tendo como referência a norma europeia EN 13108-5, definindo quatro pontos de controlo que ajudam a definir a curva granulométrica da mistura. Estes quatro pontos demonstram ser insuficientes para garantir a obtenção de uma granulometria suficientemente descontínua, pelo que se torna necessária a inclusão de outras referências que possam complementar os pontos definidos na norma europeia.

Finalizado o processo de decisão da mistura de agregados, procedeu-se ao fabrico de 12 provetes (4 com 5,5% de betume, 4 com 6,0% de betume e os restantes 4 com 6,5% de betume)

para cada mistura, SMA-BN e SMA-BR, analisando as suas propriedades volumétricas. Foram ainda realizados 6 provetes com 6,0% de betume para a mistura SMA-BN, para avaliação da sensibilidade à água e, por fim, produziram-se 4 provetes com 6,0% de betume, para ambas as misturas com a finalidade de avaliar a resistência à deformação permanente em ensaios de compressão uniaxial com aplicação de cargas repetidas.

Através de ensaios laboratoriais é possível retirar as seguintes conclusões:

- A mistura SMA-BN apresenta melhores resultados do que a mistura SMA-BR, quer nas suas propriedades volumétricas, quer nas suas características mecânicas;
- A percentagem ótima de betume foi definida com base nos resultados da avaliação das propriedades volumétricas, nomeadamente, a porosidade, VMA, VFB, e estabilidade e deformação de Marshall, sendo a percentagem ótima de 6,0%. No caso da mistura SMA-BR a percentagem ótima seria 5,5%, mas para possibilitar a comparação das duas misturas no que diz respeito à deformação permanente optou-se por considerar a mesma percentagem ótima da mistura SMA-BN;
- As propriedades volumétricas obtidas estão dentro dos limites definidos pelo *Proyecto SMA*, à exceção da porosidade para a mistura SMA-BR;
- Os resultados de estabilidade de Marshall não foram satisfatórios, tendo valores de rotura baixos e deformações altas. No entanto, de acordo com a literatura, este ensaio não permite, por si só, estudar de forma adequada misturas do tipo SMA;
- Em termos de sensibilidade à água, a mistura SMA-BN apresentou um desempenho satisfatório, estando o seu valor no limite mínimo aceitável. Para a mistura SMA-BR este ensaio não foi realizado uma vez que os resultados obtidos, por exemplo, para a estabilidade Marshall se mostraram sempre inferiores aos da mistura SMA-BN e, uma vez que esta já apresenta o valor mínimo, seria de esperar que a mistura SMA-BR tenha um mau comportamento;
- As deformações obtidas no ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente apresentam-se muito elevadas, o que não seria de esperar no caso de uma SMA; tal decorre geralmente de vários fatores, tais como uma incorreta granulometria da mistura de agregados, a utilização de betumes inadequados ou em percentagem demasiado alta, ou falta de adesividade entre os agregados e o betume.
- A aplicação de diferentes métodos de compactação para a mesma mistura induzem valores de porosidade, VMA e VFB diferentes, sendo a compactação através do compactador de Marshall a que apresentou, para estes parâmetros, resultados mais aceitáveis.

Por fim, achou-se necessário tentar perceber o que estaria a causar os problemas encontrados, pelo que se efetuou uma análise da adequação das SMA estudadas com base na resistência à deformação permanente, da qual foi possível extrair as seguintes conclusões:

- O esqueleto pétreo das misturas SMA-BN e SMA-BR pode ser melhorado, uma vez que alguns ajustes na composição levaram a melhorias dos valores em relação às misturas em estudo;

- A alteração da percentagem de betume tem influência nos resultados, obtendo-se menores deformações para percentagens de betume menores;
- As SMA a quente apresentam melhores resultados que as temperadas;
- O uso de betume duro, do tipo 10/20, contribui para a resistência à deformação permanente das SMA;
- Pequenas alterações na mistura de agregados influenciam a deformação;
- Os agregados utilizados nesta análise não apresentam problemas de adesividade, pelo que em relação às misturas em estudo os resultados não foram conclusivos em relação a este aspeto.

Como conclusão do programa experimental realizado, pode afirmar-se que a utilização de betumes convencionais, do tipo 35/50, para produzir misturas do tipo SMA temperadas não permite obter um elevado nível de resistência à deformação permanente. Além disso, verificou-se que o betume temperado utilizado, aditivado em refinaria, com a composição disponível no mercado, ainda não permite obter misturas do tipo SMA com características minimamente aceitáveis em termos de resistência à deformação permanente.

5.2 Prosseguimento de trabalhos futuros

No âmbito de desempenho estrutural, as misturas deve ser alvo de uma avaliação mais aprofundada, realizando outros ensaios, como o ensaio de *wheel-tracking*, para avaliar a resistência à deformação permanente através de outra metodologia de ensaio. Para uma caracterização mais detalhada, deveria avaliar-se a resistência ao fendilhamento por fadiga e os valores do módulo de rigidez em ensaio de flexão em quatro pontos.

Seria também útil avaliar o desempenho a longo prazo de misturas produzidas com betume aditivado em refinaria, por exemplo, através da simulação do seu envelhecimento em laboratório recorrendo a radiação ultravioleta aplicada em condições controladas.

Propõe-se, ainda, a realização de trechos experimentais, de modo a observar o comportamento destas misturas quando sujeitas a condições reais, relacionando posteriormente o seu comportamento com os valores obtidos em laboratório. Esta correlação permitirá contribuir para ajustar os valores limites de ensaio para aceitação destas misturas.

É também recomendado um estudo mais extenso com a finalidade de perceber as causas que levaram aos valores apresentados e as suas soluções, como por exemplo, avaliar as suas características com utilização de outros agregados, utilizar outro meio de compactação e avaliar a contribuição do uso de betume aditivado de refinaria em misturas de agregados de SMA já estudadas.

5.3 Considerações finais

Finalmente, tendo em conta os conhecimentos adquiridos durante o estudo efetuado e os resultados obtidos, pode considerar-se que os objetivos propostos foram atingidos. Apesar de as misturas não apresentarem os valores inicialmente esperados, todo o trabalho realizado contribui para analisar algumas dificuldades associadas ao estabelecimento de misturas do tipo SMA.

A presente dissertação pretende também contribuir, mesmo que de forma modesta, para o aumento do interesse de futuros trabalhos nesta área, assim como para a inclusão de critérios ambientais e de promoção de sustentabilidade no desenvolvimento de misturas betuminosas com carácter inovador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antunes, D. (2014). “Misturas Betuminosas Temperadas, do tipo SMA, com Incorporação de Material Betuminoso Reciclado e Fibras Celulósicas – Contribuição para a sua Caracterização”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

Bispo, F. (2013). “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas com Emulsão Betuminosa”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Blażejowski, K. (2011). “Stone Matrix Asphalt – Theory and Practice.” CRC Press-Taylor e Francis Group.

Button, J.; Estakhri, C. e Wimsatt, A. (2007). “A Synthesis of Warm-mix Asphalt”. Report FHWA/TX-07/0-5597-1. Texas, USA : Texas Transportation Institute, 2007.

Capitão, S. (2003). “Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade”. Tese de Doutoramento. Coimbra - Portugal: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2003.

Capitão, S.; Picado-Santos, L. e Martinho, F. (2012). “Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt”. Construction and Building Materials, vol. 36,1016-1024.

Carvalho, B. (2016). “Misturas Betuminosas Temperadas, do tipo SMA, com Incorporação de Material Betuminoso Reciclado: Contribuição para Avaliação de Desempenho Mecânico”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

Croteau, J.-M. and Tessier, B. (2008). “Warm Mix Asphalt Paving Technologies: A Road Builder’s Perspective”. Annual Conference of the Transportation Association of Canada.

D’Angelo, J.; Harm, E.; Bartoszek, J.; Baumgardner, G.; Corrigan, M.; Cowsert, J. 2008. “Warm-mix Asphalt: European Practice”. Report no. FHWA PL-08-007. Alexandria: FHWA, AASHTO, NCHRP, 2008.

DER-ST. (2007). “Concreto Asfáltico Tipo SMA”. ET-DE-P00/031. Departamento de Estradas de Rodagem, São Paulo.

Drüschner, L., Schäfer, V. (2000). “Stone Mastic Asphalt”. German Asphalt Association, Bonn.

EAPA. (1998). “Heavy uty Surfaces – The Arguments for SMA, European Asphalt Pavement Association.

El-Hage, R. (2012). “Estudo de misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) à luz dos compactadores Marshall e Superpave”. Dissertação de mestrado em Ciências. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Brasil.

Feita, J. (2011). “Misturas Betuminosas Incorporando por Via Seca Borracha de Pneus Usados”. Tese de Doutoramento. Coimbra - Portugal: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Ferreira, C. (2009). “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Tese de Mestrado. Portugal: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães.

FHWA. (2008). “Warm-Mix Asphalt: European Practice”. Federal Highway Administration - U.S. Department of Transportation. International Technology Scanning Program.

