

**Formulação de misturas betuminosas a quente:
análise comparativa da aplicação de métodos
empíricos e volumétricos**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil

Autora
Andrea Domingues Silva

Orientador
Prof. Doutor Silvino Dias Capitão
Professor Coordenador do IPC-ISEC

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar tenho a agradecer aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado. Sem todo o seu esforço e amor nunca seria possível chegar até onde estou hoje. Não existem palavras suficientes para agradecer tudo o que fizeram e continuam a fazer por mim.

Ao meu irmão, por todo o seu trabalho árduo que permitiu que tivesse a disponibilidade para embarcar nesta aventura e terminar esta dissertação.

Ao Julien, por estar sempre ao meu lado ao longo desta árdua caminhada, mesmo nos dias mais difíceis. Por ter sempre uma palavra de encorajamento e também por saber criticar quando era necessário, sempre fazendo-me acreditar que conseguiria chegar ao fim desta etapa. Obrigado por todo o amor, carinho e compreensão.

Ao meu orientador, Professor Doutor Silvino Dias Capitão, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), por todo o apoio e orientação e por estar sempre disponível e pronto a ajudar. Obrigado por todos os conhecimentos que me transmitiu e por ter sempre uma palavra de ânimo e incentivo, mesmo quando surgiam obstáculos. Sem dúvida que é o responsável para que hoje eu goste ainda mais desta área que são os pavimentos rodoviários.

Ao Engenheiro Técnico Carlos Renato, Técnico do Laboratório de Pavimentos do DEC-ISEC, pela ajuda imprescindível prestada na realização de grande parte dos trabalhos experimentais, pela dedicação e encorajamento. Manifesto também o meu agradecimento ao Senhor Celestino Marques, técnico de laboratório do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), pelo auxílio e disponibilidade mostrado na realização de alguns trabalhos experimentais indispensáveis para a realização desta tese.

Expresso o meu agradecimento à empresa Júlio Lopes, S.A., em especial à Engenheira Filipa Gomes, por ter disponibilizado os materiais necessários para a realização dos trabalhos experimentais.

Agradeço ao ISEC e a todos os professores com que me cruzei ao longo destes anos, que são responsáveis por todo o meu conhecimento e formação em Engenharia Civil.

Por fim, obrigado a todos os meus amigos por toda a força que me transmitiram, pela ajuda e incentivo, mesmo quando estive mais ausente.

RESUMO

A utilização de métodos de formulação de misturas betuminosas tem como objetivo determinar a combinação de agregados e betume numa mistura, de tal modo que se obtenha um material de pavimentação tão económico quanto possível, fácil de fabricar e colocar, e que suporte os efeitos das cargas e do clima ao longo do seu ciclo de vida.

As misturas colocadas nas camadas de pavimentos podem diferir no tipo de material agregado e na sua granulometria, no tipo e na quantidade de ligante, na utilização de aditivos ou agentes que modificam o betume, e na sua composição volumétrica. Os métodos empíricos de formulação de misturas betuminosas, como o método de Marshall, não permitem formular com a fiabilidade necessária misturas betuminosas com o desempenho mecânico adequado para resistir aos mecanismos de degradação a que vão ficar sujeitas nos pavimentos.

Uma das alternativas ao método de Marshall é a metodologia de formulação volumétrica SUPERPAVE, desenvolvida no programa *Strategic Highway Research Program*(SHRP). Nesta metodologia o procedimento de seleção da percentagem ótima em betume é realizado com base nas propriedades volumétricas de provetes compactados com o compactador giratório. A percentagem ótima em betume depende da energia de compactação utilizada, sendo esta fornecida pelo número de giros a que o provete foi submetido.

O equipamento geralmente usado nos ensaios é a prensa giratória de corte (PGC) que permite medir a compacidade e estimar com uma precisão suficiente a porosidade que será obtida *insitu*. Nestes métodos a seleção da curva granulométrica e da percentagem ótima de betume a usar é feita pela verificação da maior ou menor correspondência entre as composições testadas e certos requisitos de compactabilidade pré-definidos, entendendo-se estes como uma medida da aptidão da mistura para apresentar bom comportamento no seu ciclo de vida.

A prática portuguesa é a de utilizar o método de Marshall para formular misturas betuminosas convencionais e até algumas misturas não convencionais. Torna-se, assim, útil comparar os resultados de formulações obtidas por duas vias diferentes, tendo em conta que a utilização da prensa giratória de corte tem vindo a ser progressivamente integrada em várias metodologias de formulação utilizadas internacionalmente. Crê-se que os métodos baseados em PGC, mantêm alguma simplicidade de procedimentos, ao mesmo tempo que permitem amentar o nível de confiança nas composições a que se chega, no que diz respeito ao seu desempenho no seu ciclo de vida.

Palavras-Chave

Formulação de misturas betuminosas; método de Marshall; métodos empíricos de formulação; método volumétricos; prensa giratória de corte.

ABSTRACT

The use of asphalt-mix design methods has the purpose of determining the combination of aggregate and bitumen in a mixture so that the paving material is as economic and easy to lay as possible, and it is also able to support the effects of loadings and climate changes throughout its lifecycle.

The mixtures used in pavement layers may differ in the type of aggregate material and its grading curve, in the type and amount of binder, in the use of additives or bitumen's modifying agents, and in its volumetric composition. The Empirical methods used for design of bituminous mixtures, such as the Marshall method, do not allow us to design, with the necessary reliability, bituminous mixtures with the proper mechanical performance in order to resist the distress mechanisms that they will be subjected on the pavements.

One of the alternatives to the Marshall method is the volume methodology *Superpave*, developed by the *Strategic Highway Research Program* (SHRP). In this methodology, the selection of the optimum bitumen content is performed based on the volumetric properties of the specimens that are compacted with the gyratory compactor. The optimum bitumen content depends on the compaction energy used, which is provided by the number of gyrations applied to the specimen.

The equipment generally used in the tests is the gyratory compactor (PGC), which allows the measurement of compactability of the mixture and estimate with sufficient accuracy the porosity to be achieved *in situ*. In these methods, the selection of grading curve and optimum bitumen content is carried out through the verification of matching between the tested compositions and certain predefined requirements for the compactability, these being considered as a measure of the ability of the mixture to have a good behaviour in its lifecycle.

The Portuguese practice consists in using the Marshall method to design conventional asphalt and some non-conventional mixtures. It is, therefore, useful comparing the results obtained from the two different mix-design methods, given that the use of the gyratory compactor has been gradually integrated in various mix-design methods used internationally. Even though the methods based on the gyratory compactor maintain simple procedures, one believes that they also allow increasing the level of confidence in the compositions achieved regarding its performance during its lifecycle.

Key-Words

Design of bituminous mixtures; Marshall method; Mix-design empirical methods; volumetric method; gyratory compactor.

RÉSUMÉ

L'utilisation de méthodes de formulation des enrobés bitumineux vise à déterminer la combinaison des granulats et du bitume dans un enrobé, pour obtenir un matériau de revêtement le plus économique possible, facile à fabriquer et à épandre, et qui puisse supporter les effets des charges et du climat sur un certain cycle de vie.

Les enrobés appliqués en couches des chaussées peuvent être différents en ce qui concerne le type de granulats et sa granulométrie, le type et la quantité de liant, l'utilisation d'additifs ou des agents qui modifient le bitume, et leur composition volumétrique. Les méthodes empiriques de formulation des enrobés bitumineux, la méthode de Marshall par exemple, ne permettent pas de formuler les enrobés bitumineux avec la fiabilité nécessaire et avec des performances mécaniques suffisantes pour résister à des mécanismes de dégradation qui seront soumis dans la chaussée.

Une des alternatives à la méthode de Marshall est la méthode de formulation volumétrique SUPERPAVE, développée dans le programme *Strategic Highway Research Program* (SHRP). Dans cette méthodologie la procédure de sélection du pourcentage optimal de bitume est effectuée sur la base des propriétés volumétriques des éprouvettes compactées avec le compacteur giratoire. Le pourcentage idéal de bitume dépend de l'énergie de compactage qui est fournie par le nombre de rotations que l'échantillon est soumis.

L'équipement généralement utilisé pour les essais est la presse à cisaillement giratoire (PGC) qui permet la mesure de la compactabilité et d'estimer la porosité à obtenir *in situ*. Dans ces procédés, la sélection de la courbe granulométrique et le pourcentage de bitume à adopter est basée dans la vérification de la correspondance entre les compositions testées ainsi que certaines exigences prédéfinies de la compactabilité, celles-ci étant comprises comme une mesure de l'aptitude de l'enrobé pour avoir un bon comportement pendant leur cycle de vie.

La pratique Portugaise est d'utiliser la méthode de Marshall pour formuler des enrobés bitumineux classiques et même quelques autres non conventionnelles. Il est donc utile de comparer les résultats de deux formulations obtenues par des voies différentes, en tenant compte du fait que l'utilisation de la presse à cisaillement giratoire a été progressivement intégrée dans des différentes méthodes de formulation utilisées à l'échelle internationale. On croit que les méthodes basées sur PGC, maintiennent une certaine simplicité de procédures, tout en permettant d'augmenter le niveau de confiance dans les compositions auxquelles elles arrivent, par rapport à sa performance sur son cycle de vie.

Mots-Clés

Formulation des enrobés bitumineux; Méthode de Marshall; Les méthodes empiriques de formulation; Procédé volumétrique; presse à cisaillement giratoire.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos e Metodologia de Trabalho.....	1
1.3	Organização da Dissertação	3
2	Aspetos Gerais Relativos à Composição e Características das Misturas Betuminosas.....	5
2.1	Considerações Iniciais.....	5
2.2	Tipos de Misturas Betuminosas Fabricadas a Quente.....	5
2.3	Constituintes e Composição de Misturas Betuminosas	8
2.3.1	Agregados e Fíleres	8
2.3.2	Betume Asfáltico	9
2.3.3	Interação Fíler-Betume	10
2.3.4	Características Volumétricas e Mássicas	11
2.4	Influência da Composição no Comportamento das Misturas Betuminosas ao Longo do Ciclo de Vida.....	17
2.5	Influência das Condições de Solicitação no Comportamento de Misturas Betuminosas ao Longo do seu Ciclo de Vida.....	19
2.5.1	Tráfego.....	19
2.5.2	Condições Climáticas	21
2.6	Síntese	22
3	Métodos de Formulação de Misturas Betuminosas Fabricadas a Quente	23

3.1	Considerações Iniciais	23
3.2	Métodos por especificação	23
3.3	Métodos Analíticos.....	24
3.4	Métodos Empíricos.....	25
3.5	Métodos Volumétricos	27
3.6	Métodos Racionais	28
3.7	Síntese.....	29
4	Formulação Empírica de Misturas Betuminosas.....	31
4.1	Descrição do método	31
4.1.1	Princípios e Pressupostos	31
4.1.2	Procedimentos de Ensaio.....	32
4.2	Ensaio adicionais.....	35
4.2.1	Ensaio de Avaliação da Sensibilidade à Água	35
4.2.2	Ensaio de Wheel-Tracking	39
4.3	Síntese.....	42
5	Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas	45
5.1	Descrição do Método.....	45
5.1.1	Princípios e pressupostos.....	45
5.1.2	Níveis de formulação.....	45
5.1.3	Procedimentos de ensaio	51
5.1.4	Parâmetros utilizados na formulação pelo método base	54
5.1.5	Indicador Complementar com base no ensaio com a PGC	56
5.2	Síntese.....	57
6	Apresentação, Análise e Interpretação dos Resultados.....	59

6.1	Considerações Iniciais.....	59
6.2	Método Empírico	59
6.2.1	Estudo laboratorial pelo método de Marshall	59
6.2.2	Percentagem “ótima” em betume.....	64
6.2.3	Ensaio de sensibilidade à água.....	65
6.2.4	Ensaio de Wheel-Tracking.....	66
6.3	Método Volumétrico	68
6.3.1	Processo de compactação de provetes com Prensa Giratória de Corte.....	69
6.3.2	Resultados obtidos através da PGC	70
6.3.3	Resultados obtidos a partir dos ensaios com PGC ajustados em função da baridade medida experimentalmente	76
6.4	Comparação da Formulação pelos Métodos Empírico e Volumétrico	83
6.5	Síntese	86
7	Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros	87
7.1	Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais	87
7.2	Prosseguimento de Trabalhos Futuros	88
7.3	Considerações Finais.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
	REFERÊNCIAS NORMATIVAS	97
	APÊNDICES E ANEXOS	99
	APÊNDICE I. Análise Granulométrica.....	101

APÊNDICE II. Método Empírico – Resultados Laboratoriais 102

II.1	Baridade da mistura compactada.....	102
II.2	Baridade máxima teórica	103
II.3	Porosidade	105
II.4	VMA – Volume de vazios na mistura de agregados	106
II.5	Estabilidade e Deformação (Ensaio de compressão de Marshall).....	107
II.6	Ensaio de Sensibilidade à água.....	107
II.7	Ensaio de Wheel-Tracking	109

APÊNDICE III. Método Empírico - Resultados Gráficos 111

III.1	Estabilidade de Marshall	112
III.2	Sensibilidade à água	122
III.3	Ensaio de Wheel-Tracking	125

APÊNDICE IV. Método Volumétrico – Resultados Laboratoriais 128

IV.1	Baridade medida experimentalmente	128
IV.2	Estimativa da baridade por interpolação em cada ciclo.....	129
IV.3	Propriedades volumétricas em cada ciclo.....	132

APÊNDICE V. Método Volumétrico – Resultados Gráficos..... 134

V.1	Grupo 1 – Pb=4,5%	135
V.2	Grupo 2 – Pb=5,0%	137
V.3	Grupo 3 – Pb=5,5%	138
V.4	Grupo 4 – Pb=6,0%	141

ANEXO I. Fichas De Produto 144

I.1	Pó 0/4	144
I.2	Agregado 4/12	145
I.3	Agregado 8/20	146
I.4	Filer	147
I.5	Betume 35/50	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Composição de uma mistura betuminosa compactada (Branco <i>et al.</i> , 2005)	11
Figura 2.2	Medição da baridade	15
Figura 2.3	Picnómetro para determinação da baridade máxima teórica.....	16
Figura 2.4	Comportamento de uma mistura betuminosa ao longo do tempo de aplicação da carga (Pereira, 2009).....	17
Figura 2.5	Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa (Erkens, 2002)	18
Figura 2.6	Curva da evolução do endurecimento do betume (Shell, 2003)	18
Figura 2.7	Influência do rasto e pressão dos pneus na deformação permanente de pavimentos (Owende <i>et al.</i> , 2001).....	20
Figura 2.8	Influência da velocidade para rodados de base larga e de rodados duplos (Miranda, 2010).....	20
Figura 2.9	Influência da temperatura no módulo de rigidez dum betão betuminoso (Neves <i>et al.</i> , 2006).....	21
Figura 4.1	Equipamento utilizado no ensaio de compressão Marshall e esquema do resultado tipicamente obtido (adaptado de Capitão, 1996).....	32
Figura 4.2	Elaboração da mistura betuminosa (esquerda), molde de fabricação de provetes cilíndricos (centro) e compactador de impacto (direita).....	33
Figura 4.3	Gráficos dos valores médios obtidos para cada percentagem em betume, relativos às variáveis estudadas no Método de Marshall (Capitão, 1996)	34
Figura 4.4	Provetes colocados no interior do picnómetro	37
Figura 4.5	Análise do tipo de rotura dos provetes	38