Fonseca, P. (2011). “Propriedades Volumétricas e Misturas Betuminosas (Com e Sem Fibras)”, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto (FEUP), Porto.

Gardete, D. (2016). “Contribuição para o estabelecimento duma mistura betuminosa adequada para o ciclo de vida através da definição na fase de formulação duma parametrização eficiente”. Tese de Doutoramento. Lisboa – Portugal. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Hurley, G., Prowell, B., 2008. “Warm Mix Asphalt: Best Practices”. National Asphalt Pavement Association. 53rd Annual Meeting.

Lopes, R. (2015). “Fabrico e Compactação de Misturas Betuminosas Temperadas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Lisboa – Portugal. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Martinho, F. (2014). “Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica”. Tese de Doutoramento. Lisboa – Portugal. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Martinho, F., Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., Miranda, H. (2013). “A Experiência Portuguesa em Misturas Betuminosas do Tipo SMA com Fibras Celulósicas”. http://www.crp.pt/docs/A45S145-27_Art_T4_7CRP_2013.pdf (consultado em dezembro 2018).

Pereira, R. (2010). “Misturas Betuminosas Temperadas: Estudos da Interação Aditivo – Ligante”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.

Prowell, B., Watson, D., Hurley, G., Brown, E. (2009). “Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for airfield pavements”, AAPTP 04-04, Final Report, Prepared for Airfield Asphalt Pavement Technology Program Auburn University.

Prowell, B., Hurley, G., Frank, B. (2011). “Warm – Mix Asphalt: Best Practices”, NAPA – National Asphalt Pavement Association, Second Edition, Lanham, MD – U.S.A.

Proyecto SMA (2014). “Propuesta de Pliego de Prescripciones Técnicas de las Mezclas Bituminosas Tipo SMA”. Mezclas SMA sostenibles medioambientalmente amigables. <http://www.proyectosma.eu/> (consultado em janeiro 2019).

Silva, H., Oliveira, J., Ferreira, C. (2009). “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/18711/1/7-XV_CILA_2009.pdf (consultado em dezembro 2018).

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

EN 1427:2007, Bitumen and bituminous binders. Determination of the softening point. Ring and Ball method. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 12697-5: 2009, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 5: Determination of the maximum density. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-6: 2012, Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-8: 2003, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of the void characteristics of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-12: 2008, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-18: 2004, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 18: Binder drainage. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-23: 2003, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-25: 2005, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 25: Cyclic compression test. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-30: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 30: Specimen preparation, impact compactor. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-34: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12697-35: 2004+2007, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 35: Laboratory mixing. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 13108-5: 2006, Bituminous mixtures – Material specifications. Part 5: Stone Mastic Asphalt. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

EN 12591:2009, Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens. Edition 2°. Comissão Europeia de Normalização, Brussels.

NP EN 13043: 2013, Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 933-1: 2012, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

APÊNDICES

APÊNDICE I – Fichas técnicas



JRS
Fibras Projectadas
Pela Natureza

VIATOP PREMIUM

Travesera de Gracia 56, Piso 2 Puerta 2
08006 Barcelona - España
Tel. +34 933 262 888
Fax: +34 933 262 889
eMail: info@jrsiberica.com
Internet: www.jrsiberica.com

FIBRAS DE CELULOSE, IMPREGNADAS E 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:

Aspeto.....	grânulos cilíndricos
Conteúdo de fibras	87 a 92 %
Comprimento médio dos grânulos.....	2 a 8 mm
Diâmetro médio dos grânulos	4 ± 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 a 25 °C (de acordo com a EN 1426)	50 / 70 (0,1 mm)
Temp. de amolecimento (ensaio 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).

J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO KG
Fibers designed by Nature
Holzmühle 1 D-73494 Rosenberg - Germany

Telephone: +49 7967 152-0
Telefax: +49 7967 152-222
Jun 2018.PT



**Fibras Projectadas
Pela Natureza**

VIATOP CT 40

Travesera de Gracia 56 Piso 2 Puerta 2
08006 Barcelona - España
Tel. +34 933 262 888
Fax: +34 933 262 889
eMail: info@jrsiberica.com
Internet: www.jrsiberica.com

FIBRAS DE CELULOSE GRANULADAS, COM CERAS

Definição

Grânulos constituídos por uma mistura especial de fibras naturais de celulose com ceras (obtidas pelo processo *Fischer-Tropsch*), para serem utilizados como aditivo na modificação de misturas betuminosas destinadas a pavimentos que requeiram elevada trabalhabilidade e tempo para aplicação, de modo a melhorar as características e o desempenho das mesmas.

Características do material

Características do granulado:

Aspecto	grânulos cilíndricos
Conteúdo de fibras.....	≈ 60 %
Conteúdo de ceras <i>Fischer-Tropsch</i>	≈ 40 %
Comprimento médio dos grânulos	3 a 12 mm
Diâmetro médio dos grânulos	3,5 ± 1 mm
Densidade aparente	430 a 570 g/l
Análise granulométrica, # < 2,0 mm	máx. 10 %
Não é tóxico e é fisiologicamente seguro	

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

Características da cera *Fischer-Tropsch*

Aspecto.....	sólido branco
Ponto de fusão	≈ 100 °C
Viscosidade a 120 °C, (DIN 51562)	> 11 mm ² /s

J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO KG
Fibers designed by Nature
Holzmühle 1 D-73494 Rosenberg - Germany

Telephone: +49 7967 152-0
Telefax: +49 7967 152-222
Out2014.Pt

Grade
plus AD 10

VIATOP

Description

VIATOP plus AD 10 is a pelletized blend of 83 % by weight ARBOCEL ZZ 8-1, 7 % by weight fatty acid polyamine condensation product and 10 % by weight bitumen

Characteristics of the pellets

Grey, cylindrical pellets

Content of ARBOCEL ZZ 8-1	~	83 %
Content of fatty acid amide amine	~	7 %
Content of bitumen	~	10 %
Average pellet length		2 mm - 8 mm
Average pellet thickness		3 mm - 5 mm
Bulk density (in accordance with DIN EN ISO 60)		450 g/l - 550 g/l
Sieve analysis: finer than 3.55 mm	max.	7 %

Characteristics of the ARBOCEL ZZ 8-1

Grey, fine fibrilled and long-fibered cellulose

Characteristics of the fatty acid polyamine condensation product

Brown solid

Characteristics of the bitumen

50/70 in accordance with DIN EN 12591

Release date: 2013-09 / 1 page



J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO KG
Fibers designed by Nature
Holzmühle 1
D-73494 Rosenberg

Telephone: +49 7967 152-0
Telefax: +49 7967 152-222



Omya Comital S.A.

Tel: + 351 229 773 590
 Fax: + 351 229 773 599
 Portugal

www.comital.pt

Micro 200 - OU

CENTRO DE PRODUÇÃO

SOURE, Portugal (certificado ISO 9001)

BREVE DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Filer de carbonato de cálcio natural.
 Em cumprimento com os requisitos normativos:
 - Marcação CE: EN 12620, EN 13139 e EN 13043.
 - Especificação LNEC E 466-2005.

ANÁLISE QUÍMICA DA MATÉRIA PRIMA ⁽¹⁾

Teor de carbonato de cálcio	98	%
Teor de carbonato	98	%
Teor de cloretos	< 0,001	%
Sulfatos solúveis em ácido	< 0,05	%
Teor de enxofre total	< 0,04	%
Carbono orgânico total	0,2	%
Qualidade dos finos	0,6	g kg ⁻¹
Silica total	< 0,5	%
Reactividade álcalis-silica	NR, classe I	

DADOS ESPECÍFICOS DO PRODUTO ⁽¹⁾

Granulometria:		
Partículas < 2 mm	100	%
Partículas < 0,125 mm	98	%
Partículas < 0,063 mm	82	%
Superfície específica Blaine	5100	cm ² g ⁻¹
Brancura L* (CIELab)	94	%
Teor de humidade ex works	0,1	%
Vazios do filer seco compactado (Rigden)	32	%
Variação da temperatura anel e bola	14	°C
Necessidade de água	21	%

DADOS GERAIS DO PRODUTO

Massa volúmica	2,7	g cm ⁻³
Densidade aparente	0,9	g cm ⁻³

APLICAÇÕES

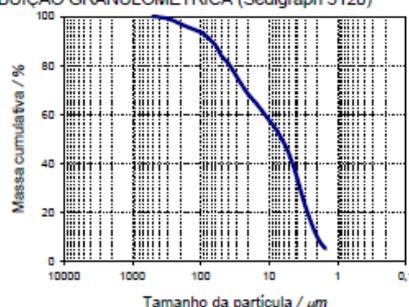
- Betão pronto
- Betão auto-compactável
- Betão projectado
- Colas de base cimento e gesso
- Argamassas
- Misturas betuminosas

EMBALAGEM
 - GRANEL



0866
 05
 0866 - CPD-2006/CE 0061
 EN 12620, EN 13043, EN 13139

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (Sedigraph 5120)



(1) - os dados apresentados são apenas indicativos.

A informação contida nesta Ficha Técnica diz respeito apenas ao material específico aqui referido e não se refere a utilização em combinação com qualquer outro material ou em qualquer processo. A informação aqui fornecida baseia-se em especificações técnicas que a Omya considera fiáveis, não fazendo a Omya qualquer declaração nem dando qualquer garantia relativamente a integridade ou precisão da mesma e não assumindo a Omya qualquer responsabilidade resultante da sua utilização ou relativa a quaisquer reivindicações, perdas ou danos a terceiros. Os receptores desta informação terão que exercer a sua própria capacidade de decisão relativamente a adequabilidade da sua utilização e é da responsabilidade do utilizador determinar a adequabilidade do material (incluindo a respectiva segurança) para um determinado fim antes da sua utilização.

edição: 24/02/2011
 PROINFO: PTOU
 I71710_L1_PT
 versão: 002

	Iberobrita, sa	Ficha de Características Técnicas do Produto		FCTP	15
				Edição	13

	1592 4	Identificação do produto	
	1592-CPD-1610	Designação Pó 0/4	Instalação de britagem IV

Características do produto	NP EN 12620	NP EN 13043	NP EN 13139	NP EN 13242
Dimensão das Partículas				
Designação (d/D)	0/4	0/4	0/4	0/4
Categoria de tolerância	G _p 85	G _A 85 G _T 20	NA	G _p 85 G _T 20
Forma das partículas do agregado grosso				
Índice de achatamento	NA	NA	NA	NA
Índice de forma	NA	NA	NA	NA
Limpeza				
Teor de finos	f ₁₅	NA	categoria 4	f ₁₅
Equivalente de areia	SE ≥80%	NA	SE ≥80%	SE ≥80%
Azul de metileno	MB10	MB _p 10	MB10	MB10
Resistência à fragmentação do agregado grosso				
Massa volumica (fracção de 0,063mm - 4mm)				
Material impermeável	2,65 Mg/m ³	2,65 Mg/m ³	2,65 Mg/m ³	2,65 Mg/m ³
Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m ³	2,61 Mg/m ³	2,61 Mg/m ³	2,61 Mg/m ³
Partículas saturadas	2,63 Mg/m ³	2,63 Mg/m ³	2,63 Mg/m ³	2,63 Mg/m ³
Absorção de água	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
Estabilidade volumétrica - retração por secagem*	0,014%	NA	NA	NA
Composição /teor				
Enxofre total*	< 0,04%	NA	< 0,04%	S ₁
Sulfetos solúveis em ácido*	AS _{0,2}	NA	AS _{0,2}	AS _{0,2}
Teor de cloretos*	< 0,001%	NA	< 0,001%	NA
Tempo de presa em minutos e resistência à compressão*	37min / 93%	NA	37min / 93%	37min / 93%
Teor em húmus* **	mais claro	NA	mais claro	NA
Contaminantes orgânicos leves*	< 0,1%	m _{LPC} 0,1	< 0,1%	< 0,1%
Descrição petrográfica* - descrição da rocha	98% de calcário e 2% de calcite, com forma subprismático a subdiscoidal, muito anguloso a subarredondado de superfície rugosa/lisa.			

Observações:	Distribuição granulométrica																																																
* Ensaio realizado com o objectivo de caracterizar a rocha	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Peneiros (mm)</th> <th>Valores típicos (%passado)</th> <th>Limite min./máx. (%passados)</th> <th>Limite min./máx. (%passados)</th> <th>Limite min./máx. (%passados)</th> <th>Limite min./máx. (%passados)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>5,6</td> <td>100</td> <td>95-100</td> <td>98-100</td> <td>95-100</td> <td>98-100</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>95</td> <td>90-100</td> <td>90-100</td> <td>90-100</td> <td>90-100</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>60</td> <td>--</td> <td>40-80</td> <td>--</td> <td>40-80</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>30</td> <td>10-50</td> <td>--</td> <td>10-50</td> <td>--</td> </tr> <tr> <td>0,25</td> <td>15</td> <td>5-45</td> <td>--</td> <td>5-45</td> <td>--</td> </tr> <tr> <td>0,063</td> <td>9</td> <td>6-12</td> <td>6-12</td> <td>6-12</td> <td>5-13</td> </tr> </tbody> </table>	Peneiros (mm)	Valores típicos (%passado)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)	8	100	100	100	100	100	5,6	100	95-100	98-100	95-100	98-100	4	95	90-100	90-100	90-100	90-100	2	60	--	40-80	--	40-80	1	30	10-50	--	10-50	--	0,25	15	5-45	--	5-45	--	0,063	9	6-12	6-12	6-12	5-13
Peneiros (mm)		Valores típicos (%passado)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)																																											
8		100	100	100	100	100																																											
5,6		100	95-100	98-100	95-100	98-100																																											
4		95	90-100	90-100	90-100	90-100																																											
2		60	--	40-80	--	40-80																																											
1		30	10-50	--	10-50	--																																											
0,25		15	5-45	--	5-45	--																																											
0,063		9	6-12	6-12	6-12	5-13																																											
" Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus.																																																	
DND – Desempenho Não Determinado.																																																	
NA - Característica não aplicável ao agregado ou à norma de aplicação																																																	

Utilização prevista	NP EN 12 620 - Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil
	NP EN 13 043 - Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas e outros trabalhos de engenharia civil
	NP EN 13 139 - Argamassas para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil
	NP EN 13 242 - Materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos e não tratados para estradas e outros trabalhos de engenharia civil

Elaborado por:	Aprovado por:	Data	Página
Filipa Gomes, Eng. ^a	Luis Lopes, Dr.	12-01-2011	1/1

Mod.161/2

Sede: Rua de Anselmo, 3100-474 Pombal • Tel. 236 200 110 • Fax. 236 200 190
www.grupojuliolepes.com • E-mail: iberobrita@grupojuliolepes.com
Pedreira: Rua de Pedreira, Barrocal, 3100-419 Pombal • Tel. 236 218 715 • Fax. 236 218 831
Objectivo Social: Extração, Produção e Comercialização de Agregados Calcários
Sociedade Anónima, Matriculada na C.R.C. de Pombal sob o nº 500 374 740 - Capital Social € 1.000.000 - Contribuinte nº 500 374 740



lena agregados

Lena Agregados, S.A.
 Quinta da Sardinha - Aparto 1014 Santa catarina da Serra
 2495-007 Santa Catarina da Serra - Portugal
07



CE

Ficha Técnica de Produto

Produto: Pó Granito CV **Centro de Produção:** Castelo de Vide

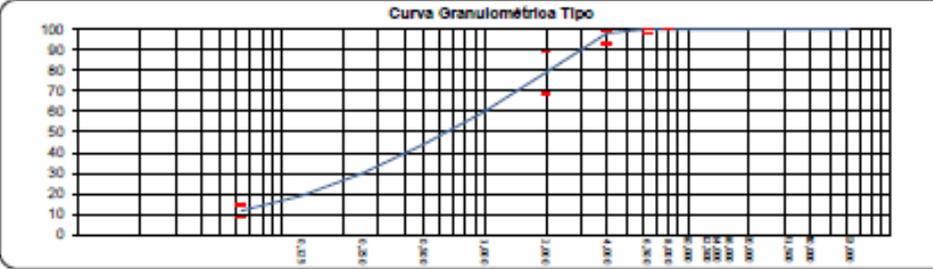
Norma de Produto: NP EN 13043 (Agregados para Misturas Betuminosas)

Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
63,000	100		
40,000	100		
31,500	100		
20,000	100		
16,000	100		
14,000	100		
12,500	100		
10,000	100		
8,000	100	100	100
6,300	100	98	100
4,000	98	93	99
2,000	79	69	89
1,000	60		
0,500	44		
0,250	30		
0,125	19		
0,063	11,7	8,7	14,7

Características	NP EN 13043
Certificados CE	1592-CPD-0409
Dimensão (d/D)	0/4 mm
Granulometria	G ₂₀₀
Tolerância da Granulometria Típica	GTC ₂₀
Teor de finos	NA
Qualidade dos Finos	MB _{2,0}
Índice de Achatamento	NA
Índice de Forma	NA
Coefficiente de Los Angeles	NA
Coefficiente de Micro-Deval	NA
Coefficiente de Polimento Acelerado	NA
Massa Volumica	
material impermeavel	2,65 Mg/m ³
partículas secas em estufa	2,62Mg/m ³
partículas saturadas	2,63 Mg/m ³
Absorção de Água	0,4 %
Baridade	1,61 Mg/m ³
Porcentagem de Vazios	39 %
Teor de Cloretos	NA
Teor de sulfuretos	NA
Reacção álcali-silica	NA
Sulfatos solúveis em ácido	NA
Teor de enxofre	NA
Teor de Húmus	NA
Teor de ácido fúlvico	NA
Contaminantes Leves	NA
Contaminantes orgânicos pelo método da argamassa	
Aumento do tempo de presa	NA
Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias	NA
Retracção por secagem	NA