Figura 4.6 Equipamentos de compactação (esquerda) e de ensaio de <i>Wheel-Tracking</i> (direita).....	40
Figura 5.1 Configuração do provete durante o processo de compactação no compactador de corte giratório (Memoire Online, 2013).....	46
Figura 5.2 Evolução típica das características da mistura em função do número de giros durante a compactação no compactador de corte giratório <i>SUPERPAVE</i> (Gomes, 2005).....	47
Figura 5.3 Equipamento SST (<i>SUPERPAVE Shear Tester</i>) (Gomes, 2005)	47
Figura 5.4 Equipamento ITT (Indirect Tensile Tester) (Shell, 2003)	48
Figura 5.5 Estrutura dos vários níveis de formulação do <i>SUPERPAVE</i> (Capitão, 2003).....	49
Figura 5.6 Distribuição da percentagem de vazios ao longo da altura do provete produzido em laboratório com a PGC, em função do número de giros (Massad <i>et al</i> , 1999).	50
Figura 5.7 Distribuição da percentagem de vazios ao longo da altura do provete recolhido do pavimento (Massad <i>et al</i> , 1999).....	50
Figura 5.8 Equipamento de ensaio para o Método Volumétrico (FHWA/NHI, 2000).....	51
Figura 5.9 Evolução da altura do provete com o nº de ciclos (FHWA/NHI, 2000)	52
Figura 5.10 Equipamento <i>Gyrocomp Gyrotory Compactor</i> da CONTROLS (Controls-Group, 2014)	53
Figura 5.11 Exemplo do processo de escolha do teor “ótimo” em betume (adaptado de PI, 2012)	55
Figura 6.1 Fuso granulométrico a cumprir e curva da mistura	61
Figura 6.2 Gráficos da variação da baridade e da porosidade com a percentagem de betume.	62
Figura 6.3 Baridade máxima teórica da mistura compactada	62
Figura 6.4 Variação do VMA com a percentagem de betume.....	63
Figura 6.5 Variação dos resultados da estabilidade e da deformação Marshall	63
Figura 6.6 Resultados do quociente de Marshall	64
Figura 6.7 Provetes depois de submetidos à compressão diametral	66
Figura 6.8 Valores médios das curvas de deformação – nº de ciclos obtidas no ensaio de <i>wheel-tracking</i> para lajes com diferentes percentagens de betume	67
Figura 6.9 Taxa de deformação média (WTS _{AIR}) e profundidade proporcional média da rodeira (PRD _{AIR})	68
Figura 6.10 Baridade obtida através da PGC	70

Figura 6.11 Porosidade obtida através da PGC	71
Figura 6.12 VMA obtido através da PGC	72
Figura 6.13 TVB obtido através da PGC.....	72
Figura 6.14 C obtida através da PGC	73
Figura 6.15 Escolha da percentagem “ótima” em betume obtida pela PGC	74
Figura 6.16 VMA – Variação de VMA e de VFB com a percentagem de betume com base nos resultados obtidos com a PGC	75
Figura 6.17 Escolha da percentagem “ótima” em betume obtida pela PGC, utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático	76
Figura 6.18 Baridade obtida pela PGC ajustada em função do valor obtido experimentalmente.....	77
Figura 6.19 Porosidade obtida a partir dos ensaios com PGC, ajustados em função da baridade determinada experimentalmente	77
Figura 6.20 TVB obtidos a partir dos ensaios com PGC, ajustados em função da baridade determinada experimentalmente.....	78
Figura 6.21 VMA obtidos a partir dos ensaios com PGC, ajustados em função da baridade determinada experimentalmente.....	78
Figura 6.22 Percentagem da baridade máxima teórica (C) obtida a partir dos resultados da baridade determinados na PGC, ajustados em função da baridade determinada experimentalmente.....	79
Figura 6.23 Escolha da percentagem “ótima” em betume obtida obtida pela PGC, com base nos resultados da baridade ajustados	80
Figura 6.24 VMA – Variação de VMA e de VFB com a percentagem de betume com base nos resultados da baridade, obtidos com a PGC, ajustados.....	81
Figura 6.25 Escolha da percentagem “ótima” em betume obtida pela PGC com base nos resultados na baridade ajustados, utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático.....	82
Figura 6.26 CEI – Compactation Energy Index	83
Figura 6.27 Evolução da baridade para os métodos empírico e volumétrico.....	84
Figura 6.28 Evolução da porosidade e do VMA para os métodos empírico e volumétrico	85

ÍNDICE DE FIGURAS EM APÊNDICE

Figura III 1 Estabilidade de Marshall – Provete 1.1	112
Figura III 2 Estabilidade de Marshall – Provete 1.2	112
Figura III 3 Estabilidade de Marshall – Provete 1.3	113
Figura III 4 Estabilidade de Marshall – Provete 1.4	113
Figura III 5 Estabilidade de Marshall – Provete 2.1	114
Figura III 6 Estabilidade de Marshall – Provete 2.2	114
Figura III 7 Estabilidade de Marshall – Provete 2.3	115
Figura III 8 Estabilidade de Marshall – Provete 2.4	115
Figura III 9 Estabilidade de Marshall – Provete 3.1	116
Figura III 10 Estabilidade de Marshall – Provete 3.2	116
Figura III 11 Estabilidade de Marshall – Provete 3.3	117
Figura III 12 Estabilidade de Marshall – Provete 3.4	117
Figura III 13 Estabilidade de Marshall – Provete 4.1	118
Figura III 14 Estabilidade de Marshall – Provete 4.2	118
Figura III 15 Estabilidade de Marshall – Provete 4.3	119
Figura III 16 Estabilidade de Marshall – Provete 4.4	119
Figura III 17 Estabilidade de Marshall – Provete 5.1	120
Figura III 18 Estabilidade de Marshall – Provete 5.2	120
Figura III 19 Estabilidade de Marshall – Provete 5.3	121
Figura III 20 Sensibilidade à água – Provete S1	122
Figura III 21 Sensibilidade à água – Provete S2	122
Figura III 22 Sensibilidade à água – Provete S3	123
Figura III 23 Sensibilidade à água – Provete S4	123
Figura III 24 Sensibilidade à água – Provete S5	124
Figura III 25 Sensibilidade à água – Provete S6	124
Figura III 26 Ensaio de Wheel-Tracking – Provete L2	125
Figura III 27 Ensaio de Wheel-Tracking – Provete L3	125

Figura III 28 Ensaio de Wheel-Tracking – Provete L4	126
Figura III 29 Ensaio de Wheel-Tracking – Provete L5	126
Figura III 30 Ensaio de Wheel-Tracking – Provete L6	127

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Tipos de misturas betuminosas fabricadas a quente	6
Tabela 2.2 Fuso granulométrico para uma mistura AC 14 surf ligante (BB).....	9
Tabela 2.3 Legenda de grandezas da figura 2.1 (Pereira, 2009)	11
Tabela 2.4 Propriedades de uma mistura betuminosa (Fonseca, 2011).....	14
Tabela 4.1 Legenda da Figura 4.1	32
Tabela 4.2 Percentagem de betume mínima indicativa	35
Tabela 4.3 Categorias de WTSair.....	42
Tabela 4.4 Categorias de PRDair	42
Tabela 5.1 Requisitos para cada nível de formulação (Gomes, 2005)	46
Tabela 5.2 Ensaios a efetuar com o SST e ITT (Gomes,2005)	48
Tabela 5.3 Níveis de compactação para a formulação pelo método SUPERPAVE nível 1 (adaptado de PI, 2012).....	53
Tabela 5.4 Baridade aconselhável para cada nível de compactação (adaptado de PI, 2012) ...	53
Tabela 5.5 Limites especificados para propriedades das misturas compactadas com PGC (Brown et al., 2001).....	55
Tabela 6.1 Características dos agregados	59
Tabela 6.2 Propriedades e exigências de conformidade para um betume de classe de penetração 35/50.....	60
Tabela 6.3 Quantidades de agregados utilizadas em cada um dos provetes.....	61
Tabela 6.4 Cálculo da percentagem “ótima” em betume pelo Método de Marshall	65
Tabela 6.5 Quantidades utilizadas para a produção de provetes para o estudo da sensibilidade à água	65
Tabela 6.6 Quantidades para fabrico de lajes moldadas para o ensaio com o Wheel-Tracking	67
Tabela 6.7 Baridade das lajes ensaiadas no ensaio de Wheel-Tracking.....	67

Tabela 6.8 Características do molde utilizado para o fabrico dos provetes	69
Tabela 6.9 Quantidades de agregado e betume	69
Tabela 6.10 Propriedades Volumétricas para $N_{design}=50$ obtidas através da PGC	73
Tabela 6.11 Requisitos mínimos para propriedades volumétricas da mistura	74
Tabela 6.12 Propriedades Volumétricas para $N_{design}=50$ obtidas através da PGC, utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático	75
Tabela 6.13 Propriedades Volumétricas para $N_{design}=50$ obtidas considerando uma fator de ajustamento em função da baridade determinada experimentalmente.....	80
Tabela 6.14 Requisitos mínimos para propriedades volumétricas da mistura	81
Tabela 6.15 Propriedades Volumétricas para $N_{design}=50$ obtidas através da PGC com base nos resultados na baridade ajustados, utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático	82
Tabela 6.16 Comparação de propriedades da mistura obtidas pelos métodos empírico e volumétrico	84
Tabela 6.17 Resumo da percentagem “ótima” em betume	85

ÍNDICE DE TABELAS EM APÊNDICE

Tabela II 1 Baridade da mistura compactada.....	102
Tabela II 2 Picnómetro de vácuo	103
Tabela II 3 Baridade máxima teórica.....	104
Tabela II 4 Porosidade	105
Tabela II 5 Volume de vazios na mistura de agregados	106
Tabela II 6 Estabilidade e deformação de Marshall.....	107
Tabela II 7 Ensaio de sensibilidade à água – Características dos provetes.....	107
Tabela II 8 Ensaio de sensibilidade à água – Baridade dos provetes.....	108
Tabela II 9 Ensaio de sensibilidade à água – Resistência conservada em tração indireta	108
Tabela II 10 Ensaio de Wheel-Tracking – N° Ciclos	109

Tabela II 11 Ensaio de <i>Wheel-Tracking</i>	109
Tabela II 12 Ensaio de <i>Wheel-Tracking</i> – Propriedades volumétricas	109
Tabela II 13 Ensaio de <i>Wheel-Tracking</i> - Equação da Curva Deformação/Nº Ciclos	110
Tabela IV 1 Baridade medida experimentalmente	128
Tabela IV 2 Porosidade, TVB e VMA	128
Tabela IV 3 Baridade para cada ciclo – Pb=4,5%	129
Tabela IV 4 Baridade para cada ciclo – Pb=5,0%	129
Tabela IV 5 Baridade para cada ciclo – Pb=5,5%	130
Tabela IV 6 Baridade para cada ciclo – Pb=6,0%	131
Tabela IV 7 Propriedades volumétricas em cada ciclo – Pb=4,5%	132
Tabela IV 8 Propriedades volumétricas em cada ciclo – Pb=5,0%	132
Tabela IV 9 Propriedades volumétricas em cada ciclo – Pb=5,5%	133
Tabela IV 10 Propriedades volumétricas em cada ciclo – Pb=6,0%	133

ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

AB - Argamassa Betuminosa

AC - Asphalt Concrete

AI – Asphalt Institute

BB - Betão Betuminoso

BBr - Betão Betuminoso Rugoso

BBsb - Betão Betuminoso Subjacente

CETO - Caderno de Encargos Tipo Obra

CRR - Centre de Recherches Routières

EN - European Norm

EP - Estradas de Portugal

FHWA - Federal Highway Administration

ITT - *Indirect Tensile Tester*

MB - Macadame Betuminoso

MBAM - Macadame Betuminoso de Alto Módulo

MBBr - Micro Betão Betuminoso Rugoso

MBQ – Misturas Betuminosas a Quente

NAEP – Número Acumulado de Eixos Padrão

NP - Norma Portuguesa

PGC - Prensa Giratória de Corte

RTFOT - Rolling Thin Film Oven Teste

SHRP - Superpave Highway Research Program

SST - *Superpave Shear Tester*

SIMBOLOGIA

BMT – Baridade máxima teórica

C - Percentagem de baridade máxima teórica

CEI - *Compaction Energy Index*

d_{10000} – Profundidade média da rodeira após a aplicação de 10000 ciclos de carga

d_{5000} – Profundidade média da rodeira após a aplicação de 5000 ciclos de carga

F – Força axial

Fc – Força de corte

Gmb - Baridade da mistura betuminosa compactada

Gmm - Baridade máxima teórica da mistura betuminosa

h – Altura

h_{\min} – Altura do provete no início do ensaio

ITS – Resistência em tracção indirecta

ITSd – Resistência em tração indirecta (*Indirect Tensile Strength*) de provetes secos

ITSR – Índice de resistência conservada em tração indirecta (*Indirect Tensile Strength Ratio*)

ITSw – Resistência em tração indirecta (*Indirect Tensile Strength*) de provetes imersos em água

m_1 – Massa do provete seco

m_2 – Massa do provete em água

m_3 – Massa do provete saturado com superfície seca

M_a – Massa de agregado

M_b – Massa de betume

M_t – Massa total

M_v – Massa de vazios (ar)

N - Número de ciclos

n_0 – Índice de endurecimento do betume no ano 0

n_r – Índice de endurecimento do betume no

P_{ai} – Percentagem da fracção do agregado i

P_b – Percentagem de betume

PRD_{AIR} – Profundidade média da rodeira (*Mean Proportional Ruth Depth in air*)

SSD – Saturada, com superfície seca

T_{ef} – Temperatura efetiva

TVB – Teor volumétrico em betume

V_a – Volume aparente de agregados

V_{ab} – Volume absorvido de betume

V_b – Volume de betume

V_e – Volume efetivo de betume

VFB - Volume de vazios preenchidos por betume

V_m – Porosidade

VMA – Volume de vazios na mistura de agregados

VMA – Volume de vazios no esqueleto mineral

V_p – Volume do picnómetro

V_v – Volume de vazios

WTS_{AIR} – Taxa de deformação média (*Mean Wheel-Tracking Slope*)

ρ – Baridade da mistura betuminosa

ρ_{ai} – Massa volúmica da fracção do agregado i

ρ_b – Massa volúmica do betume

ρ_{bssd} – Massa volúmica SSD

ρ_{mv} – Baridade máxima teórica

ρ_w – Massa volúmica da água

ϕ – Diâmetro

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As misturas betuminosas são um dos principais materiais incorporados nos pavimentos das infraestruturas rodoviárias de transportes na atualidade. De modo a facilitar o movimento de viaturas e pessoas nas estradas, no século XIX surgiram as primeiras misturas betuminosas. Só mais tarde, no século XX, com a necessidade de se obter pavimentos capazes de responderem a níveis de resistência e durabilidade mais exigentes, surgiram os métodos de formulação empíricos, como o de Marshall, que viriam a possibilitar a formulação daquele tipo de misturas.

A formulação de misturas betuminosas a quente resulta da necessidade de se tentar controlar e otimizar as proporções ponderais dos materiais constituintes, garantindo um comportamento adequado para a aplicação pretendida. A formulação consiste, assim, num processo de otimização da composição de vários tipos de agregados, da sua dimensão nominal máxima, da granulometria, assim como da definição de qual o tipo de betume a usar e da percentagem que melhor se adapta à curva granulométrica definida (Pimentel, 2013).

No entanto, com o aumento dos níveis de solicitação dos pavimentos e com a necessidade de estudar misturas betuminosas inovadoras, os métodos empíricos começaram a revelar-se insuficientes e limitados, tendo surgido outros, tais como os métodos volumétricos. Estes têm como objetivo aumentar a confiança no estabelecimento da mistura betuminosa adequada para cada caso, através da determinação da combinação de betume e agregados que resulte num material que possa resistir às cargas e ao clima a que o pavimento estará sujeito ao longo do seu tempo de vida útil.