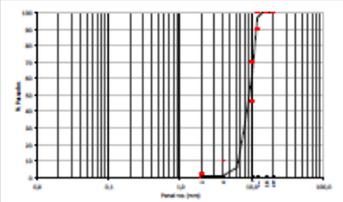
Observações:
NA - Não aplicável

Curva Granulométrica Tipo



Elaborou: (ORIGINAL ASSINADO) Aprovou: (ORIGINAL ASSINADO) Emitido: 27-03-2009

Doc.L89
1/1

		Ficha Técnica do Produto		DQ.ES.003/5 09-02-2011 Página 1 de 1		
IRMÃOS CAVACO SA. RUA VIANA DA MOTA, 8 • APARTADO 7 4524-909 ST.ª MARIA DA FEIRA • PORTUGAL 04 0866-CPD-2004/CE.011				 0866		
Origem:		"PEDREIRA DA MALAPOSTA" Nº 4655		Produto: 4/12		
UTILIZAÇÃO	EN 12620	Agregados para betão				
	EN 13043	Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação				
	EN 13242	Agregados para materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária				
CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO						
<i>Características</i>						
		EN 12620	EN 13043	EN 13242		
Dimensão das partículas						
Designação (d/D)		4/12	4/12	4/12		
Granulometria		G _c 90-15 G ₁ 15	G _c 90-15 G _{20/25}	G _c 85-15 GT _{20/15}		
Forma das partículas						
Índice de achatamento		F ₁₅	F ₁₅	F ₁₀		
Índice de forma		S ₁₅	S ₁₅	S ₁₀		
Massa volúmica das partículas						
Material impermeável		2,62 ^{+0,05} Mg/m ³	2,62 ^{+0,05} Mg/m ³	2,62 ^{+0,05} Mg/m ³		
Partículas secas em estufa		2,59 ^{+0,05} Mg/m ³	2,59 ^{+0,05} Mg/m ³	2,59 ^{+0,05} Mg/m ³		
Partículas saturadas		2,61 ^{+0,05} Mg/m ³	2,61 ^{+0,05} Mg/m ³	2,61 ^{+0,05} Mg/m ³		
Absorção de água		0,6 ^{+0,1} %	0,6 ^{+0,1} %	0,6 ^{+0,1} %		
Baridade		1,38 ^{+0,1} Mg/m ³	1,38 ^{+0,1} Mg/m ³	1,38 ^{+0,1} Mg/m ³		
Limpeza						
Teor em finos		F ₁₅	f ₂	f ₂		
Equivalente de areia		NA	NA	NA		
Azul de metileno		NA	NA	NA		
Percentagem de partículas britadas		NA	C _{130/0}	C _{80/0}		
Resistência à fragmentação *		LA ₂₀	LA ₂₀	LA ₂₀		
Resistência ao polimento/abrasão/desgaste						
Coefficiente de polimento acelerado *		PSV ₅₀	PSV ₅₀	NA		
Resistência ao desgaste do agregado grosso *		M _{0,1} 10	M _{0,1} 10	M _{0,1} 20		
Composição/teor						
Cloretos solúveis *		0,009%	NA	NA		
Teor de húmus **		Mais clara	NA	NA		
Retração por secagem *		0,027%	NA	NA		
Contaminantes orgânicos leves *		NA	m ₁₀₀ 0,10%	NA		
Sulfatos solúveis em ácido *		AS _{0,2}	NA	AS _{0,2}		
Enxofre total *		<1 %	NA	S ₁		
Durabilidade face ao gelo-degelo *		MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈		
Descrição petrográfica *	Rocha metamórfica – Gnaiss. Estrutura bandada gnaissica com textura granoblástica. Sá a pouco alterada com superfície áspera e baixa porosidade.					
		DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA				
		Peneiros	Valores Típicos	Limites	Limites	Limites
		(mm)	(% passados)	Min./Max. (% passados)	Min./Max. (% passados)	Min./Max. (% passados)
		20	100	100	100	100
		16	100	98 a 100	100	98 a 100
		12	97	90 a 100	90 a 100	85 a 100
		10	61	46 a 70	46 a 76	46 a 76
4	1	0 a 15	0 a 10	0 a 15		
2	1	0 a 5	0 a 2	0 a 5		
DWI – Intemperismo não acelerado; AEL – Característica não aplicável ao agregado na forma de grãos; AIF – Friabilidade não requerido * Estado executado no/ou produto da mesma origem; ** Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus						
APROVADO:  Rui Régo						



Lena Agregados, S.A.
Quita da Sardinha - Aperto 1014 Santa Catarina da Serra
2408-907 Santa Catarina da Serra - Portugal
07



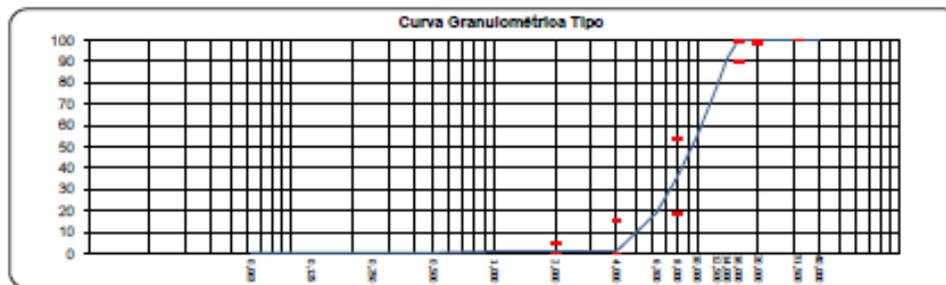
Ficha Técnica de Produto

Produto: Brita Granito Nº1 CV Centro de Produção: Castelo de Vide
Norma de Produto: NP EN 12620 (Agregados para Betão) ; NP EN13043 (Agregados para Misturas Betuminosas)

Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
40,000	100		
31,500	100	100	100
20,000	100	98	100
16,000	100	90	99
14,000	91		
12,500	78		
10,000	55		
8,000	36	19	54
6,300	19		
4,000	1	0	13
2,000	1	0	5
1,000	1		
0,500	0		
0,250	0		
0,125	0		
0,063	0,3		

Características	NP EN 13043	NP EN 12620
Certificados CE 1592-CPD-0409		
Dimensão (d/D)	4/16 mm	4/16 mm
Granulometria	GC _{90/15}	GC _{90/15}
Tolerância da Granulometria Típica	G _{20/12,5}	G _{12,5}
Teor de finos	f _{1,5}	f _{1,5}
Qualidade dos Finos	NA	NA
Índice de Achatamento	F _{1,5}	F _{1,5}
Índice de Forma	S ₁₀	S ₁₀
Coefficiente de Los Angeles	LA ₁₀	LA ₁₀
Coefficiente de Micro-Deval	M ₁₀₋₁₀	M ₁₀₋₁₀
Coefficiente de Polimento Acelerado	PSV ₁₆	PSV ₁₆
Massa Volumica		
material impermeavel	2,65 Mg/m3	
partículas secas em estufa	2,60Mg/m3	
partículas saturadas	2,62Mg/m3	
Absorção de Água	0,7 %	
Baridade	1,38 Mg/m3	
Percentagem de Vazios	48 %	
Teor de Cloretos	≤ 0,01%	
Teor de sulfuretos	≤ 0,01%	
Reacção álcalis-silica	Não Reactivo	
Sulfatos solúveis em	AS _{1,5}	
Teor de enxofre	0,04%	
Teor de Húmus	NA	
Teor de ácido fúlvico	NA	
Contaminantes Leves	NA	
Contaminantes orgânicos pelo método da argamassa		
Aumento do tempo de presa	NA	
Diminuição de resistência à compressão aos 28 dias	NA	
Retracção por secagem	NA	

Observações:
NA - Não aplicável



Elaborou: (ORIGINAL ASSINADO) Aprovou: (ORIGINAL ASSINADO) Emitido: 27-03-2009

APÊNDICE II – Análise granulométrica

Formulação da mistura de agregados

Quadro II.1 – Valores obtidos da análise granulométrica da mistura em estudo

Curva em estudo SMA - real					Curva em estudo SMA - teórica
Peneiro (mm)	Massa de retidos	Retidos acumulados	Passados acumulados	Percentagem de passados acumulados	Percentagem de passados acumulados
20	0	0	1122,5	100,00	100
16	0	0	1122,5	100,00	100
14	0	0	1122,5	100,00	98,89
12,5	53	53	1069,5	95,28	97,78
10	402	455	667,5	59,47	71,14
8	301,1	756,1	366,4	32,64	56,34
6,3	66,4	822,5	300	26,73	43,76
4	6,5	829	293,5	26,15	26,74
2	41,4	870,4	252,1	22,46	24,08
1	42,6	913	209,5	18,66	19,76
0,5	33,3	946,3	176,2	15,70	16,38
0,25	35,8	982,1	140,4	12,51	13,52
0,125	29	1011,1	111,4	9,92	10,54
0,063	34,3	1045,4	77,1	6,87	7,92
base	77,1	1122,5			