Em Portugal, o método mais usado é o método de Marshall. Contudo, os métodos volumétricos, com utilização da prensa giratória de corte (PGC), têm vindo a ter grande aplicação devido a uma certa facilidade do seu uso, e também em consequência de aqueles métodos estarem integrados em diversas metodologias usadas em outros países.

1.2 Objetivos e Metodologia de Trabalho

Os métodos de formulação de misturas betuminosas têm como objetivo determinar a melhor combinação ponderal de agregados e de ligante betuminoso numa mistura, de tal modo que se obtenha um material de pavimentação tão económico quanto possível e que apresente boas características, quer durante as operações de fabrico e de aplicação, quer após a sua entrada em serviço, tendo em atenção as solicitações a que será sujeito. Uma mistura deverá apresentar as seguintes características: ser fácil de fabricar e de colocar em obra; suportar os efeitos das cargas e das ações climáticas ao longo do tempo que estiver em serviço no

pavimento; ter uma percentagem de vazios que, simultaneamente, lhe permita evitar a exsudação do betume e a sobrecompactação posterior à sua entrada em serviço; apresentar uma quantidade de ligante que assegure a coesão e a durabilidade do pavimento (Pimentel, 2013).

Assim, as misturas colocadas nas camadas dos pavimentos podem diferir no tipo de agregado e na sua granulometria, no tipo e quantidade de ligante, na utilização de aditivos ou agentes que modificam o betume, e na sua composição volumétrica. Com o desenvolvimento de novos métodos procura-se entender como é que a formulação influencia as propriedades mecânicas das misturas e o desempenho mecânico e funcional dos pavimentos que resultam da sua aplicação (Pimentel, 2013).

Um dos objetivos desta dissertação era o de efetuar uma comparação entre dois dos principais tipos de métodos utilizados para a formulação de misturas betuminosas: um método empírico e um método volumétrico.

Além disso, tinha-se como objetivo reunir e analisar informação relativa aos procedimentos de formulação de misturas betuminosas, por métodos empíricos e por métodos volumétricos, de modo a selecionar, dentre os procedimentos conhecidos, os que seriam utilizados no prosseguimento do estudo experimental. Esperava-se conseguir obter resultados que evidenciassem as eventuais diferenças entre as composições de misturas betuminosas a que se pode chegar através de métodos de formulação empírica e volumétrica.

A metodologia de trabalho consistiu, numa primeira fase, na recolha e sistematização de informação sobre as famílias de métodos existentes para a formulação de misturas betuminosas a quente, de modo a mostrar os princípios gerais que suportam cada um dos grupos de metodologias.

Antes de avançar para a realização de um estudo experimental, fez-se uma apreciação mais desenvolvida das metodologias de formulação empírica e volumétrica a utilizar neste estudo. Depois, prosseguiu-se com a realização de um estudo experimental em laboratório, no qual foram produzidos e compactados provetes de uma mistura betuminosa do tipo AC 14 surf 35/50, de forma a aplicar uma metodologia de formulação empírica e uma volumétrica.

Utilizaram-se cinco percentagens diferentes de betume que variaram entre si 0,5%, ou seja, cinco composições diferentes. Depois de compactados os provetes necessários pelo compactador de impacto, no caso do método empírico, ou pela Prensa Giratória de Corte, no caso do método volumétrico, os provetes produzidos foram submetidos a uma série de ensaios adicionais, com base em procedimentos propostos em normas do CEN – Comité Europeu de Normalização. Os ensaios foram efetuados de maneira a obter um conjunto de valores de características mecânicas e volumétricas que serviram de base à fixação de uma percentagem de betume considerada como “ótima” para a mistura betuminosa estudada.

Fez-se ainda uma análise dos resultados dos ensaios, individualmente para cada uma das metodologias de formulação, e comparativamente entre si, de forma a poder assinalar as

diferenças e fazer juízos de valor sobre as composições finais a que se chegou pelo método empírico e pelo volumétrico.

1.3 Organização da Dissertação

A dissertação é composta, para além deste, por mais seis capítulos, cinco apêndices e um anexo, nos quais se organiza a informação produzida nas diferentes fases desenvolvidas ao longo do estudo.

Neste Capítulo 1 apresenta-se o enquadramento do estudo, os objetivos e a metodologia de trabalho desta dissertação.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sumária, abordando o tema da composição e características gerais das misturas betuminosas fabricadas a quente, apresentando-se uma síntese sobre a influência da composição e das condições de solicitação no comportamento das misturas betuminosas.

No Capítulo 3 resumem-se as abordagens e os princípios base das famílias de métodos de formulação de misturas betuminosas a quente.

No Capítulo 4 descreve-se a metodologia de formulação de misturas betuminosas a quente pelo método empírico adotado na presente dissertação. A descrição do método é baseada no Anexo Nacional da NP EN 13108-1, e inclui uma exposição dos ensaios adicionais necessários, nomeadamente do ensaio de *Wheel-Tracking* e do ensaio de sensibilidade à água.

No Capítulo 5 é descrito o método volumétrico utilizado e são apresentados os parâmetros volumétricos considerados para o estabelecimento da composição de uma mistura pelo método *Superpave* nível I.

No Capítulo 6 faz-se a apresentação, discussão e análise dos resultados obtidos para os métodos de formulação empírico e volumétrico utilizados na parte experimental do trabalho.

No Capítulo 7 apresentam-se as conclusões dos estudos efetuados, as recomendações relativas a aplicação dos métodos de formulação propostos, bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

2 Aspectos Gerais Relativos à Composição e Características das Misturas Betuminosas

2.1 Considerações Iniciais

As misturas betuminosas são usadas em camadas de base, de regularização, de ligação e de desgaste. Em cada uma destas camadas a função da mistura betuminosa é diferente. A camada de base tem uma função maioritariamente estrutural, distribuindo as tensões induzidas pelas ações do tráfego, de modo a transmiti-las de forma amenizada à fundação. A camada de regularização encontra-se entre a camada de base granular e a de desgaste, e tem como principal função contribuir para uma adequada regularidade superficial do pavimento e assegurar a impermeabilização das camadas inferiores, não podendo ser descurada a importância da resistência às deformações permanentes. A camada de ligação aplica-se entre a camada de desgaste e a camada de base betuminosa, contribuindo para degradar as cargas na estrutura do pavimento e para contribuir para a regularidade superficial do pavimento. Por último, a camada de desgaste desempenha simultaneamente funções estruturais e funcionais, sendo que as características funcionais são predominantes nestas misturas. Neste estudo são formuladas misturas betuminosas para camada de desgaste, por ser esta a camada que se encontra em contacto direto com os veículos e está mais diretamente submetida às ações climáticas. Além disso, em ações de conservação de pavimentos em serviço, é muitas vezes a camada de desgaste que é substituída ou aplicada como camada adicional sobre o pavimento existente, sendo, por isso, muito utilizadas misturas do tipo das formuladas.

2.2 Tipos de Misturas Betuminosas Fabricadas a Quente

Nas misturas betuminosas fabricadas a quente, os seus componentes (agregados e betume) são misturados em centrais próprias para o efeito. Este tipo de misturas necessita de elevadas temperaturas de produção devido ao facto de o betume apresentar uma elevada viscosidade quando se encontra à temperatura ambiente. Por isso, é necessário aquecer o betume de maneira a ser possível obter uma consistência tal que permita a produção da mistura. No entanto, é crucial manter a temperatura elevada mesmo após a produção da mistura, de maneira a ser possível o seu espalhamento e compactação. Daí, através de várias combinações de agregado e betume, resultam diferentes tipos de misturas betuminosas que são maioritariamente utilizadas na pavimentação de vias e conseguem garantir uma boa resistência e durabilidade. Em Portugal, o Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal - CETO da EP (EP, 2009) discrimina as misturas betuminosas a quente habitualmente utilizadas nas diversas camadas de um pavimento betuminoso, tal como se encontra explicitado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 Tipos de misturas betuminosas fabricadas a quente

Camada	Designação Atual	Designação Anterior
Base	AC 32 base ligante (MB)	Macadame Betuminoso Fuso B
	AC 20 base ligante (MB)	Macadame Betuminoso Fuso A
	AC 20 base ligante (MBAM)	Mistura Betuminosa de Alto Módulo
Ligação	AC 20 bin ligante (MB)	Macadame Betuminoso Fuso A
	AC 20 bin ligante (MBD)	Mistura Betuminosa Densa
	AC 16 bin ligante (MBAM)	Mistura Betuminosa de Alto Módulo
	AC 14 bin ligante (BBsb)	Betão Betuminoso Subjacente
	AC 4 bin ligante (AB)	Argamassa Betuminosa
Regularização	AC 20 reg ligante (MB)	Macadame Betuminoso Fuso A
	AC 20 reg ligante (MBD)	Mistura Betuminosa Densa
	AC 16 reg ligante (MBAM)	Mistura Betuminosa de Alto Módulo
	AC 14 reg ligante (BBsb)	Betão Betuminoso Subjacente
	AC 14 reg ligante (BB)	Betão Betuminoso
	AC 4 reg ligante (AB)	Argamassa Betuminosa
Desgaste	AC 4 surf ligante (AB)	Argamassa Betuminosa
	AC 14 surf ligante (BB)	Betão Betuminoso
	AC 14 surf ligante (BBr)	Betão Betuminoso Rugoso
	AC 10 surf ligante (BBr)	(micro) Betão Betuminoso Rugoso

A mistura utilizada neste estudo é um *AC 14 surf ligante*, o qual se aplica em camadas de desgaste e pertence ao grupo dos betões betuminosos fabricados a quente. As misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste desempenham funções tanto estruturais como funcionais. No entanto, as características funcionais são muito importantes na formulação destas misturas, o que tem levado ao desenvolvimento de misturas betuminosas especiais para camadas de desgaste, tais como as misturas drenantes ou as misturas rugosas, de elevada macrotextura, particularmente adequadas para vias rápidas, mesmo quando há considerável escoamento de água à superfície (Jiménez,2014).

O Betão Betuminoso (BB) aplicado em camada de desgaste é uma mistura pouco permeável, resistente à ação abrasiva do tráfego, e cuja macrotextura pode ser relativamente baixa, pelo que nem sempre é a mais adequada para vias com elevadas velocidades de circulação e em climas chuvosos (Jiménez,2014).

O Betão Betuminoso Drenante (BBD) tem características especiais para aplicação em camadas de desgaste, por forma a melhorar a segurança e comodidade da circulação. Este tipo de mistura é particularmente indicado para eliminar ou reduzir os problemas de hidroplanagem dos veículos que circulam sobre o pavimento com chuva e para reduzir o ruído de rolamento. Por outro lado, estas misturas apresentam uma menor resistência aos efeitos abrasivos do tráfego, e podem colmatar-se quando aplicadas em zonas onde não chove com frequência e se acumule sujidade (Jiménez,2014).

As misturas rugosas, e em particular o Betão Betuminoso Rugoso e o Microbetão Betuminoso Rugoso (MBBR), proporcionam uma excelente macrotextura, tendo, no entanto, uma maior

percentagem de material fino que as misturas drenantes, pelo que têm uma maior resistência à ação abrasiva do tráfego que o BBD (Jiménez,2014).

Atualmente, têm-se vindo a utilizar predominantemente betumes da classe 35/50 na produção de betão betuminoso para camadas de desgaste, podendo também utilizar-se betumes 50/70, em particular para as classes de tráfego mais ligeiro e para zonas climáticas mais favoráveis(Jiménez,2014).

Anota-se que a utilização de betumes mais duros na camada de desgaste tem como vantagem o aumento da resistência à deformação permanente, embora podendo contribuir para uma maior fragilidade da mistura, com eventual redução da resistência ao fendilhamento com origem à superfície. A utilização de betumes modificados nas misturas para camadas de desgaste é uma alternativa que permite minoraresse problemas. No caso do Betão Betuminoso Drenante e do Betão Betuminoso Rugoso, ou do Microbetão Betuminoso Rugoso, o uso de betumes modificados com polímeros tem de obedecer a certos requisitos (Jiménez,2014).

À semelhança de algumas misturas para camadas de base, regularização e ligação, o Betão Betuminoso para camada de desgaste é formulado com recurso ao método de Marshall. Nos casos de Betão Betuminoso Drenante, Betão Betuminoso Rugoso e Microbetão Betuminoso Rugoso, é utilizado o compactador de impacto para a compactação de provetes destinados à determinação das características de resistência, tais como a resistência à ação da água ou a perda por desgaste no ensaio Cantábrico. As restantes características são determinadas com recurso à execução de trechos experimentais (Jiménez,2014).

As misturas betuminosas para camada de desgaste devem respeitar determinadas exigências de qualidade após a sua entrada em serviço, tais como:

- Um bom coeficiente de atrito (pneu/pavimento), quer para condições de piso seco, quer quando molhado;
- Um nível de ruído pneu/pavimento dentro dos limites adequados bem como adequadas características óticas;
- Uma superfície regular que possibilite a circulação em condições de conforto, economia e segurança;
- Uma adequada macrotextura para facilitar o escoamento das águas à superfície.

Na fase construtiva as misturas devem apresentar também boas características de trabalhabilidade para efeitos de aplicação. Além disso, é importante que a mistura tenha características que contribuam para a conservação do pavimento e sejam suscetíveis de reciclagem.

2.3 Constituintes e Composição de Misturas Betuminosas

2.3.1 Agregados e Fíleres

Em geral, os materiais granulares são escolhidos com base na experiência anterior, e com base em limites mínimos de qualidade para as características físicas e geométricas dos agregados. Aqueles limites variam consoante o tipo de mistura betuminosa e de acordo com as funções que a camada a construir vai desempenhar no pavimento. Assim, as especificações impõem requisitos mínimos no que respeita a diversas propriedades, tais como a granulometria, a limpeza, a resistência mecânica ao desgaste e/ou ao polimento, a adesividade ao betume, a forma, a aspereza superficial e a angularidade das partículas mais grossas, entre outras (Capitão, 2003).

A escolha correta dos agregados é de extrema importância, pois estes constituem cerca de 80% do volume global das misturas betuminosas, contribuindo de forma assinalável para a capacidade do pavimento para resistir a ação do tráfego.

A análise granulométrica dos agregados é efetuada de acordo com a norma europeia EN 933-1. A partir da curva granulométrica é possível obter os coeficientes de uniformidade e de curvatura que são uma medida da continuidade da curva. A granulometria dos agregados a aplicar nas misturas betuminosas deve ser adequada, ou seja, deve originar uma boa distribuição das cargas, através de um bom imbricamento entre as partículas (Mendes, 2011).

A norma NP EN 13108-1 refere as especificações das misturas betuminosas e a norma NP EN 13043 define os requisitos dos agregados a utilizar, por exemplo, em relação aos fusos granulométricos a respeitar para as misturas betuminosas a quente consoante o tipo de camada (Mendes, 2011).

Os agregados naturais utilizados em misturas betuminosas são geralmente britados, ou seja, são obtidos por fratura mecânica de rochas extraídas da natureza. No entanto, de acordo com a NP EN 13043, para a produção de misturas betuminosas os agregados devem ser originários da britagem de rochas duras, não modificáveis, ter uma forma adequada, e serem resistentes à rotura e à degradação induzida pelo efeito de abrasão e de fragmentação do tráfego (Mendes, 2011).

A designação filer é atribuída ao agregado cuja maior parte passa no peneiro de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades (EP, 2012). O filer confere à mistura betuminosa capacidades que contribuem quer para facilitar a sua compactação, quer para a melhoria da sua impermeabilidade. As características químicas e físicas deste material também influenciam as da mistura betuminosa. O filer selecionado pode ser natural ou artificial, de origem inorgânica ou mineral. Na prática tecnológica consideram-se habitualmente dois grupos de filer: o recuperado, corresponde a pequenas partículas de pó que são recuperadas por aspiração nas centrais de betuminosas durante a secagem do agregado; e o filer comercial que é produzido de forma autónoma para comercialização (Antunes, 2013). Pode utilizar-se o filer comercial e/ou o recuperado, limitando a percentagem deste, por forma a dispor-se de partículas não hidrófilas que se

misturem bem com o betume, para obter um bom mástique. Para alcançar este objetivo, as partículas de filler devem ser finas e não plásticas (Jiménez,2014).

De acordo com o CETO da EP (EP, 2012), para uma mistura betuminosa AC 14 surf ligante (BB) recomenda-se o fuso granulométrico indicado na tabela 2.2:

Tabela 2.2 Fuso granulométrico para uma mistura AC 14 surf ligante (BB)

Peneiros Série Base + Série 2	Unidade	Percentagem acumulada de material passado	
31,5			-
25			-
20		1,4D	100
16			-
14		D	90 - 100
12,5			-
10		(c1)	67 - 77
8	mm		-
6,3			-
4		(o1)	40 - 52
2		2	25 - 40
1			-
0,5		(c2)	11 - 19
0,25			-
0,125		(o2)	6 - 10
0,063		0,063	5 - 8

D – abertura do peneiro superior que pode reter material, em milímetros

(c1) – peneiro característico intermédio, entre D e 2 milímetros

(o1) – peneiro extra opcional entre D e 2 milímetros

(c2) – peneiro característico intermédio, entre 2 e 0,063 milímetros

(o2) – peneiro extra opcional ente 2 e 0,063 milímetros

2.3.2 Betume Asfáltico

O betume é um material ligante praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo bruto que é completamente ou quase todo solúvel em tolueno, muito viscoso e quase sólido à temperatura ambiente (EP, 2012). É o constituinte responsável pela ligação entre os agregados e pela coesão da mistura, sendo, por isso, um componente essencial da mistura betuminosa.

O betume deve ser utilizado com a dosagem adequada, dado que dosagens muito elevadas deste material, apesar de contribuírem para um incremento da ação impermeabilizante da mistura, poderão comprometer a estabilidade da mistura betuminosa (Antunes, 2013).

O ligante betuminoso possui qualidades e características que o diferenciam significativamente dos outros agentes coesivos utilizados em pavimentação, como por exemplo os ligantes hidráulicos. Enquanto as misturas com ligantes hidráulicos possuem elevada rigidez e resistência, os ligantes betuminosos proporcionam ligações tenazes e flexíveis aos materiais

com eles tratados. Este aspeto deve-se à resposta visco-elástica do betume, cujo comportamento varia com a velocidade de aplicação das cargas, o que lhe permite comportar-se como um material flexível, com baixo módulo de rigidez e muito deformável. Em geral, o betume adapta-se às deformações e assentamentos das camadas do pavimento e suporta as tensões devidas à retração térmica das camadas do pavimento e da fundação, sem fendilhar, podendo também comportar-se como um material estável e tenaz, com elevado módulo e resposta elástica para algumas condições de serviço, quando submetido às ações do tráfego (Jiménez, 2014).

Como o betume tem uma reologia dependente da temperatura e do tempo de carregamento, é necessário aplicar, em cada caso e para cada mistura, o betume mais adequado para cada situação. Desta forma os betumes aplicados nas misturas betuminosas devem apresentar propriedades que respeitem os requisitos definidos nas normas (Nunes, 2010).

2.3.3 Interação Fíler-Betume

As misturas betuminosas a quente são compostas por quatro componentes diferentes, os agregados, o fíler, o betume e o ar. Os materiais pétreos estão no estado sólido, o betume tem um estado físico que depende da temperatura (podendo variar de sólido a temperaturas ambientes baixas até ao estado líquido para temperaturas de mistura) e o ar está no estado gasoso (Antunes, 2013).

O fíler ao ser utilizado numa mistura betuminosa desempenha duas funções distintas. Uma é a de material inerte para preenchimento dos vazios entre os agregados mais grossos usados na mistura betuminosa. A outra função resulta das suas características superficiais de material muito fino e do seu nível de atividade, o que fornece a criação de ligações com o betume. As propriedades do fíler contribuem bastante para a melhoria do comportamento do mástique e, conseqüentemente, para as seguintes propriedades das misturas betuminosas (Silva, 2006):

- Comportamento mecânico;
- Teor ótimo em betume;
- Durabilidade;
- Trabalhabilidade.

São referidas na bibliografia diversas propriedades do fíler que influenciam o comportamento dos mástiques betuminosos, os quais influenciam o desempenho das misturas betuminosas. É referido que a forma e textura das partículas de fíler influenciam o teor ótimo em betume de uma mistura betuminosa, a ligação criada no sistema fíler-betume e o comportamento reológico dos mástiques. Tudo isto apresenta conseqüências no desempenho das misturas betuminosas (Craus *et al.*, 1978).

É ainda referido que um fíler com partículas mais irregulares, tanto em forma como em textura, possui uma maior superfície específica, o que leva a um aumento de viscosidade e, por sua vez, a um aumento da temperatura de amolecimento do mástique, levando a uma diminuição da sua penetração e ductilidade (Silva, 2006).

A adsorção e absorção seletiva de determinados grupos químicos do betume são os fenómenos que ocorrem na interação filer-betume. A avaliação destes processos é realizada em conjunto devido à dificuldade de uma aferição em separado dos mesmos. Estes dependem da composição do betume, das propriedades físico-químicas da superfície do filer e da estrutura interna das partículas de filer (Antunes, 2013).

2.3.4 Características Volumétricas e Mássicas

As misturas betuminosas são compostas por agregados, betume e ar, sendo fulcral conhecer as proporções dos constituintes entre si, e também um conjunto de propriedades volumétricas e mássicas das misturas. Na figura 2.1 representam-se as parcelas do volume e da massa de uma mistura betuminosa que habitualmente se utilizam. A tabela 2.3 apresenta a legenda das grandezas representadas na figura 2.1.

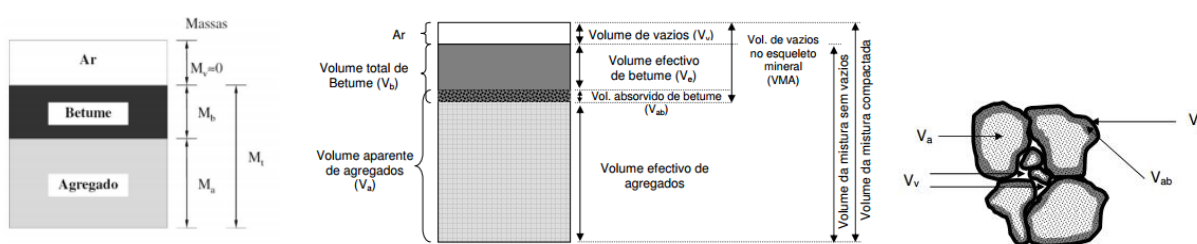


Figura 2.1 Composição de uma mistura betuminosa compactada (Branco *et al.*, 2005)

Tabela 2.3 Legenda de grandezas da figura 2.1 (Pereira, 2009)

Abreviatura	Grandeza
M_a	Massa de agregado
M_b	Massa de betume
M_v	Massa de vazios (ar) (Desprezável)
M_t	Massa total
V_a	Volume aparente de agregados
VMA	Volume de vazios no esqueleto mineral
V_b	Volume de betume
V_e	Volume efetivo de betume
V_v	Volume de vazios
V_{ab}	Volume absorvido de betume

A figura 2.1 mostra que parte do betume é absorvido pelo agregado (V_{ba}) e que outra parte fica à superfície do agregado (V_{be}), perfazendo o volume total de betume (V_b). Este volume em conjunto com o volume de vazios (V_v) designa-se por VMA – Volume de vazios no esqueleto mineral (Pereira, 2009).

Deve tomar-se especial atenção ao facto da porção de betume absorvida pelo agregado não atuar como ligante entre as partículas. Como o betume incorporado na mistura não fica todo a envolver os partículas de agregado, a espessura do filme de betume que as liga é menor do

que seria de esperar. Quando a absorção de betume é muito elevada, pode acontecer que as misturas se tornam mais frágeis e suscetíveis às ações prejudiciais da água (Pereira, 2009).

A compreensão da relação massa/volume de misturas betuminosas compactadas é importante, tanto do ponto de vista da conceção de uma mistura betuminosa, como do ponto de vista da sua aplicação em obra. Além disso, é essencial compreender que o projeto de uma mistura é também um processo que deve considerar propriedades volumétricas cujo propósito é determinar o volume de betume, de agregado e de ar requeridos para produzir uma mistura com as propriedades desejadas. No entanto, as medidas de volume de agregados e betume em laboratório ou no campo são difíceis de obter diretamente (Fonseca, 2011), sendo geralmente obtidas de forma indireta com base num conjunto de ensaios diferentes.

Dois parâmetros muito importantes para caracterizar um mistura betuminosa são a porosidade (V_m) e o volume de vazios no agregado mineral (VMA). Esta propriedade representa o volume dos vazios entre as partículas de agregados de uma mistura betuminosa compactada, incluindo o volume de vazios (V_v) e o volume de betume (V_b), expresso como uma percentagem do volume total, isto é, representa tudo o que não é agregado numa mistura (vazios com ar e preenchidos com betume) (Fonseca, 2011). Outro parâmetro que interessa analisar é a parcela de volume de vazios que está preenchida com betume (VFB).

O VMA é calculado através da equação (2.1):

$$VMA = \frac{V_b + V_v}{V_t} \times 100 = Vm + TVB \quad (2.1)$$

Onde:

- V_b é o volume de betume;
- V_v é o volume de vazios;
- V_t é o volume total;
- Vm é a porosidade;
- TVB é o teor volumétrico em betume, traduzido pela equação (2.2).

(2.2)

$$TVB = \frac{V_b}{V_t} \times 100 = \frac{p_b \times \rho}{\rho_b} \times 100$$

Onde:

- V_b é o volume de betume;
- V_t é o volume total;
- p_b é a percentagem de betume;
- ρ é a baridade da mistura betuminosa;

- ρ_b é a massa volúmica do betume.

O VFB é calculado através da equação (2.3):

$$VFB = \frac{TVB}{VMA} (\times 100\%) \quad (2.3)$$

Onde:

- TVB é o teor volumétrico em betume, traduzido pela equação (2.2);
- VMA é o volume de vazios no agregado mineral.

A porosidade (V_m) é o volume de ar retido entre as partículas de agregado e de betume de uma mistura betuminosa compactada, expresso como uma percentagem do volume total da mistura, e é calculada através da equação (2.4):

$$V_m = \frac{V_t - (V_b + V_a)}{V_t} \times 100 = \frac{\rho_{mv} - \rho}{\rho_{mv}} \times 100 \quad (2.4)$$

Onde:

- V_b é o volume de betume;
- V_a é o volume de agregado;
- V_t é o volume total;
- ρ_{mv} é a baridade máxima teórica;
- ρ é a baridade da mistura betuminosa.

A tabela 2.4 sintetiza as propriedades gerais de uma mistura betuminosa que habitualmente se espera obter, e estabelece uma correspondência entre essas propriedades e algumas variáveis de composição das misturas que são suscetíveis de afetar aquelas propriedades.

Tabela 2.4 Propriedades de uma mistura betuminosa (Fonseca, 2011)

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

As características volumétricas de misturas betuminosas podem ser obtidas através da determinação da baridade máxima teórica e da baridade. A baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa pode ser definida como a massa por unidade de volume, isenta de vazios preenchidos com ar, a uma temperatura de ensaio conhecida. A baridade é a massa por unidade de volume, incluindo vazios preenchidos com ar, de um provete a uma temperatura conhecida.

A norma EN 12697-6 explica o método de ensaio a aplicar para conhecer a baridade, indicando quatro procedimentos diferentes: baridade – a seco (para provetes com superfície muito fechada); baridade *SSD* – provete saturado com a superfície seca (para provetes com uma superfície fechada); baridade - provete selado (para provetes com uma superfície aberta ou grosseira); baridade – método geométrico (para provetes com uma superfície homogénea e com formas geométricas muito regulares).

Para os primeiros três métodos, o volume do provete é obtido com base na massa ao ar e na sua massa em água (Figura 2.2). No método a seco, a massa em água é determinada sem tratamento prévio. No método com o provete saturado com superfície seca, o provete é primeiramente saturado com água e pesado e, em seguida, a sua superfície é seca com uma camurça húmida, sendo pesado de novo. No método com o provete selado, a amostra é selada, por exemplo com parafina, antes da sua imersão em água para evitar o acesso da água aos vazios do provete. No método geométrico, o volume aparente do provete é obtido a partir da medição das suas dimensões (Fonseca, 2011).

A baridade tem influência no desempenho de uma mistura betuminosa (resistência mecânica e módulo de rigidez), pelo que é uma medida indireta da sua “qualidade” (Fonseca, 2011).



Figura 2.2 Medição da baridade

Para os trabalhos experimentais efetuados no âmbito desta dissertação a baridade foi calculada através do método *SSD*, aplicando a equação (2.5):

(2.5)

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

Onde:

- ρ_{bssd} é a massa volúmica *SSD* (kg/m^3);
- m_1 é a massa do provete seco (g);
- m_2 é a massa do provete em água (g);
- m_3 é a massa do provete saturado com a superfície seca (g);
- ρ_w é a massa de água à temperatura de ensaio ($0,1 \text{ kg/m}^3$)

A norma NP EN 12697-5 define o método de ensaio a aplicar para determinar a baridade máxima teórica, existindo três meios diferentes para obter essa mesma baridade: procedimento hidrostático, volumétrico e matemático. O conhecimento da baridade e da baridade máxima teórica vai permitir obter a porosidade da mistura, bem como outras características volumétricas. Através do procedimento matemático, a baridade máxima teórica é calculada através da seguinte equação (2.6):

(2.6)

$$\rho_{max} = \frac{M_b + M_a}{V_b + V_a} = \frac{1}{\frac{p_b}{100 \times \rho_b} + \sum_{i=1}^n \frac{p_{ai}}{100 \times \rho_{ai}}}$$

Onde:

- M_b e V_b é a massa e volume de betume, respetivamente;
- M_a e V_a é a massa e volume de agregado, respetivamente;
- ρ_b é a massa volúmica do betume;
- p_b é a percentagem de betume;
- p_{ai} é a percentagem da fração do agregado i ;
- ρ_{ai} é a massa volúmica da fração do agregado i .

No procedimento volumétrico, o volume da amostra é determinado através do volume de água deslocado pela amostra dentro de um picnómetro (Figura 2.3). No procedimento hidrostático, o volume da amostra é calculado a partir da massa seca da amostra e da sua massa quando imersa em água. No procedimento matemático, a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa é calculada a partir da sua composição (percentagem de ligante e percentagem de agregados) e das massas volúmicas dos seus constituintes (Duarte, 2010).

No caso de estudo, o processo utilizado foi o volumétrico, no qual as amostras são espalhadas e separadas em partículas. A mistura deve estar suficientemente mole para poder ser desagregada manualmente, sendo em geral necessário recorrer-se ao seu aquecimento em estufa a uma temperatura que não deve exceder 110°C.



Figura 2.3 Picnómetro para determinação da baridade máxima teórica

Conhecendo as massas m_1 , m_2 e m_3 aplica-se a equação (2.7) de acordo com o Procedimento A da norma NP EN 12697-5 para calcular a baridade máxima teórica pelo método volumétrico:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right)} \quad (2.7)$$

Onde:

- m_1 é a massa do picnómetro (g);
- m_2 é a massa do picnómetro com amostra (g);

- m_3 é a massa do picnómetro com amostra e cheio de água (g);
- V_p é o volume do picnómetro (m^3);
- ρ_w é a massa volúmica de água à temperatura de ensaio (kg/m^3).