Quadro II.2 – Resultado da análise granulométrica do material de dimensão 4/12mm

Brita 4/12 - real					Brita 4/12
Peneiro (mm)	Massa de retidos	Retidos acumulados	Passados acumulados	Percentagem de passados acumulados	Percentagem de passados acumulados
20	-	-	-	100	100,00
16	-	-	-	100	100,00
14	-	-	-	100	98,50
12,5	40,7	40,7	1432,9	97,24	97,00
10	548,3	589	884,6	60,03	61,00
8	563,5	1152,5	321,1	21,79	41,00
6,3	176,5	1329	144,6	9,81	24,00
4	46,7	1375,7	97,9	6,64	1,00
2	30	1405,7	67,9	4,61	1,00
1	13,7	1419,4	54,2	3,68	0,00
0,5	6,7	1426,1	47,5	3,22	0,00
0,25	5,9	1432	41,6	2,82	0,00
0,125	5,7	1437,7	35,9	2,44	0,00
0,063	9,4	1447,1	26,5	1,80	0,00
base	26,5	1473,6			

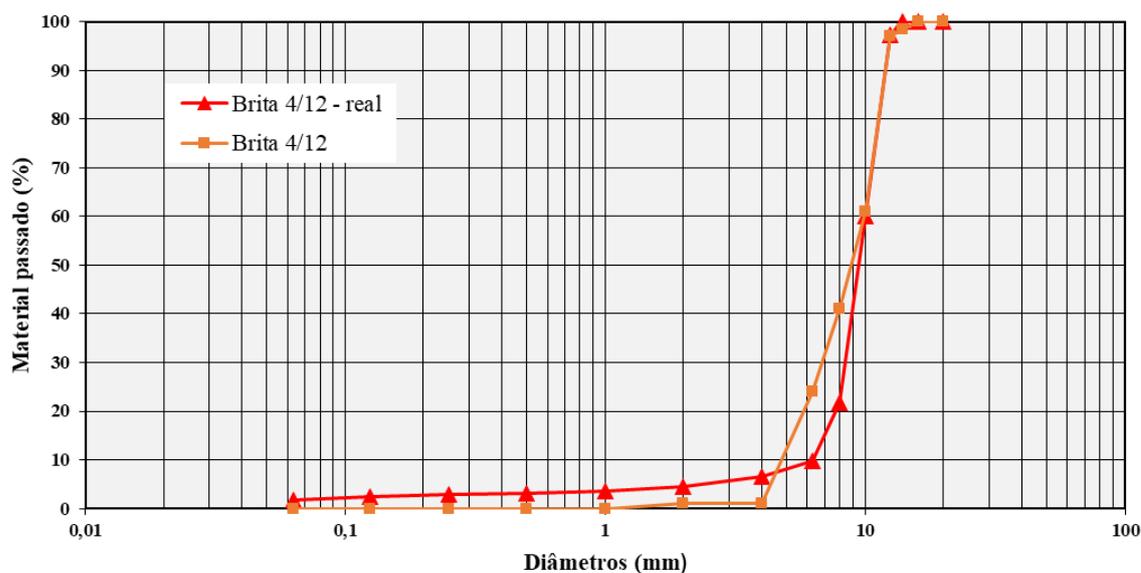


Figura II.1 – Comparação da curva resultante da análise granulométrica do material de dimensão 4/12 com a curva teórica

Quadro II.3 – Resultado da análise granulométrica do material de dimensão 0/4mm, granítico

Pó 0/4 - real					Pó 0/4
Peneiro (mm)	Massa de retidos	Retidos acumulados	Passados acumulados	Percentagem de passados acumulados	Percentagem de passados acumulados
20	-	-	-	100	100,00
16	-	-	-	100	100,00
14	-	-	-	100	100,00
12,5	0	0	432,4	100,00	100,00
10	0	0	432,4	100,00	100,00
8	0	0	432,4	100,00	100,00
6,3	0	0	432,4	100,00	100,00
4	1,2	1,2	431,2	99,72	100,00
2	83,6	84,8	347,6	80,39	86,70
1	76,9	161,7	270,7	62,60	68,80
0,5	62	223,7	208,7	48,27	51,90
0,25	66,1	289,8	142,6	32,98	37,60
0,125	55,6	345,4	87	20,12	23,30
0,063	40	385,4	47	10,87	15,00
base	47	432,4			

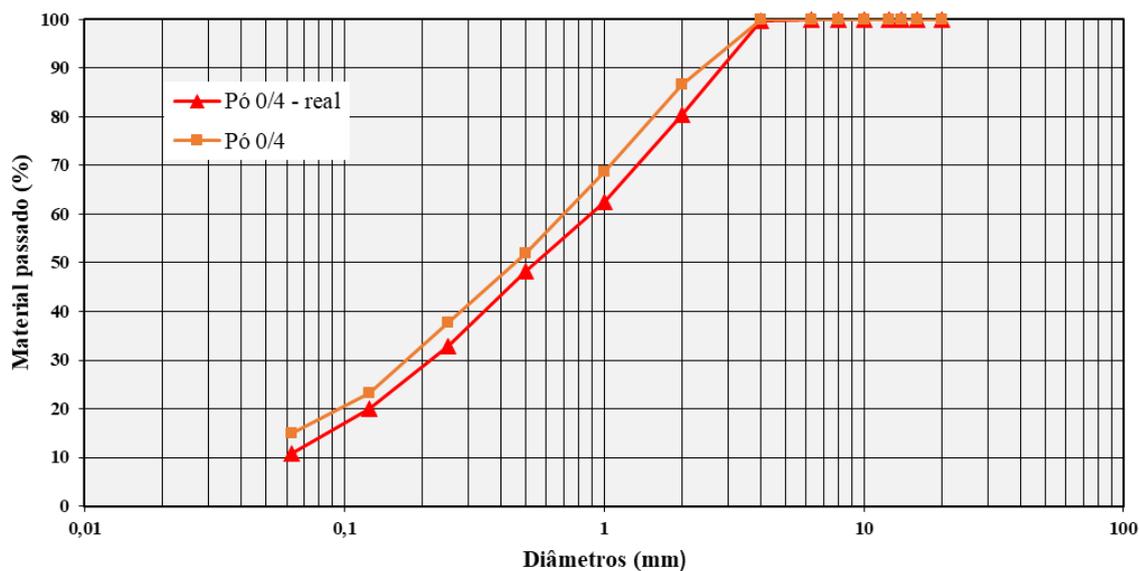


Figura II.2 – Comparação da curva resultante da análise granulométrica do material de dimensão 0/4mm com a curva teórica

Quadro II.4 – Repartição do material de dimensão 0/4mm, calcário, em duas frações

Fração 0/2					Fração 2/4			
Peneiro (mm)	Massa de retidos	Retidos acum.	Passados acum.	Percentagem de passados acumulados	Massa de retidos	Retidos acum.	Passados acum.	Percentagem de passados acumulados
20	-	-	-	100	-	-	-	100
16	-	-	-	100	-	-	-	100
14	-	-	-	100	-	-	-	100
12,5	0	0	59,4	100,00	0	0	157,6	100,00
10	0	0	59,4	100,00	0	0	157,6	100,00
8	0	0	59,4	100,00	0	0	157,6	100,00
6,3	0	0	59,4	100,00	0,6	0,6	157	99,62
4	0	0	59,4	100,00	19	19,6	138	87,56
2	0	0	59,4	100,00	131,7	151,3	6,3	4,00
1	24	24	35,4	59,60	4,2	155,5	2,1	1,33
0,5	13,2	37,2	22,2	37,37	0,3	155,8	1,8	1,14
0,25	9,6	46,8	12,6	21,21	0,6	156,4	1,2	0,76
0,125	4,9	51,7	7,7	12,96	0,5	156,9	0,7	0,44
0,063	2,9	54,6	4,8	8,08	0,4	157,3	0,3	0,19
base	4,8	59,4	-	-	0,3	157,6	-	-