2.4 Influência da Composição no Comportamento das Misturas Betuminosas ao Longo do Ciclo de Vida

Como se referiu, as misturas betuminosas devem ter *estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade*. A maior ou menor importância que cada uma terá no pavimento depende do tipo de camada a construir. Por um lado, pode pretender-se uma mistura com boas características mecânicas e, por outro lado, pode exigir-se uma melhor aptidão em termos funcionais, de modo a garantir a segurança e a comodidade dos utentes da via.

As características referidas dependem da composição da mistura betuminosa. Além disso, o comportamento reológico do betume influencia o desempenho da mistura ao longo do seu período de vida, pois este é fortemente afetado pela presença de betume. A duração do tempo de aplicação de uma carga, a temperatura e a presença de betume conferem à mistura um comportamento viscoelástico. Se a temperatura for baixa e o tempo de aplicação de carga for reduzido, a mistura tem tendência a apresentar um comportamento mais próximo do elástico. À medida que estes parâmetros vão aumentando, a resposta do betume vai ficando cada vez mais próxima do comportamento viscoso (Figura 2.4).

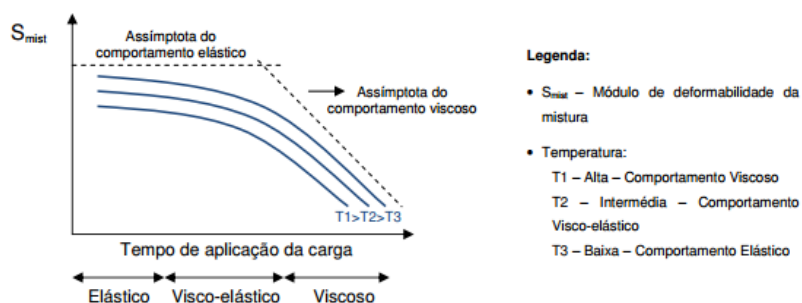


Figura 2.4 Comportamento de uma mistura betuminosa ao longo do tempo de aplicação da carga (Pereira, 2009)

O comportamento das misturas betuminosas depende dum conjunto alargado de fatores, uns relacionados com a ação do tráfego e da temperatura, e outros associados à composição volumétrica das misturas. É por isso que quando se efetua o estudo laboratorial de uma mistura betuminosa é importante definir as condições de ensaio (temperatura, frequência de carregamento e estado de tensão) (Batista, 2006).

Uma mistura betuminosa que tenha uma determinada granulometria, se não tiver betume suficiente pode desagregar-se quando sujeita às ações do tráfego. No entanto, se a quantidade de betume for excessiva a mistura torna-se mais flexível e podem ocorrer deformações

elevadas, prejudicando a estabilidade da mistura (Gardete, 2006). O efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa pode ser observado através da Figura 2.5 (Erkens, 2002).

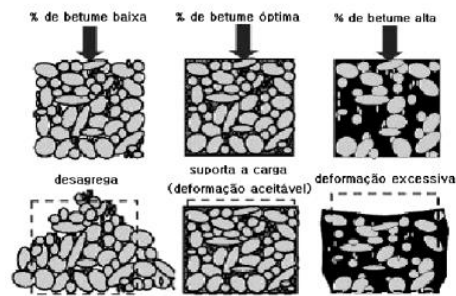


Figura 2.5 Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa (Erkens, 2002)

Quanto mais duro for o betume, isto é, quanto maior for a sua viscosidade a uma determinada temperatura, melhor será o seu comportamento às deformações permanentes (Barreno *et al.*, 2004).

Com a passagem do tempo em serviço, o betume vai envelhecendo por volatilização e oxidação dos seus componentes, apresentando desta forma uma maior viscosidade para a mesma temperatura. Apesar de este envelhecimento prejudicar algumas características das misturas betuminosas torna-as menos suscetíveis à deformação permanente. As misturas betuminosas são mais suscetíveis à deformação permanente no início da vida útil do pavimento. Com o envelhecimento do betume as misturas tornam-se mais resistentes àquele fenómeno (Gardete, 2006).

O endurecimento do betume ocorre, desde logo, nas fases de fabrico e colocação da mistura, prolongando-se depois durante a vida útil do pavimento (Shell, 2003). Na Figura 2.6 é apresentada uma curva da evolução do endurecimento do betume, que relaciona o índice de endurecimento (η_r/η_0) e as diversas fases da vida do betume (Mendes, 2011)

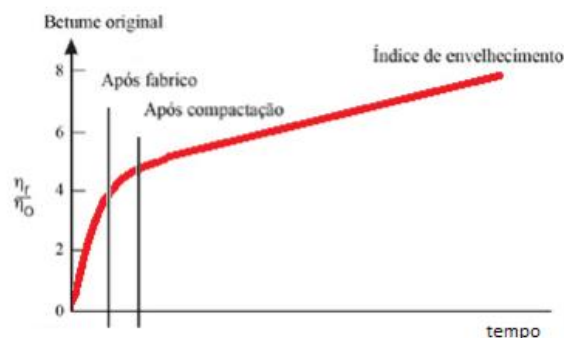


Figura 2.6 Curva da evolução do endurecimento do betume (Shell, 2003)

As propriedades duma mistura betuminosa dependem das proporções de cada um dos seus constituintes, agregados, betume e ar, bem como das características associadas a cada um deles (Mendes, 2011).

Através de uma adequada compactação, o volume de vazios na mistura diminui, provocando um aumento do atrito entre as partículas e criando uma melhor ligação entre os agregados e o betume. Assim, quando sujeita à ação do tráfego, a mistura betuminosa tenderá a ter melhor comportamento à fadiga e à deformação permanente (Mendes, 2011).

Quando a porosidade é muito elevada, sob a ação do tráfego, a mistura densifica-se e o atrito entre as partículas diminui, originando deformações (Gardete, 2006).

Contudo, o volume de vazios da mistura não deve ser demasiado baixo pois também compromete o comportamento da mistura. Existe um valor mínimo de porosidade (volume de vazios crítico) que deve ser respeitado e que é de aproximadamente 3%, dependendo do tipo de mistura betuminosa (Freire, 2002).

O método de compactação adotado em laboratório para a obtenção de provetes necessários aos estudos de formulação deveriam reproduzir, tanto quanto possível, as condições verificadas *in situ*, uma vez que a estrutura do esqueleto agregado que se obtém também tem influência no comportamento das misturas betuminosas. Em laboratório existem diversos processos de compactação dos provetes, nomeadamente a compactação por impacto, a compactação estática, com um compactador de rolo e com prensa giratória de corte. O tipo de compactação utilizado afeta as propriedades físicas das misturas de forma diferente. Este fator é importante se forem efetuadas comparações entre resultados obtidos com diferentes métodos de compactação (Gardete, 2006).

2.5 Influência das Condições de Solicitação no Comportamento de Misturas Betuminosas ao Longo do seu Ciclo de Vida

2.5.1 Tráfego

O tráfego é uma das importantes ações que afetam o comportamento mecânico dos pavimentos rodoviários. As ações decorrentes da circulação dos veículos nos pavimentos são função do tipo de eixo e do tipo de rodado, do rasto e pressão de enchimentos dos pneus, da velocidade dos veículos e da duração do tempo de aplicação dessas cargas (Mendes, 2011).

Com o aumento do tráfego pesado e das cargas transportadas por eixo, com a substituição dos rodados duplos por rodados simples de base larga e o aumento da pressão de enchimento dos pneus existe uma crescente formação de patologias nos pavimentos, nomeadamente os cavados de rodeira devido à deformação permanente das misturas betuminosas (COST 334, 2000).

Esta é uma questão que tem vindo a ser objeto de alguma preocupação, pois este fenómeno tem vindo a agravar-se sobretudo nos pavimentos onde o tráfego de pesados é mais significativo. Desta forma tem vindo a aumentar-se as espessuras das camadas como forma de reduzir as deformações permanentes (COST 333, 1999).

O aumento da pressão de enchimento dos pneus faz com que a área de contacto entre o pneu e o pavimento seja mais reduzida, concentrando-se as tensões nessa área (Gardete, 2006). Como se pode verificar na Figura 2.7 (Owende *et al*, 2001), para pressões de enchimento superiores

são necessárias muito menos aplicações de carga para que se atinjam os mesmos valores de deformação permanente (Mendes, 2011). Por exemplo, para uma carga de 21,6 kN e uma pressão de enchimento dos pneus de 350 kPa são necessárias cerca de 38000 aplicações de carga para uma determinada deformação do pavimento, enquanto que para a mesma carga e uma pressão de enchimento 770 kPa são necessárias apenas cerca de 18000 aplicações de carga.

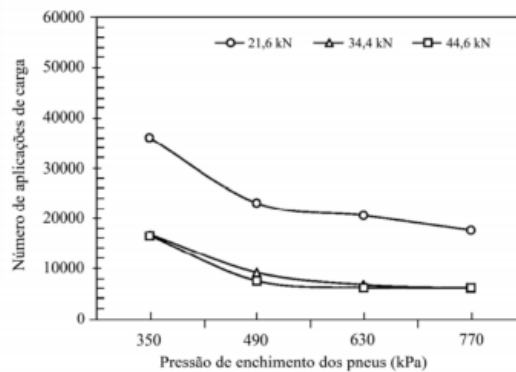


Figura 2.7 Influência do rasto e pressão dos pneus na deformação permanente de pavimentos (Owende *et al.*, 2001)

A velocidade de tráfego também influencia o comportamento dos pavimentos à deformação permanente. Para velocidades de tráfego baixas existe um tempo de carregamento superior, ou seja, se a carga estiver sobre uma determinada zona do pavimento durante mais tempo, as deformações obtidas serão superiores, provocando também um aumento da parcela da deformação irreversível (Chen *et al.*, 2004).

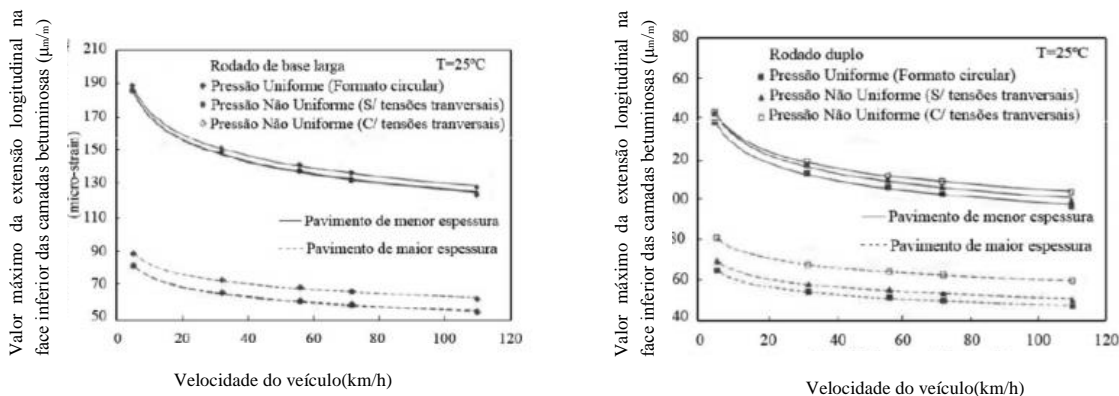


Figura 2.8 Influência da velocidade para rodados de base larga e de rodados duplos (Miranda, 2010)

Na Figura 2.8 (Miranda, 2010) é possível analisar a influência da velocidade de circulação dos veículos nos valores da extensão de tração na face inferior das camadas betuminosas de um pavimento. Para velocidades mais baixas o tempo de carregamento é superior e existe um aumento das deformações. É também possível verificar que os valores obtidos da deformação

para uma mesma velocidade são superiores quando se trata de rodados simples de base larga em comparação com os rodados duplos (Mendes, 2011).

2.5.2 Condições Climáticas

Para além da ação do tráfego também a ação dos agentes climáticos, entre os quais a temperatura e a pluviosidade, são fatores fundamentais a considerar no estudo do comportamento dos pavimentos rodoviários (Mendes, 2011).

A presença de água nos pavimentos irá provocar deformações permanentes ao nível dos materiais granulares e do solo de fundação. Além disso, se as camadas betuminosas de um pavimento rodoviário estiverem fendilhadas irá verificar-se a bombagem de finos das camadas granulares, desagregação das próprias misturas betuminosas e eventual expansão de solos argilosos existentes. Assim, é necessário impedir a entrada de água na estrutura do pavimento. As águas que se infiltram na estrutura do pavimento devem ser escoadas rapidamente através de um adequado sistema de drenagem (Mendes, 2011).

Outro fator a ter em conta é a temperatura ambiente. Esta afeta de forma significativa o comportamento das misturas betuminosas, pois influencia a viscosidade do betume, condicionando a rigidez das camadas betuminosas (Gardete, 2006). Quando a temperatura do pavimento aumenta, o betume torna-se mais mole, facilitando a deformabilidade das misturas betuminosas (Mendes, 2011).

Na Figura 2.9 é apresentada a variação do módulo de rigidez com o aumento da temperatura e com a velocidade de circulação dos veículos pesados para um betão betuminoso. Para um aumento da temperatura verifica-se uma diminuição do módulo de rigidez (Mendes, 2011).

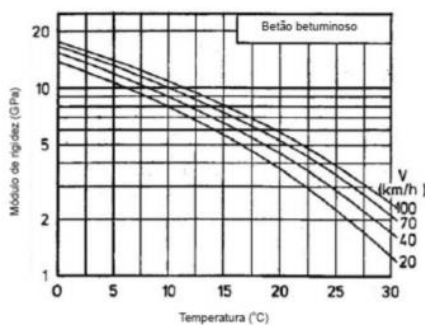


Figura 2.9 Influência da temperatura no módulo de rigidez dum betão betuminoso (Neves *et al.*, 2006)

Dessa forma, para um determinado carregamento, o aumento da temperatura vai influenciar o comportamento estrutural do pavimento, podendo originar deformações permanentes.

Assim, é fundamental que se faça uma adequada avaliação do comportamento da mistura betuminosa, através de ensaios laboratoriais, utilizando temperaturas representativas das condições a que a mistura estará sujeita em serviço. Como é para temperaturas mais elevadas que o valor da deformação permanente se torna mais significativo, é comum serem utilizadas

temperaturas de ensaio entre 40 e 60°C para a análise do comportamento à deformação permanente (Freire, 2004; Gardete, 2006; Doucetet *al.*, 2007).

2.6 Síntese

As misturas betuminosas a quente são normalmente utilizadas na execução de pavimentos flexíveis, rodoviários e aeroportuários. Estas resultam da combinação de betume asfáltico e de uma mistura de agregados. O seu processo de fabrico implica o aquecimento do ligante e dos agregados, a sua mistura e aplicação em obra. Estas operações são realizadas a temperaturas significativamente superiores à temperatura ambiente. Estas misturas devem apresentar certas características fundamentais, tais como estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, impermeabilidade e trabalhabilidade.

Os agregados correspondem a cerca de 80% do volume global das misturas betuminosas, formando um esqueleto pétreo, o qual deve contribuir de forma significativa para a resistência à ação do tráfego. O ligante é um elemento essencial da mistura betuminosa, dado que é ele que liga os agregados e fornece coesão e estabilidade à mistura. Existem diversos tipos de ligantes que podem ser utilizados na composição das misturas betuminosas. Contudo, geralmente são utilizados os betumes asfálticos provenientes da refinação do crude.

A composição das misturas betuminosas influenciam as suas propriedades volumétricas e mássicas, as quais contribuem de forma assinalável para o comportamento mecânico das camadas betuminosas em serviço.

A utilização de betumes mais moles ou de misturas mais ricas em ligante tende a reduzir a capacidade das misturas para resistirem à deformação permanente, uma vez que os valores do módulo de rigidez tendem também a ser menores. No que se refere à resistência ao fendilhamento, a aplicação daquele tipo de estratégia tem geralmente um efeito benéfico. Torna-se, portanto, necessário estabelecer composições das misturas betuminosas que respondam mecanicamente de forma equilibrada em relação a vários mecanismos de degradação.

3 Métodos de Formulação de Misturas Betuminosas Fabricadas a Quente

3.1 Considerações Iniciais

A formulação de misturas betuminosas visa o estabelecimento de uma composição que cumpra certas exigências, através de um conjunto de procedimentos e ensaios para determinar as dosagens dos constituintes das misturas. As exigências impostas dependem de vários fatores, como o tipo de estrada e o tipo de camada de pavimento. Por essa razão é imprescindível o estudo continuado de métodos de formulação, de modo a conseguir oferecer uma resposta adequada aos problemas que surgem ao longo dos anos. Estes métodos podem classificar-se em várias categorias, de maneira a facilitar a compreensão dos princípios que lhes estão subjacentes: métodos por especificação, empíricos, analíticos, volumétricos e racionais.

De qualquer modo, hoje em dia é mais ou menos consensual que os métodos de formulação de misturas betuminosas ditos “por receita” (ou por especificação), incluindo alguns métodos empíricos, já não conseguem dar uma resposta adequada ao problema que se propõem resolver, isto é, não permitem formular com a fiabilidade necessária misturas betuminosas com o desempenho mecânico adequado para resistir aos mecanismos de degradação a que vão ficar sujeitas nos pavimentos (Capitão, 2003).

Por essa razão, tem-se verificado um aumento no estudo e criação de métodos que incidam em critérios baseados nas propriedades mecânicas dos materiais que compõem uma mistura betuminosa, nomeadamente os métodos fundamentais ou racionais, particularmente quando se pretende utilizar misturas betuminosas especiais.

3.2 Métodos por especificação

Os métodos “por especificação” tem a característica de definir a composição da mistura betuminosa desde o princípio. São utilizados para misturas betuminosas tradicionais, não permitindo qualquer uso de materiais que não sejam os definidos na especificação. Além da constituição e procedimento para a elaboração da mistura, também é fixada a classe de penetração do betume, a curva granulométrica do agregado e a espessura da camada a colocar. Nestes métodos não é necessária a produção de quaisquer provetes para ensaios em laboratório, o que explica o facto de ser usado apenas para materiais e composições bastante conhecidos e testados, com base na experiência da sua utilização.

Resumem-se abaixo algumas vantagens e inconvenientes dos métodos de formulação “por especificação” (Capitão, 2003).

- Vantagens:

- As misturas apresentam, em geral, um bom desempenho em serviço;

- As receitas pré-estabelecidas são simples e aplicáveis a quaisquer tipo de misturas paraas quais foi estabelecida uma especificação;
- É fácil fazer especificações para os materiais a aplicar na produção de misturas;
- É relativamente simples verificar se as matérias-primas e as misturas cumprem as especificações.

- Inconvenientes:

- As receitas são estabelecidas para condições particulares de solicitação de tráfego e de condições climáticas, as quais podem não se verificar nos locais onde são aplicadas as misturas;
- O desempenho das misturas varia com as condições de colocação, as quais são difíceis de especificar nos métodos “por especificação”;
- Quando se verificam desvios, ainda que ligeiros, da qualidade das matérias-primas face às características especificadas, é praticamente impossível avaliar a influência daqueles desvios, quer na composição da mistura, quer no seu desempenho no pavimento;
- As receitas podem não permitir utilizar agregados eventualmente disponíveis localmente por estes não terem as características pré-estabelecidas, o que acarreta um aumento dos custos das misturas;
- A utilização de agregados de origens diferentes, ainda que respeitando os requisitos das receitas, podem conduzir a misturas com características mecânicas bastante diferentes e, conseqüentemente, com desempenhos no pavimento diferentes do esperado;
- Os métodos de formulação “por especificação” não permitem introduzir inovações nas misturas a aplicar.

3.3 Métodos Analíticos

Os métodos analíticos consistem no cálculo da composição volumétrica das misturas betuminosas, em particular da proporção de cada uma das frações de agregados utilizados e os volumes de betume e de vazios. Durante a realização deste método não são efetuados quaisquer provetes, todos os resultados que se obtém são de forma puramente analítica, tal como o nome indica. No entanto, aconselha-se a execução de um ensaio para verificação experimental antes de essa composição ser aceite como resultado final. A comparação feita entre resultados decorrentes deste método e ensaios *in situ*, revelou que este método de formulação utiliza fórmulas analíticas bastante adaptadas à realidade.

Os métodos analíticos não têm por objetivo a obtenção de uma percentagem ótima de betume. Visam antes determinar uma composição que assegure a melhor relação entre a resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência à deformação permanente, o que não corresponde

necessariamente à formulação de uma mistura betuminosa com um desempenho adequado em obra (Pimentel, 2013).

Trata-se, pois, dum processo que pode ser automatizado em computador. Um dos métodos analíticos mais conhecidos é o desenvolvido pelo C.R.R. - *Centre de Recherches Routières da Bélgica*. Deve ressaltar-se que, na prática belga, é exigido que a mistura de base, formulada analiticamente, seja aceite por um conjunto de critérios dependentes da realização de ensaios mecânicos (ensaio de compressão de Marshall, com simulador de tráfego, cantábrico, etc.) (Capitão, 2003).

As vantagens e os inconvenientes geralmente apontados a esta família de métodos são os que se indicam a seguir (Capitão, 2003).

- Vantagens:

- Graças a uma formulação volumétrica, estes métodos permitem prever algumas das propriedades fundamentais das misturas betuminosas, tais como o seu comportamento mecânico face aos mecanismos de degradação de pavimentos mais correntemente considerados no dimensionamento de estruturas de pavimentos;
- Quando se dispõe de correlações entre as composições volumétricas obtidas analiticamente e as propriedades que é possível medir em ensaios mecânicos, permitem acelerar o processo de formulação de misturas betuminosas, porquanto se pode reduzir a quantidade de estudos laboratoriais sobre composições preliminares;
- Possibilitam a deteção mais rápida das causas de insucessos na formulação de misturas betuminosas, nomeadamente quando, ao realizar ensaios mecânicos de verificação, não são cumpridas as exigências estabelecidas com base em correlações entre os resultados dos ensaios e o método analítico utilizado.

- Inconvenientes:

- Como se referiu para o caso belga, só por si, não asseguram um bom desempenho das misturas betuminosas, sendo, em geral, complementados com algum tipo de ensaios mecânicos de modo a verificar a qualidade da composição a que se chegou.

3.4 Métodos Empíricos

Os métodos empíricos surgem da necessidade de preencher algumas lacunas existentes nos métodos por especificação (ou por “receita”) e baseiam-se na determinação da percentagem de betume, de modo a respeitar os limites colocados para diversas variáveis (como por exemplo, a estabilidade e a porosidade da mistura) que são determinadas em ensaios. Nos métodos por especificação não se efetuavam ensaios mecânicos, o que tornava difícil o uso de materiais que se desviassem das especificações. Por essa razão se tornava imprescindível a criação de um modo de formulação de misturas mais completo e que permitisse a inclusão de novos materiais.

Estes métodos têm sido usados em todo o mundo, sendo o mais conhecido desta categoria o método de Marshall.

No método de Marshall os provetes são compactados em laboratório através de técnicas que não tem obrigatoriedade de reproduzir as condições de compactação em obra, sendo posteriormente submetidos a ensaios mecânicos específicos que permitem conhecer diversas variáveis e verificar se respeita os limites impostos. Estes limites foram estabelecidos com base na experiência anterior concretizada através de ensaios efetuados.

Este método baseia-se em grande parte na utilização dos resultados do ensaio de Marshall, o qual foi posteriormente aperfeiçoado e adotado pela *U.S. Army Corps of Engineers* para formulação e controlo do fabrico em obra, em 1943, tendo sido posteriormente acrescentados critérios para a dosagem (Pimentel, 2013).

Estes métodos são usados internacionalmente há várias décadas, o que resulta numa ampla experiência na sua utilização que confere uma certa confiança nos resultados obtidos, permitindo estimar sensatamente o comportamento das misturas. Estes métodos têm como inconveniente o facto de serem impróprios e desajustados para as inovações tecnológicas que têm surgido e aos novos materiais de pavimentação. Incluem-se também nesta categoria de métodos o método de Duriez, de Hveem, entre outros.

As vantagens e os inconvenientes que se apresentam abaixo são normalmente os que se reconhecem ao método de Marshall, que é o de utilização mais habitual (Capitão, 2003).

- Vantagens:

- O método utiliza técnicas de ensaio simples e relativamente baratas;
- Há grande experiência da sua utilização no mundo inteiro;
- Existem muitos resultados e informação disponíveis que podem servir de base ao estabelecimento de critérios de qualidade para as misturas, para uma ampla gama de utilizações.

- Inconvenientes:

- O método inclui a realização de ensaios empíricos e, por isso, não se baseia nas propriedades fundamentais das misturas;
- Tem-se verificado um acréscimo de insucessos no que respeita a rodagens em misturas formuladas com recurso ao método de Marshall, o que indicia a não adequação deste método para a previsão do comportamento perante novas condições de solicitação (por exemplo, rodados simples com pressão de contacto elevada);
- O método de compactação dos provetes fabricados para a realização de ensaios mecânicos não simula bem as condições de compactação que ocorrem no pavimento;
- Não é adequado para formular misturas cuja dimensão máxima do agregado seja superior a 25,4 mm, já que os moldes usados na produção de provetes têm

aproximadamente 100 mm de diâmetro, o que origina materiais que não representam bem o desempenho do material no pavimento;

- O método de Marshall não serve para formular misturas com granulometria descontínua ou muito porosa;
- Não permite introduzir com segurança grandes inovações nas misturas a aplicar, nomeadamente a utilização de betumes modificados e, em geral, matérias-primas não tradicionais, ou a adoção de técnicas construtivas novas;
- O estado de tensão e a temperatura de referência usadas no condicionamento dos provetes durante a realização dos ensaios mecânicos, torna difícil interpretar os resultados corretamente face às condições reais de utilização das misturas no pavimento.

Por se tratar de uma família de métodos utilizado no presente estudo, este terá um desenvolvimento com maior detalhe mais à frente no Capítulo 4.

3.5 Métodos Volumétricos

Os métodos volumétricos tem esta designação porque a percentagem de betume e a granulometria a usar são obtidos através da análise dos volumes parcelares que compõem as misturas (vazios, betume e agregados). Aqueles volumes são medidos sobre provetes produzidos em laboratório de modo a reproduzirem, tão fielmente quanto possível, as condições de compactação usadas *in situ*. Os ensaios realizados não permitem medir as propriedades mecânicas dos provetes. No entanto, considera-se que as amostras fabricadas reproduzem as condições de campo e que a composição volumétrica obtida influencia o comportamento mecânico das misturas (Capitão, 2003).

Tal como os métodos analíticos, os métodos volumétricos são, por si só, insuficientes, havendo necessidade de realizar ensaios adicionais para verificar as composições resultantes dos cálculos efetuados. Dado o grande número de variáveis envolvidas, não é de todo possível obter, com elevada confiança, misturas com bom comportamento mecânico recorrendo apenas aos métodos volumétricos (Pimentel, 2013).

Estes métodos utilizam um equipamento denominado Prensa Giratória de Corte (PGC). Este equipamento simula de forma bastante boa o resultado do processo de compactação em obra, no que diz respeito à obtenção das proporções volumétricas de agregados, betume e vazios. Neste tipo de ensaios não estão previstos quaisquer estudos do desempenho mecânico das misturas compactadas na PGC. No entanto, em situações de tráfego mais pesado, intenso e/ou temperaturas elevadas, devem realizar-se ensaios complementares que avaliem as suas características mecânicas. Os métodos volumétricos não garantem por si só que a mistura obtida tenha um adequado desempenho quando em serviço. Um dos exemplos de métodos volumétricos é o processo de formulação americano SHRP – SUPERPAVE nível 1.

Resumem-se de seguida algumas vantagens e inconvenientes que podem ser apontados aos métodos volumétricos (Capitão, 2003).

- Vantagens:

- Não exigem equipamentos excepcionalmente inovadores e caros (usam em geral uma PGC), pelo que podem ser usados com relativa facilidade;
- São, em geral, mais fiáveis que os empíricos, porquanto as misturas betuminosas assim formuladas apresentam geralmente um bom comportamento quando em serviço. As composições obtidas por métodos volumétricos normalmente cumprem os critérios Marshall, sendo menos provável o contrário acontecer;
- Pode variar-se o número de ciclos aplicado na PGC para a compactação dos provetes, de modo a atingir bariedades das amostras semelhantes às obtidas no campo, pelo que é possível simular razoavelmente bem, em laboratório, as condições de compactação *in situ*;

- Inconvenientes:

- Não medem diretamente as propriedades mecânicas nem preveem o desempenho estrutural das misturas betuminosas formuladas;
- Para situações de grandes solicitações de tráfego não asseguram, só por si, um bom comportamento mecânico das misturas. Dão apenas indicações sobre a trabalhabilidade das misturas e a sua tendência para desenvolver rodeiras. Quando o tráfego é muito pesado, lento e canalizado, e as temperaturas no pavimento são elevadas, devem realizar-se, como complemento, outros ensaios que permitam avaliar a resistência à deformação permanente;
- Pequenas variações nos parâmetros de fabrico dos provetes com PGC, como sejam a pressão axial, o ângulo de inclinação e o número de ciclos por minuto, podem influenciar de forma importante a porosidade que se pretende medir e, por conseguinte, a fiabilidade dos resultados.

Por se tratar de um dos dois métodos utilizados nesta dissertação, terá um desenvolvimento com maior detalhe mais à frente no Capítulo 5.

3.6 Métodos Racionais

Os métodos racionais empregam, por exemplo, métodos volumétricos para a fabricação de provetes submetendo-os posteriormente a ensaios relacionados com o comportamento em serviço da mistura. Analisam-se certas características, tais como: a rigidez, a deformação permanente e a resistência à fadiga. Os ensaios são demorados e dispendiosos, por isso esta categoria de métodos é apenas usada quando se trata de redes viárias mais importantes. São exemplos destes métodos os níveis 2 do SUPERPAVEMix *Design Method* e o método francês (Delorme, 1991, referido em Capitão, 2003).

- Vantagens:

- Os ensaios mecânicos realizados no âmbito destes métodos de formulação medem a resposta do material para diversos estados de tensão;
- Em geral, são aceitáveis as correlações que é possível estabelecer entre os resultados dos ensaios laboratoriais e o comportamento *in situ* das misturas betuminosas;
- A utilização destes métodos incentiva a utilização de novos materiais e a inovação.

- Inconvenientes:

- É exigida a utilização dum conjunto relativamente caro e complexo de equipamentos;
- A formulação duma mistura betuminosa é relativamente morosa;
- O controlo de qualidade das misturas colocadas em obra é relativamente complexo, sendo normalmente difícil dispor de resultados com a brevidade que as obras necessitam.

3.7 Síntese

Em cada categoria de métodos de formulação podem apontar-se vantagens e desvantagens, devendo a sua escolha ter em conta diversos fatores, tais como: a importância da obra, a experiência da equipa de formulação da mistura, os equipamentos disponíveis e o quadro de normalização existente. Deve procurar-se a utilização de um método de formulação que permita obter um bom equilíbrio entre o esforço envolvido e o risco de insucesso do material que pode aceitar-se para o pavimento a que se destina. Por exemplo, para pavimentos com tráfego pouco intenso as exigências são menores, logo poderá ser usado um método de formulação menos complexo e conseqüentemente mais económico.

A formulação de misturas betuminosas resulta, assim, da natural necessidade de se tentar controlar e otimizar as proporções ponderais dos materiais constituintes de uma mistura betuminosa, de forma a garantir que a mesma apresenta características adequadas para a aplicação pretendida.