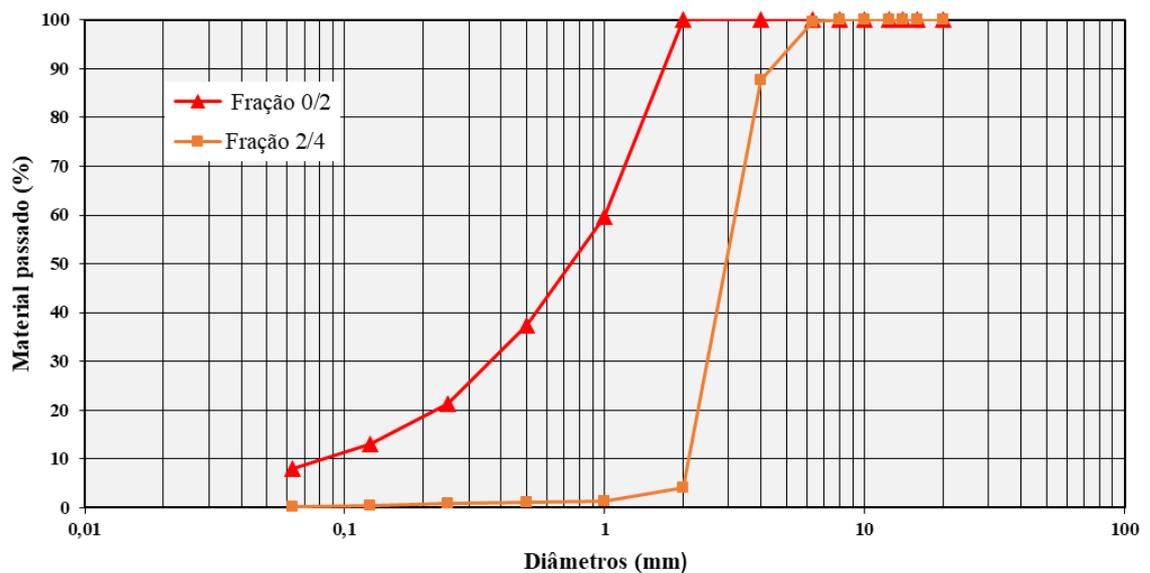


Figura II.3 – Representação gráfica das frações 0/2 e 2/4mm, graníticas

Análise com base na deformação permanente

Quadro II.5 – Análise granulométrica da mistura SMA

Peneiro (mm)	SMA - real				SMA - teórica
	Massa de retidos	Retidos acumulados	Passados acumulados	Percentagem de passados acumulados	Percentagem de passados acumulados
20	0	0	2020,2	100,00	100,00
16	0	0	2020,2	100,00	100,00
14	3,4	3,4	2016,8	99,83	100,00
12,5	19,3	22,7	1997,5	98,88	99,28
10	209,9	232,6	1787,6	88,49	82,94
8	396,8	629,4	1390,8	68,84	54,57
6,3	424,6	1054	966,2	47,83	43,30
4	465,7	1519,7	500,5	24,77	28,05
2	65,5	1585,2	435	21,53	22,08
1	54,6	1639,8	380,4	18,83	18,95
0,5	46,8	1686,6	333,6	16,51	16,26
0,25	53,3	1739,9	280,3	13,87	13,42
0,125	63,3	1803,2	217	10,74	11,84
0,063	129,9	1933,1	87,1	4,31	9,19
base	87,1	2020,2			

Quadro II.6 – Valores da análise granulométrica ao material de dimensão 4/16mm

Peneiro (mm)	Brita 4/16 - real				Brita 4/16 - teórica
	Massa de retidos	Retidos acumulados	Passados acumulados	Percentagem de passados acumulados	Percentagem de passados acumulados
20	0	0	1993,67	100,00	100,00
16	0	0	1993,67	100,00	100,00
14	0	0	1993,67	100,00	100,00
12,5	9,23	9,23	1984,44	99,54	99,00
10	346,43	355,66	1638,01	82,16	76,30
8	631,96	987,62	1006,05	50,46	36,90
6,3	536,81	1524,43	469,24	23,54	21,60
4	436,7	1961,13	32,54	1,63	0,90
2	12,51	1973,64	20,03	1,00	0,80
1	2,06	1975,7	17,97	0,90	0,80
0,5	0,89	1976,59	17,08	0,86	0,70
0,25	1,36	1977,95	15,72	0,79	0,70
0,125	1,76	1979,71	13,96	0,70	0,70
0,063	4	1983,71	9,96	0,50	0,50
base	9,96	1993,67			

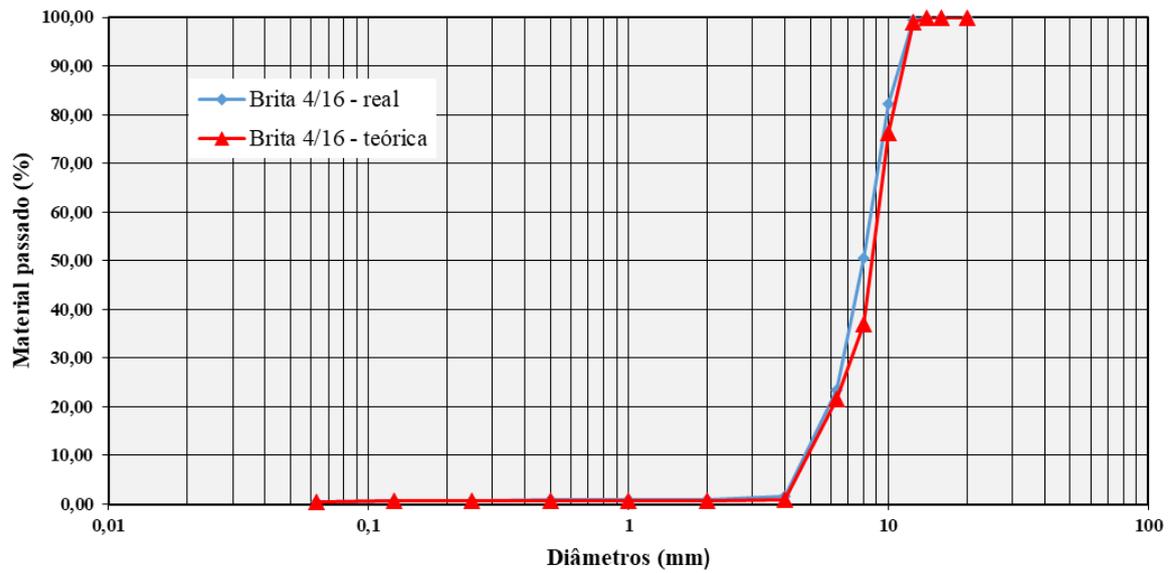


Figura II.4 – Comparação da curva resultante da análise granulométrica do material de dimensão 4/16mm com a curva teórica

APÊNDICE III – Estudo da mistura SMA-BN

Quadro III.1 – Composição dos provetes Marshall

Grupo de amostras	Betume (%)	Massa de betume (g)	Brita 4/12 (%)	Massa Brita 4/12 (g)	Fração 2/4 (%)	Massa Fração 2/4 (g)	Fração 0/2 (%)	Massa Fração 0/2 (g)	Filler (%)	Massa Filler (g)
1	5,5	63	76	825,9	6	65,2	9	97,8	9	97,8
2	6,0	69		821,6		64,9		97,3		97,3
3	6,5	75		817,2		64,5		96,8		96,8

Quadro III.2 – Características volumétricas dos provetes

Provete	Betume (%)	Massa do provete (g)			Temp. da água (°C)	Densidade da água (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Porosidade (média,%)	VMA (%)	VMA (média,%)	VFB (%)	VFB (média,%)
		Pesado ao ar	Imerso em água	Saturado com a Superfície Seca											
1.1	5,5	1067,0	603,6	1080,2	20,4	998,2	2235	2250	2420	7,6	7,0	19,74	19,20	61,28	63,47
1.2	5,5	1100,0	622,0	1107,7	19,1	998,5	2261			6,6		18,81		65,07	
1.3	5,5	1100,3	623,7	1108,6	20,7	998,2	2265			6,4		18,67		65,69	
1.4	5,5	1087,7	614,1	1099,0	20,8	998,2	2239			7,5		19,60		61,84	
2.1	6,0	1086,4	610,3	1094,2	19,9	998,3	2241	2264	2402	6,7	5,7	19,94	19,11	66,38	70,04
2.2	6,0	1107,2	624,7	1110,6	19,1	998,5	2275			5,3		18,72		71,76	
2.3	6,0	1092,0	618,7	1098,1	20,8	998,1	2274			5,3		18,76		71,59	
2.4	6,0	1072,7	607,8	1080,1	20,9	998,1	2267			5,6		19,01		70,43	
3.1	6,5	1045,8	583,5	1052,8	19,1	998,5	2225	2218	2385	6,7	7,0	20,94	21,21	67,97	66,89
3.2	6,5	1061,0	591,4	1069,5	19,9	998,3	2215			7,1		21,30		66,53	
3.3	6,5	1065,3	593,6	1073,3	19,1	998,5	2217			7,0		21,23		66,82	
3.4	6,5	1103,9	614,9	1112,9	20,6	998,2	2213			7,2		21,37		66,25	

Quadro III.3 – Resultados do ensaio de compressão de Marshall

Provete	Betume (%)	Altura (mm)	Correção	Força (kN)	Estabilidade corrigida (kN)	Estabilidade média (kN)	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1.5	5,5	70,1	0,859	4,75	4,08	4,81	9,223	8,836
1.6	5,5	71,4	0,830	6,11	5,07		7,479	
1.7	5,5	69,2	0,879	6,17	5,42		12,762	
1.8	5,5	70,2	0,857	5,43	4,65		5,881	
2.5	6,0	68,8	0,888	5,46	4,85	5,57	6,730	7,113
2.6	6,0	69,5	0,872	6,37	5,56		7,650	
2.7	6,0	70,1	0,859	6,68	5,74		6,024	
2.8	6,0	69,5	0,872	7,04	6,14		8,046	
3.5	6,5	67,6	0,916	4,85	4,44	4,24	11,058	8,063
3.6	6,5	66,5	0,942	3,69	3,48		7,440	
3.7	6,5	69,4	0,874	4,32	3,78		8,600	
3.8	6,5	67,8	0,911	5,79	5,28		5,153	

O estudo da mistura betuminosa, formulada para verificação da sensibilidade à água, encontra-se abaixo apresentado. Os provetes Marshall foram fabricados com a percentagem ótima em betume (6,0%).