4 Formulação Empírica de Misturas Betuminosas

4.1 Descrição do método

4.1.1 Princípios e Pressupostos

A norma NP EN 13108-1 estabelece um conjunto de requisitos gerais e empíricos (a chamada abordagem empírica) a verificar pelas misturas do grupo do betão betuminoso, ou seja, pelas misturas de composição granulométrica contínua ou descontínua formando uma estrutura perfeitamente imbricada.

Em termos de requisitos gerais aquela norma estabelece algumas regras para a composição e granulometria dos agregados, porosidade da mistura, revestimento do agregado e homogeneidade do material, sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, temperatura da mistura e durabilidade. No que diz respeito aos requisitos empíricos, a norma estabelece categorias para várias parâmetros: granulometria, percentagem de ligante, tipo e quantidade de eventuais aditivos, estabilidade, deformação e quociente Marshall, e propriedades volumétricas (VFB e VMA).

Verifica-se, portanto, que os requisitos da norma para a abordagem empírica se baseiam em parâmetros de composição e requisitos para os materiais constituintes, combinados com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho. O Anexo Nacional da NP EN 13108-1 recomenda de forma expressa que a formulação em laboratório de misturas betuminosas seja efetuada pelo método de Marshall e complementada com ensaios de pista e de sensibilidade à água.

Dos vários métodos empíricos existentes, o mais conhecido e aplicado internacionalmente é o método de Marshall, que deve o seu nome a Bruce Marshall do *Mississippi State Highway Department*, responsável pela sua invenção na década de 30 do século XX. Tal como mencionado anteriormente, os métodos empíricos assentam na determinação da percentagem em betume que equilibra os resultados obtidos para diversas variáveis medidas através de ensaios.

O método de Marshall inclui, além doutros, ensaios de resistência mecânica em provetes moldados, submetidos a condições de ensaio específicas. O ensaio de compressão (Figura 4.1 e tabela 4.1) assenta na determinação da estabilidade, da deformação e do quociente de Marshall – relação entre a estabilidade e a deformação – de misturas betuminosas. Além daquelas propriedades, é também necessário determinar a baridade (EN 12697-6) e outras características volumétricas dos provetes (EN 12697-8), tais como o VFB – vazios preenchidos com betume, o VMA – vazios da mistura de agregados e a V_m – porosidade. É ainda determinada a baridade máxima teórica (NP EN 12697-5), em ensaio realizado após a compressão dos provetes (Nunes, 2010).

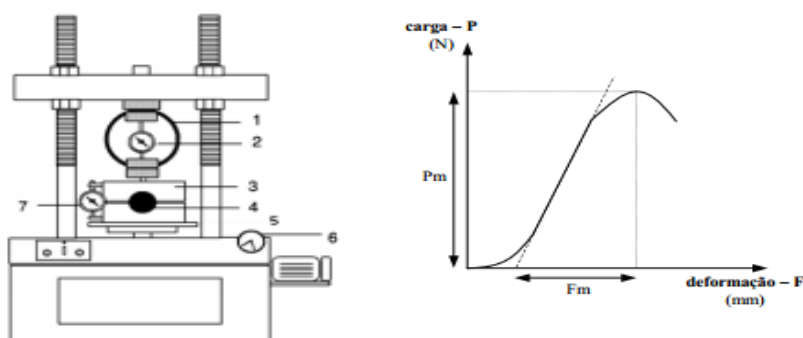


Figura 4.1 Equipamento utilizado no ensaio de compressão Marshall e esquema do resultado tipicamente obtido (adaptado de Capitão, 1996)

Tabela 4.1 Legenda da Figura 4.1

Número	Designação
1	Anel dinamométrico
2	Defletómetro para medição da força aplicada
3	Estabilómetro Marshall
4	Provette
5	Prato da prensa
6	Seletor da velocidade de aproximação dos pratos
7	Defletómetro para medição da deformação

O ensaio de Marshall é um ensaio empírico, isto é, não mede qualquer propriedade dita fundamental da mistura, medindo apenas a resistência mecânica dos provetes quando submetidos às condições de ensaio especificadas. No entanto, existe uma experiência de décadas em todo o mundo que permitiu verificar uma boa relação entre os resultados dos ensaios e o comportamento das misturas quando em serviço (Gardete, 2006).

4.1.2 Procedimentos de Ensaio

A mistura é preparada de acordo com a norma EN 12697-35+A1 – *Laboratory Mixing* e a compactação dos provetes é feita de acordo com a EN 12697-30+A1 – *Specimen preparation by impact compactor*. As misturas são concebidas usando cinco percentagens diferentes de betume – com diferenças de 0,5% entre si, em torno de uma percentagem ótima de betume esperada. As frações de agregados são doseadas de forma ponderal, secas e aquecidas em estufa à temperatura desejada. O betume é igualmente colocado em estufa, até atingir a temperatura adequada a uma fácil manipulação.

Os materiais constituintes, após estarem à temperatura desejada, são misturados, por exemplo numa misturadora elétrica, durante o período indicado na norma EN 12697-35+A1.

A compactação dos provetes é efetuada através de um compactador de impacto, em que cada provete é submetido a 75 pancadas em cada face. Aguarda-se o arrefecimento dos provetes, e de seguida estes são desmoldados. Após a desmoldagem, aguarda-se pelo menos 4h antes de serem iniciados quaisquer ensaios. A altura de cada provete deve ser medida em

conformidade com a EN 12697-29 (Duarte, 2010). A Figura 4.2 mostra aspetos do processo de mistura e compactação de provetes.



Figura 4.2 Elaboração da mistura betuminosa (esquerda), molde de fabricação de provetes cilíndricos (centro) e compactador de impacto (direita)

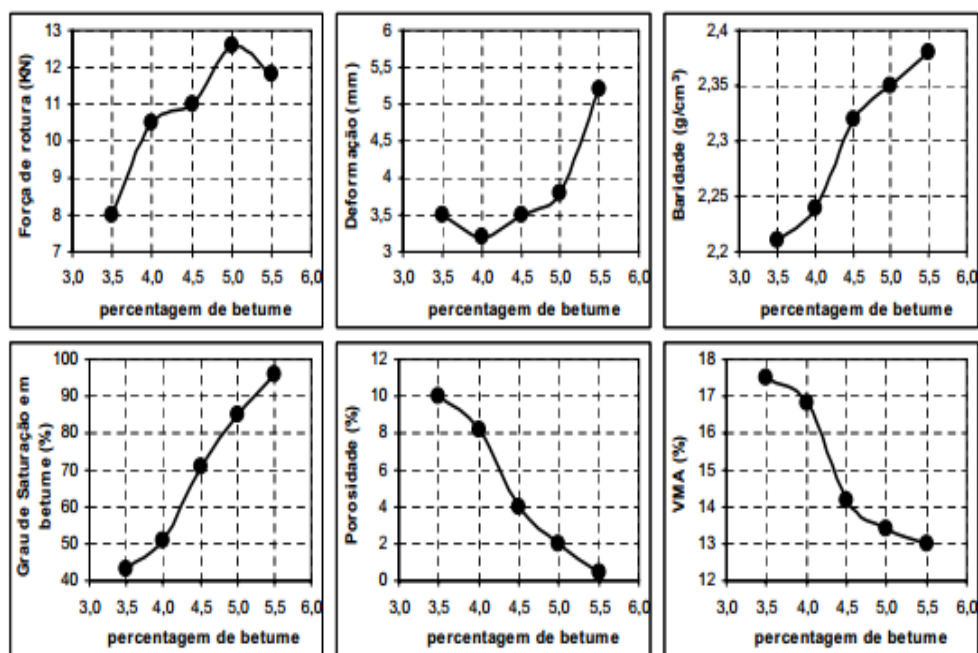
De seguida determinam-se os valores de algumas variáveis. Uma consistem em parâmetros volumétricos (baridade, porosidade e VMA) e outras são obtidas através do ensaio (mecânico) de compressão Marshall, sobre os provetes produzidos como se descreveu, o qual não reproduz obrigatoriamente as condições existentes *in situ*.

A deformação e a estabilidade são medidas através do ensaio de compressão de Marshall para cada provete fabricado, seguindo a norma EN 12697-34+A1. Previamente a utilizar o estabilómetro de Marshall, este deve ser aquecido durante pelo menos 30 minutos a 60°C em banho-maria ou 1 hora em estufa. Esta ação deve ser repetida antes do início de cada ensaio. Os provetes a ensaiar devem igualmente ser postos em banho-maria antes de serem submetidos à carga do ensaio. Retira-se o provete a ensaiar do banho-maria e coloca-se no centro do estabilómetro de Marshall, de forma a garantir um adequado contacto entre as duas peças durante a compressão. Com base nos resultados obtidos para as diversas variáveis medidas, em provetes com diferentes percentagens em betume, procede-se à escolha da percentagem ótima em betume, como sendo aquela que permite obter um bom equilíbrio dos valores dessas variáveis, podendo recorrer-se à experiência anterior com ensaios semelhantes como medida de aceitação (Duarte, 2010).

De seguida aplica-se a carga ao provete de ensaio de forma a atingir-se uma taxa de deformação constante de 50 ± 2 mm/min. Mantém-se a aplicação desta carga até ser obtida a leitura máxima no dispositivo de medição de força. Esta fase do ensaio deve ser executada dentro de 40 segundos após a remoção do provete do banho-maria.

Tendo presentes os valores da baridade, estabilidade, deformação, porosidade e VMA torna-se possível o cálculo da percentagem ótima de betume. Esta será a média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites da porosidade (definidos no CETO da EP, por exemplo). O valor encontrado deverá corresponder a uma deformação e a um VMA dentro de certos limites impostos pelas

especificações aplicáveis [(por exemplo no CETO da EP (EP, 2012)]. Se os critérios preestabelecidos não forem atingidos será necessário produzir outra mistura que verifique todos os critérios (Branco *et al.*, 2008). A Figura 4.3 mostra um exemplo da variação com a percentagem de betume das propriedades consideradas no método de Marshall.



Nota: Grau de saturação em betume é o mesmo que VFB

Figura 4.3 Gráficos dos valores médios obtidos para cada percentagem em betume, relativos às variáveis estudadas no Método de Marshall (Capitão, 1996)

Como se referiu, para a verificação dos requisitos empíricos é necessária a realização de ensaios adicionais para a fixação final da percentagem ótima em betume obtida anteriormente. Para isso são efetuados ensaios adicionais de avaliação da sensibilidade à água (EN 12697-12) e de avaliação da resistência à deformação permanente - *Wheel-Tracking* (EN 12697-22). Estes ensaios são concretizadas com três tipos de misturas diferentes: uma é produzida com a percentagem ótima de betume obtida pelo método de Marshall e as restantes duas com 0,5% acima e abaixo desse valor.

Além dos provetes, de maneira a proceder ao cálculo da resistência à deformação permanente, foram também produzidas lajes de 40x30x4cm, com três diferentes percentagens de betume - com diferenças de 0,5% entre si, em torno de uma percentagem ótima de betume já conhecida.

No entanto, é importante referir que o método de Marshall não é aplicável para as misturas AC 32 base (MB) e AC 10 surf (BBr). Para estas duas misturas os ensaios deverão ser realizados tomando em consideração o fuso granulométrico específico e a percentagem de betume indicado na norma NP EN 13108-1, descrita na tabela 4.2.

Tabela 4.2 Percentagem de betume mínima indicativa

Camada	Designação Atual	Designação Anterior	Percentagem de betume (valor mínimo indicativo)
Base	AC 32 base ligante (MB)	Macadame Betuminoso Fuso B	4,0
	AC 20 base ligante (MB)	Macadame Betuminoso Fuso A	4,4
	AC 20 base ligante (MBAM)	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	5,2
Ligação	AC 20 bin ligante (MB)	Macadame Betuminoso Fuso A	4,4
	AC 20 bin ligante (MBD)	Mistura Betuminosa Densa	4,8
	AC 16 bin ligante (MBAM)	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	5,2
	AC 14 bin ligante (BBsb)	Betão Betuminoso Subjacente	4,9
	AC 4 bin ligante (AB)	Argamassa Betuminosa	5,0
Regularização	AC 20 reg ligante (MB)	Macadame Betuminoso Fuso A	4,4
	AC 20 reg ligante (MBD)	Mistura Betuminosa Densa	4,8
	AC 16 reg ligante (MBAM)	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	5,2
	AC 14 reg ligante (BBsb)	Betão Betuminoso Subjacente	4,9
	AC 14 reg ligante (BB)	Betão Betuminoso	4,9
	AC 4 reg ligante (AB)	Argamassa Betuminosa	5,0
Desgaste	AC 4 surf ligante (AB)	Argamassa Betuminosa	5,0
	AC 14 surf ligante (BB)	Betão Betuminoso	4,9
	AC 14 surf ligante (BBr)	Betão Betuminoso Rugoso	4,8
	AC 10 surf ligante (BBr)	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	5,0

4.2 Ensaios adicionais

As misturas betuminosas têm que verificar certos requisitos: empíricos, fundamentais e gerais. A norma NP EN 13108-1 estabelece os ensaios e procedimentos necessários de maneira a que estes requisitos sejam verificados. Complementarmente ao método de formulação empírica de Marshall, os ensaios adicionais são de extrema importância, pois vão permitir verificar a bondade da percentagem ótima de betume obtida. A percentagem ótima de betume poderá sofrer alteração, caso se verifique que as propriedades da mistura não respeitam certos limites estabelecidos para os resultados dos ensaios adicionais. A percentagem ótima de betume selecionada no final do processo permite estabelecer a fórmula de trabalho, a qual se designa, no âmbito dos processos de marcação CE de misturas betuminosas, por “composição declarada”.

4.2.1 Ensaio de Avaliação da Sensibilidade à Água

A avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas tem uma especial importância na durabilidade dos pavimentos flexíveis, visto que, com a ação da água nas misturas betuminosas, principalmente sobre as camadas de desgaste, pode ocorrer a perda de ligação entre o agregado e o betume, com a consequente perda de coesão e de resistência do material (Nunes, 2010).

A norma europeia EN 12697-12 considera para a avaliação da sensibilidade à água, um método que se baseia na resistência à tração indireta (por compressão diametral) de provetes cilíndricos, designado na norma como método A que é o mais utilizado (Batista *et al*, 2008). Por essa mesma razão, o método A foi o escolhido para os ensaios efetuados na presente dissertação.

Para proceder ao estudo da avaliação da sensibilidade à água através do método A prepara-se uma mistura betuminosa, com percentagem de betume igual à ótima já estabelecida, e compactam-se seis provetes cilíndricos semelhantes aos utilizados no método de Marshall. Ensaiam-se dois conjuntos de provetes que diferem nas condições de condicionamento antes da realização dos ensaio de medição da resistência, de acordo com a norma EN 12697-12.

O tamanho dos provetes depende da dimensão máxima dos agregados que são utilizados na mistura. Ao tratar-se de agregados com dimensão máxima inferior ou igual a 22mm, podem ser utilizados provetes cilíndricos com um diâmetro de 100 ± 33 mm. Nesta situação os provetes produzidos em laboratório podem ter 101,6mm de diâmetro e aproximadamente 63,5mm de altura, tal como acontece no método de Marshall. A sua compactação é efetuada usando o compactador de impacto, aplicando um número de pancadas que permite atingir a baridade esperada para a mistura aplicada no pavimento. Para misturas correntes pode aplicar-se 75 pancadas em cada face.

Depois do seu fabrico, os provetes são divididos em dois grupos distintos, cada grupo constituído por três provetes. De maneira a proceder à divisão dos provetes, tem de se ter em conta a altura e baridade de cada um, reunindo no mesmo grupo provetes que respeitem as variações máximas estabelecidas para cada uma destas características. Considera-se uma variação máxima de 5mm para a altura e de 15kg/m^3 para a baridade média. Antes do ensaio de compressão diametral, os provetes são acondicionados durante um tempo e temperatura definidos, dependendo do grupo em que se inserem, devendo o tempo de cura dos provetes antes do acondicionamento situar-se entre 16h e 24h.