Quadro III.4 – Características dos provetes para avaliação da sensibilidade à água

Provete	Betume (%)	Altura média (mm)	Diâm. (mm)	Massa do provete (g)			Temp. água (°C)	Densidade da água (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)
				Pesado ao ar	Imerso em água	Saturado com a Superfície Seca			
S A	6,0	70,2	101,0	1126,8	628,4	1134,7	10,6	1,00264	2225
S B	6,0	71,0	101,0	1122,2	620	1130,6	10,6	1,00264	2197
S C	6,0	71,5	101,0	1146	632	1153,5	10,6	1,00264	2197
S D	6,0	71,0	101,0	1143,6	637,1	1151	10,6	1,00264	2225
S E	6,0	69,5	101,0	1106	616,5	1113,9	10,6	1,00264	2223
S F	6,0	71,2	101,0	1194,2	659,3	1197,7	10,6	1,00264	2217

Quadro III.5 – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITSR

Grupos	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"		
	S A	S B	S C	S D	S E	S F
Características dos provetes						
Massa do provete (arredondado a 0,1 g)	1126,8	1122,2	1146	1143,6	1106	1194,2
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	101	101	101	101	101	101
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	70,2	71,0	71,5	71,0	69,5	71,2
Altura média (mm)	70,9			70,6		
Diferença entre a altura média dos dois grupos (arredondada a 0,1 mm) não deve exceder os 5mm	0,3					
Volume geométrico do provete (cm ³)	562,4	568,8	572,8	568,8	556,8	570,4
Baridade geométrica média (g/cm ³)	2,003	1,973	2,001	2,010	1,986	2,093
Massa do provete imerso em água (arredondado a 0,1g)	628,4	620	632	637,1	616,5	659,3
Massa do provete saturado com superfície seca	1134,7	1130,6	1153,5	1151	1113,9	1197,7
Valor k de correção	1,0026 4	1,0026 4	1,0026 4	1,0026 4	1,0026 4	1,0026 4
Baridade SSD	2225	2197	2197	2225	2223	2217
Baridade SSD média	2206			2222		
A diferença da baridade imersa média dos dois grupos de provetes (g/cm ³) não deve exceder os 0,015 g/cm ³ (15 kg/m ³)	15					
Características dos provetes depois de vácuo						
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	-	-	-	101	101	101
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	-	-	-	71	69,5	71,2
Volume do provete (cm ³)	-	-	-	568,8	556,8	570,4
O aumento do volume dos provetes após o vácuo não deve exceder 2%	NA			568,8 0,0%	556,8 0,0%	570,4 0,0%
Ensaio de tração indireta EN 12697-23						
Tempo de condicionamento (h)	2h a 15°C			68 a 72h a 40°C e 2h a 15°C		
Temperatura de ensaio (°C)	15°C					
Resistência máxima (kN)	10,73	9,31	9,52	5,48	5,65	9,38
Resistência média (kN)	9,85			6,84		
Tração indireta ITS (GPa)	0,0009 6	0,0008 3	0,0008 4	0,0004 9	0,0005 1	0,0008 3
Tração indireta média ITS (GPa)	0,00088			0,00061		
Tração indireta média ITS (kPa)	876			610		
Resistência Conservada em Tração Indireta ITSR (%)	70					

De seguida são apresentados os resultados para a deformação permanente, os provetes foram realizados para a percentagem ótima (6,0%).

Quadro III.6 – Características volumétricas dos provetes para avaliação da resistência à deformação permanente

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
B1	61,2	2216	2227	2402	7,8	7,3	20,84	20,45	62,78	64,34
B2	60,9	2213			7,9		20,93		62,46	
B3	60,5	2237			6,9		20,08		65,77	
B4	62,5	2241			6,7		19,94		66,35	

Quadro III.7 – Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente

Provete	h1	n1	hn	n	fc (με/ciclo)	fc médio (με/ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ε3600 (%)	ε3600 médio (%)
B1	23972,52	3600	14527,81	1800	5,247	7,330	1,460	2,067	61,2	2,386	3,370
B2	25392,42	2000	11408,04	500	9,323		2,440		60,9	4,007	
B3	30818,31	3600	18102,33	1800	7,064		1,863		60,5	3,079	
B4	26148,96	2100	13849,87	500	7,687		2,504		62,5	4,007	

APÊNDICE IV – Estudo da mistura SMA-BR

Quadro IV.1 – Composição dos provetes Marshall

Grupo de amostras	Betume (%)	Massa de betume (g)	Brita 4/12 (%)	Massa Brita 4/12 (g)	Fração 2/4 (%)	Massa Fração 2/4 (g)	Fração 0/2 (%)	Massa Fração 0/2 (g)	Filler (%)	Massa Filler (g)
4	5,5	63	76	825,9	6	65,2	9	97,8	9	97,8
5	6,0	69		821,6		64,9		97,3		
6	6,5	75		817,2		64,5		96,8		

Quadro IV.2 – Características volumétricas dos provetes para a mistura SMA-BR

Provete	Betume (%)	Massa do provete (g)			Temp. da água (°C)	Densidade da água (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Porosidade (média,%)	VMA (%)	VMA (média,%)	VFB (%)	VFB (média,%)
		Pesado ao ar	Imerso em água	Saturado com a Superfície Seca											
4.1	5,5	1128,5	642,2	1132,4	10,7	999,7	2301	2278	2427	5,2	6,1	17,36	18,18	70,10	66,34
4.2	5,5	1129,1	639,8	1138,0	10,7	999,7	2266			6,6		18,62			
4.3	5,5	1165,1	660,9	1173,3	11,2	999,7	2273			6,3		18,37			
4.4	5,5	1121,4	634,4	1127,5	11,2	999,7	2273			6,3		18,37			
5.1	6,0	1163,5	649,4	1168,8	11,3	999,7	2239	2238	2410	7,1	7,1	20,01	20,06	64,55	64,37
5.2	6,0	1126,7	631,2	1136,2	11,3	999,7	2230			7,5		20,33			
5.3	6,0	1110,7	621,0	1115,5	11,3	999,7	2245			6,8		19,80			
5.4	6,0	1113,6	624,8	1122,5	11,3	999,7	2237			7,2		20,08			
6.1	6,5	1108,6	617,2	1114,0	11,2	999,7	2231	2234	2393	6,8	6,6	20,71	20,61	67,32	67,76
6.2	6,5	1121,7	624,6	1124,9	11,2	999,7	2241			6,4		20,36			
6.3	6,5	1141,1	632,6	1144,6	11,2	999,7	2228			6,9		20,82			
6.4	6,5	1121,2	627,2	1128,4	11,2	999,7	2236			6,6		20,54			

Quadro IV.3 – Resultados do ensaio de compressão de Marshall para a mistura SMA-BR

Provete	Betume (%)	Altura (mm)	Correção	Força (kN)	Estabilidade corrigida (kN)	Estabilidade média (kN)	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
4.1	5,5	66,6	0,940	4,28	4,02	3,27	7,417	7,687
4.2	5,5	69,8	0,865	3,41	2,95		6,899	
4.3	5,5	70,0	0,861	3,41	2,94		7,028	
4.4	5,5	69,8	0,865	3,67	3,18		9,403	
5.1	6,0	71,1	0,837	3,00	2,51	2,45	7,240	7,961
5.2	6,0	70,7	0,846	2,73	2,31		6,735	
5.3	6,0	67,4	0,921	2,67	2,46		9,182	
5.4	6,0	71,0	0,839	2,99	2,51		8,686	
6.1	6,5	68,6	0,893	4,01	3,58	2,99	8,355	7,601
6.2	6,5	68,6	0,893	3,79	3,38		7,656	
6.3	6,5	71,0	0,839	2,86	2,40		6,088	
6.4	6,5	69,6	0,870	2,98	2,59		8,306	

De seguida são apresentados os resultados para a deformação permanente, os provetes foram realizados para a percentagem ótima (6,0%).

Quadro IV.4 – Características volumétricas dos provetes para avaliação da resistência à deformação permanente (SMA-BR)

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
BR1	60,08	2190	2192	2410	9,1	9,0	21,78	21,68	58,01	58,39
BR2	61,73	2182			9,5		22,05		57,10	
BR3	60,63	2181			9,5		22,07		57,01	
BR4	61,13	2217			8,0		20,81		61,45	

Quadro IV.5 – Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente (SMA-BR)

Provete	h1	n1	hn	n	fc (µε/ciclo)	fc médio (µε/ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ε ₃₆₀₀ (%)	ε ₃₆₀₀ médio (%)
BR1	29410,33	300	8437,97	50	83,889	50,469	2,446	2,457	60,08	4,072	4,035
BR2	27929,72	450	11396,21	100	47,239		2,496		61,73	4,043	
BR3	25604,67	450	8979,42	100	47,501		2,435		60,63	4,016	
BR4	23045,11	800	6771,09	100	23,249		2,450		61,13	4,008	

APÊNDICE V – Estudo com base na deformação permanente

Quadro V.1 – Composição dos provetes 1,2 e 3

Amostras	Betume (%)	Massa de betume (g)	Brita 4/16 (%)	Massa Brita 4/16 (g)	Pó 0/4 granítico (%)	Massa pó 0/4 (g)	Filler (%)	Massa Filler (g)
1,2,3	6,0	129	70	1414,7	22	444,6	8	161,7

Quadro V.2 – Características volumétricas dos provetes 1,2 e 3

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
1	55,15	2234	2213	2420	7,7	8,6	20,87	21,62	63,21	60,52
2	55,23	2185			9,7		22,60		57,11	
3	55,33	2219			8,3		21,41		61,22	

Quadro V.3 – Resultado ensaio deformação permanente para os provetes 1,2e 3

Provete	h1	n1	hn	n	fc (με/ciclo)	fc médio (με/ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ε3600 (%)	ε3600 médio (%)
1	17450,91	3600	10170,62	1800	4,045	5,583	0,962	1,709	55,2	1,745	3,093
2	17558,65	2400	5011,14	200	5,703		1,943		55,2	3,518	
3	17724,66	2000	4423,63	100	7,001		2,221		55,3	4,015	

Nos seguintes provetes (I, II, III) a composição da mistura é a mesma dos anteriores, o que sofreu alterações foi o tipo de ligante, em vez de se utilizar o betume 35/50, usou-se um mais duro, o 10/20.

Quadro V.4 – Características volumétricas dos provetes I, II e III

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
I	56,98	2226	2229	2428	8,3	8,2	21	21	60,7	61,102
II	58,68	2227			8,3		21		60,8	
III	59,13	2235			8,0		21		61,8	

Quadro V.5 – Deformação permanente para os provetes I, II e III

Provete	h1	n1	hn	n	fc ($\mu\epsilon$ /ciclo)	fc médio ($\mu\epsilon$ /ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ϵ_{3600} (%)	ϵ_{3600} médio (%)
I	13103,10	3600	8819,76	1800	2,380	4,365	0,748	1,395	57,0	1,313	2,386
II	22740,17	2100	10071,83	200	6,668		2,351		58,7	4,006	
III	18375,53	3600	11087,72	1800	4,049		1,086		59,1	1,838	

Os provetes apresentados de seguida têm a mesma composição dos 1, 2 e 3 diferenciando nas fibras utilizadas, sendo estas as *Viatop AD 10*, e na percentagem de betume (5,7%).

Quadro V.6 – Características volumétricas dos provetes A, B e C

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m^3)	Baridade média (kg/m^3)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m^3)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
A	58,35	2247	2254	2431	7,6	7,3	20,16	19,92	62,54	63,50
B	57,80	2253			7,3		19,95		63,37	
C	57,30	2262			7,0		19,64		64,60	

Quadro V.7 – Valores da resistência à deformação permanente dos provetes A, B e C

Provete	h1	n1	hn	n	fc ($\mu\epsilon$ /ciclo)	fc médio ($\mu\epsilon$ /ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ϵ_{3600} (%)	ϵ_{3600} médio (%)
A	13994,85	3600	9092,75	1800	2,723	2,813	0,817	0,831	58,4	1,399	1,437
B	16257,70	3600	9900,67	1800	3,532		0,940		57,8	1,626	
C	12850,13	3600	8921,72	1800	2,182		0,736		57,3	1,285	

De seguida é aplicada a regra 30/20/10.

Quadro V.8 – Composição dos provetes N1, N2 e N3

Amostras	Betume (%)	Massa de betume (g)	Brita 4/16 (%)	Massa Brita 4/16 (g)	Pó 0/4 granítico (%)	Massa pó 0/4 (g)	Filler (%)	Massa Filler (g)
N1,N2,N3	5,7	128,3	75	1591,3	15	318,3	10	212,7

Quadro V.9 – Propriedades volumétricas dos provetes N1, N2 e N3

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
N1	59,90	2168	2181	2421	10,5	9,9	22,62	22,15	53,76	55,25
N2	60,58	2188			9,6		21,89		56,09	
N3	60,38	2187			9,7		21,94		55,91	

Quadro V.10 – Resultados da deformação permanente dos provetes N1, N2 e N3

Provete	h1	n1	hn	n	fc (με/ciclo)	fc médio (με/ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ε3600 (%)	ε3600 médio (%)
N1	18246,73	2000	7311,43	200	6,075	13,868	2,366	2,407	59,9	3,949	3,993
N2	29113,65	1300	11735,12	150	15,112		2,436		60,6	4,022	
N3	32152,32	1000	14797,22	150	20,418		2,419		60,4	4,007	

De seguida são apresentados os resultados para os provetes M1, M2 e M3, em que se voltou à composição dos provetes A, B e C e trocou-se as fibras *Viatop AD 10* por *Viatop Premium*.

Quadro V.11 – Composição dos provetes M1, M2 e M3

Amostras	Betume (%)	Massa de betume (g)	Brita 4/16 (%)	Massa Brita 4/16 (g)	Pó 0/4 granítico (%)	Massa pó 0/4 (g)	Filler (%)	Massa Filler (g)
M1,M2,M3	5,7	128,3	70	1485,2	22	466,8	8	169,7

Quadro V.12 – Propriedades volumétricas dos provetes M1, M2 e M3

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
M1	57,35	2282	2261	2431	6,1	7,0	18,93	19,69	67,63	64,49
M2	56,53	2261			7,0		19,69		64,41	
M3	56,00	2239			7,9		20,45		61,42	

Quadro V.13 – Resultados do ensaio de deformação permanente para os provetes M1, M2 e M3

Provete	h1	n1	hn	n	fc ($\mu\epsilon$ /ciclo)	fc médio ($\mu\epsilon$ /ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ϵ_{3600} (%)	ϵ_{3600} médio (%)
M1	6279,59	3600	5244,98	1800	0,575	0,774	0,360	0,451	57,4	0,628	0,797
M2	11087,84	3600	9911,87	1800	0,653		0,627		56,5	1,109	
M3	6549,47	3600	4582,68	1800	1,093		0,367		56,0	0,655	

Os provetes a seguir apresentados são idênticos aos anteriores, mantendo a mesma composição, alterando apenas as fibras *Viatop Premium* pelas *Viatop CT40*, por forma a produzir mistura temperada.

Quadro V.14 – Características volumétricas dos provetes S1, S2 e S3

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m^3)	Baridade média (kg/m^3)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m^3)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
S1	58,93	2238	2240	2431	7,9	7,8	20,50	20,41	61,23	61,58
S2	58,15	2245			7,6		20,23		62,26	
S3	57,95	2238			7,9		20,50		61,24	

Quadro V.15 – Resultados da deformação permanente para os provetes S1, S2 e S3

Provete	h1	n1	hn	n	fc ($\mu\epsilon$ /ciclo)	fc médio ($\mu\epsilon$ /ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ϵ_{3600} (%)	ϵ_{3600} médio (%)
S1	5252,74	200	14618,34	2200	4,683	3,740	1,649	1,245	58,9	2,799	2,131
S2	9496,51	1800	14448,13	3600	2,751		0,840		58,2	1,445	
S3	7364,67	300	16072,86	2600	3,786		1,245		58,0	2,148	

Por fim avaliou-se o contributo do betume de refinaria, utilizando a mesma composição dos provetes anteriores e alterando o betume e as fibras.

Quadro V.16 – Propriedades volumétricas dos provetes A1, A2 e A3

Provete	Altura (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade máxima teórica (cálculo) (kg/m ³)	Porosidade (%)	Por. média (%)	VMA (%)	VMA (média, %)	VFB (%)	VFB (média, %)
A1	58,05	2244	2250	2438	8,0	7,7	20,26	20,04	60,7	61,61
A2	57,48	2233			8,4		20,63		59,3	
A3	56,10	2273			6,8		19,23		64,8	

Quadro V.17 – Valores da deformação permanente para os provetes A1, A2 e A3

Provete	h1	n1	hn	n	fc (με/ciclo)	fc médio (με/ciclo)	Def. (mm)	Def. média (mm)	Altura (mm)	ε3600 (%)	ε3600 médio (%)
A1	18437,64	1700	8586,66	200	6,567	4,874	2,302	1,589	58,1	3,965	2,761
A2	13628,48	1700	5127,78	200	5,667		1,805		57,5	3,140	
A3	11777,66	3600	7477,93	1800	2,389		0,661		56,1	1,178	