A divisão dos provetes em grupos resulta nos seguintes conjuntos:

- O primeiro grupo, denominado por grupo de provetes “a seco”, é acondicionado ao ar a uma temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$, sobre o qual se determina posteriormente o parâmetro ITS_d ;
- O segundo grupo de provetes, denominado por grupo de provetes “imersos”, é primeiramente medido, sendo depois submetido ao seu condicionamento em condições de pressão negativa, sobre o qual se determina posteriormente o parâmetro ITS_w .

De acordo com a norma EN 12697-29, devem de ser medidas quatro alturas (h) e seis diâmetros (\emptyset) dos provetes.

O condicionamento em condições de pressão negativa consiste em colocar os provetes dentro do picnómetro sobre uma base com furos, e depois enchê-lo com água destilada até, pelo menos, 20 mm acima do topo dos provetes (Figura 4.4). Essa água destilada deverá estar à

temperatura de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$. Após os provetes estarem submersos em água destilada durante 10 ± 1 minutos é aplicada gradualmente uma pressão negativa de $6,7\pm 0,3$ kPa, sendo depois mantidos nessa pressão durante 30 ± 5 minutos. Após este período, e antes de retirar os provetes, deve reduzir-se a pressão de forma gradual (Batista *et al*, 2008). Para isso, efetua-se uma redução da pressão negativa aplicada, a uma taxa de aproximadamente 10,4 kPa por minuto, até ser atingida a pressão atmosférica (com cerca de 100kPa). Após este procedimento, os provetes são novamente medidos com o intuito de verificar a sua variação de volume. Se a variação de volume for superior a 2%, esses provetes são rejeitados e não servem para o ensaio de medição de resistência, tornando-se necessário produzir outros.

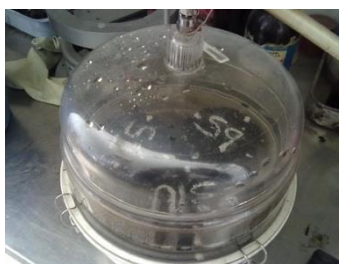


Figura 4.4 Provetes colocados no interior do picnómetro

Os provetes do grupo “imerso” são depois colocados num banho de água a $40\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante um período de 68 a 72 horas (Pereira, 2009). Passado o tempo de acondicionamento em água, os provetes são mantidos num banho de água e colocados à temperatura de ensaio pretendida, a qual pode variar entre 5°C e 25°C .

No caso em estudo, foi adotada a temperatura de ensaio de 25°C por ser esta a recomendada na norma EN 12697-12, de forma a maximizar a influência da adesividade do ligante e minimizar a influência dos agregados partidos na linha de rotura (Pereira, 2009).

Após ambos os grupos de provetes se encontrarem acondicionados a uma temperatura de 25°C (os “secos” ao ar e os “imersos” num recipiente com água) durante pelo menos 2 horas, só nesse momento se está em condições de iniciar o ensaio de tração indireta. O ensaio de tração indireta é realizado na prensa Marshall mas aplicando a força de forma diferente, de modo a submeter os provetes à compressão diametral, de acordo com a EN 12697-23.

Em cada ensaio obtém-se para cada provete a sua carga máxima e, por cálculo, a tensão de rotura (ITS), através da equação (4.1). Depois calcula-se o valor médio da resistência à tração indireta ($\text{ITS}_{\text{média}}$) para cada um dos grupos de provetes.

(4.1)

$$\text{ITS} = 2 \times \frac{\text{Carga Máxima (kN)}}{\pi \times D \times h}$$

Onde:

- D é o diâmetro do provete em mm;

- h é a altura do provete em mm;
- π é uma constante matemática = 3,14.

Determina-se, o *índice de resistência conservada em tração indireta* (ITSR), o qual corresponde à razão entre a resistência média dos provetes após condicionamento em água quente, a 40°C, durante 72 horas, depois de submetidos durante cerca de 30 min a uma pressão absoluta de $6,7 \pm 0,3$ kPa em água, e a resistência média dos provetes após condicionamento a 25°C, durante 2 horas (Nunes, 2010). O ITSR é expresso em percentagem, e calculado pela equação (4.2):

(4.2)

$$ITSR = \frac{ITSw}{ITSd} \times 100$$

Onde $ITSw$ e $ITSd$ representam, respetivamente, os valores médios das resistências à tração indireta dos provetes imersos durante 68h a 72h, e os valores médios das resistências à tração indireta dos provetes acondicionados ao ar a uma temperatura de 20 ± 5 °C.

De acordo com a NP EN 13108-1, o valor de ITSR é utilizado para atribuir a uma mistura uma categoria declarada de acordo com a divisão indicada na tabela 4.3.

Tabela 4.3 Categorias de ITSR

Valor mínimo da <i>resistência conservada em tração indireta</i> (%)	Categoria ITSR
90	ITSR ₉₀
80	ITSR ₈₀
70	ITSR ₇₀
60	ITSR ₆₀
Não Requerido	ITSR _{NR}

Além disso, a norma EN 12697-23 impõe que após o ensaio se observe qual o tipo de rotura de cada provete, a qual pode ser de três tipos: tração indireta evidente, por deformação ou combinada. É também imprescindível verificar o revestimento de ligante na superfície do agregado exposto e a existência ou não de agregado faturado ou esmagado. Na Figura 4.5 reproduz-se a figura da referida norma, onde se observam os tipos de rotura possíveis.

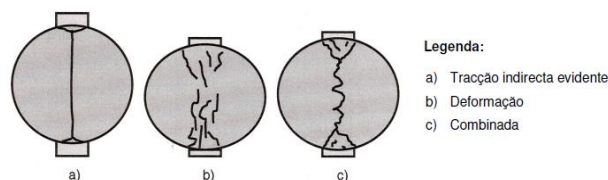


Figura 4.5 Análise do tipo de rotura dos provetes

4.2.2 Ensaio de *Wheel-Tracking*

O ensaio internacionalmente conhecido como *Wheel-Tracking* é utilizado para a determinação da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas, através da aplicação de cargas rolantes, que de alguma forma simulam a sucessiva passagem dos rodados dos veículos. Em português podem designar-se por ensaios com simulador de tráfego. Diversas entidades desenvolveram equipamentos deste tipo, os quais variam bastante entre si, tendo em comum apenas o princípio de aplicação das cargas. De facto, de uns casos para os outros variam bastante algumas das características dos equipamentos, tais como o tipo de roda, a frequência do movimento, a velocidade da roda, a pressão exercida sobre o material, entre outras (Capitão, 2003).

O *Wheel-Tracking* está normalizado pela norma EN 12697-22, na qual são mencionados três equipamentos para a execução deste ensaio: o equipamento de pequenas dimensões (*small size device*), o de grandes dimensões (*large size device*) e o extragrande (*extra-large device*). Em todos os tipos de equipamento é avaliada a profundidade da deformação atingida a partir das passagens repetidas de um rodado, a temperatura constante.

Para a realização do ensaio com o equipamento pequeno, a norma recomenda a preparação de 6 provetes (lajetas), com um comprimento mínimo de lado, de 305mm. A altura do provete, com um valor máximo de 80mm, varia consoante a dimensão máxima dos agregados da mistura. O número de provetes a efetuar depende do equipamento utilizado.

O modo de produção de mistura é idêntico ao referido para os provetes cilíndricos, mas as lajes são moldadas num molde próprio com as dimensões pretendidas. A compactação deve ser realizada de acordo com a EN 12697-33+A1, utilizando um dos métodos de compactação indicados na norma, por exemplo através de um rolo metálico liso (Figura 4.6).

De modo a ser iniciado o ensaio, as lajetas são previamente acondicionadas à temperatura de ensaio, a qual varia entre 40°C e 60°C, no interior da câmara do próprio equipamento por um período de 4h a 24h. O Anexo Nacional da NP EN 13108-1 recomenda que deverá utilizar-se o procedimento de ensaio B ao ar, para uma temperatura de ensaio de 60°C. Tendo sido adotado o procedimento B, as lajes foram acondicionadas em estufa a 60°C durante 4 horas antes de iniciado o ensaio no equipamento do *Wheel-Tracking*.

Após a colocação da laje no equipamento (Figura 4.6) é iniciada a aplicação de carga através da roda do equipamento para este procedimento, que deve ocorrer durante 10000 ciclos, correspondendo cada ciclo a duas passagens da roda. O ensaio termina quando são atingidos 10000 ciclos, ou quando é atingida uma profundidade de rodeira de 20mm. A norma de ensaio EN 12697-22 recomenda a aplicação de uma carga de cerca de 700N ao provete, o que equivale, a uma tensão de contacto da roda de, aproximadamente, 700kPa.



Figura 4.6 Equipamentos de compactação (esquerda) e de ensaio de *Wheel-Tracking* (direita)

O próprio equipamento, através do *software* de controlo, regista leituras de deformações em cada ciclo, permitindo graficamente obter como resultado uma curva que relaciona o tempo de ensaio (ciclos) com a deformação do provete. A Figura 4.7 apresenta a variação com o tempo da deformação vertical média obtida para series de provetes de laboratório diferindo entre elas a percentagem de betume da mistura. (Gardete, 2006).

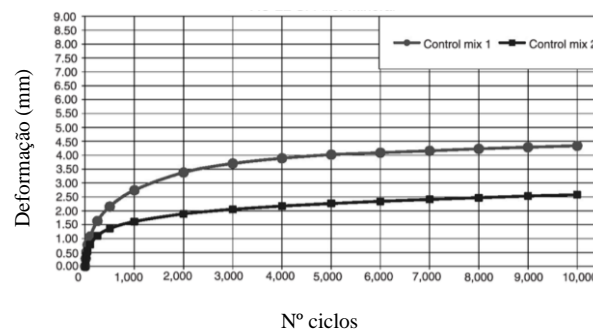


Figura 4.7 Variação com a tempo da deformação vertical média obtida para série de provetes em laboratório (López *et al*, 2015)

É possível distinguir três fases na curva resultante:

- Fase 1 – Que resulta numa variação rápida e acentuada da inclinação da curva, nesta fase verifica-se alguma densificação da mistura devido à ação da roda;
- Fase 2 – A velocidade de deformação é inferior à da fase 1 e toma um valor constante. Nesta fase a curva de deformação é quase linear, pelo que a velocidade de deformação obtida nesta fase é usualmente o indicador utilizado para a caracterização das misturas betuminosas à deformação permanente;
- Fase 3 – Nesta fase a velocidade de deformação cresce rapidamente sofrendo o provete deformações apreciáveis. Esta fase é associada à rotura do provete (Gardete, 2006).

A análise dos valores resultantes deste ensaio permite a determinação de vários parâmetros, os quais avaliam a resistência da mistura betuminosa à deformação permanente. Os parâmetros

medidos são: a percentagem de profundidade média da rodeira, expressa em mm, PRD_{AIR} (*Mean Proportional Ruth Depth in air*) e o valor da taxa de deformação média *Wheel-Tracking*, expressa em mm/10³ ciclos, WTS_{AIR} (*Mean Wheel-Tracking Slope*). Em termos numéricos, a percentagem de profundidade média da rodeira, PRD_{AIR} é calculada através de uma média da percentagem de profundidade média da rodeira de cada conjunto de duas lajes.

Na Figura 4.8 apresenta-se uma lajeta após a realização do ensaio.

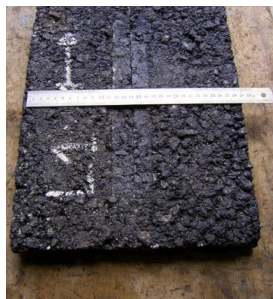


Figura 4.8 Laje após o ensaio

O valor da taxa de deformação média *Wheel-Tracking*, designado por WTS_{AIR} (*Mean Wheel-Tracking Slope*), obtida no final do ensaio é dada pela equação (4.3):

(4.3)

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5}$$

Onde:

- d_{10000} é a profundidade média da rodeira após a aplicação de 10000 ciclos de carga, expresso em mm;
- d_{5000} é a profundidade média da rodeira após a aplicação de 5000 ciclos de carga, expresso em mm.

O valor de PRD_{AIR} (*Mean Proportional Ruth Depth in air*), é calculado pela equação (4.4).

(4.4)

$$PRD_{AIR} = \frac{RD_{AIR}}{h}$$

Onde:

- $RD_{AIR} = d_{10000}$;
- h é a altura da laje, expresso em mm.

Os valores resultantes deste ensaio, WTS_{AIR} e PRD_{AIR} , permitem que a avaliação em laboratório da resistência à deformação permanente de uma mistura seja declarada, de acordo com as categorias indicadas na norma NP EN 13108-1. A título exemplificativo, apresentam-se na tabela 4.3 e 4.4 as categorias exigidas para a taxa (ou velocidade) de deformação média em ensaio de pista (WTS_{AIR}) e para a percentagem de profundidade média da rodeira (PRD_{AIR}), de acordo com a NP EN 13108-1.

Tabela 4.3 Categorias de WTS_{air}

Taxa de deformação em ensaios de pista, mm por 10 ³ ciclos de carga	Categoria WTS _{air}
0,03	WTS _{AIR0,03}
0,05	WTS _{AIR0,05}
0,07	WTS _{AIR0,07}
0,10	WTS _{AIR0,10}
0,15	WTS _{AIR0,15}
0,30	WTS _{AIR0,30}
0,40	WTS _{AIR0,40}
0,50	WTS _{AIR0,50}
0,60	WTS _{AIR0,60}
0,80	WTS _{AIR0,80}
1,00	WTS _{AIR1,00}
Não requerido	WTS _{AIRNR}

Tabela 4.4 Categorias de PRD_{air}

Percentagem de profundidade de rodeira, máxima %	Categoria PRD _{air}
1,0	PRD _{AIR1,0}
1,5	PRD _{AIR1,5}
2,0	PRD _{AIR2,0}
3,0	PRD _{AIR3,0}
5,0	PRD _{AIR5,0}
7,0	PRD _{AIR7,0}
9,0	PRD _{AIR9,0}
Não requerido	PRD _{AIRNR}

4.3 Síntese

O anexo nacional da NP EN 1308-1 sugere, por razões de simplicidade de aplicação, que a formulação em laboratório de misturas betuminosas fabricadas a quente seja efetuada com base no método de Marshall.

A referida norma propõe também a realização de ensaios complementares a incluir nos estudos de formulação, designadamente a avaliação da sensibilidade à água e da resistência à deformação permanente das composições a que se chega pelo método de Marshall.

Assim, a formulação empírica tal como é proposta na NP EN 1308-1, estabelece a composição de uma mistura betuminosa com base num conjunto de características

volumétricas e mássicas do material, ao mesmo tempo que considera vários parâmetros de resistência mecânica que, embora não permitam medir diretamente o desempenho, dão algumas indicações sobre a bondade do comportamento da mistura, tendo por base a experiência passada.

5 Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas

5.1 Descrição do Método

5.1.1 Princípios e pressupostos

O Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária SHRP (*Strategic Highway Research Program*) foi iniciado, nos EUA, em 1987 para o desenvolvimento de um novo sistema de especificações de materiais betuminosos. O SUPERPAVE (*SUperior PERformance asphalt PAVEments* – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior) foi um dos produtos finais do programa SHRP concebido para auxiliar na seleção de materiais e formulação de misturas. Este sistema especifica materiais, formula e analisa misturas betuminosas e prevê o desempenho de pavimentos. Inclui equipamentos de ensaios, métodos e critérios. A aplicação do método SUPERPAVE depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia. Foram desenvolvidos três níveis de formulação de misturas betuminosas que são explicitados no ponto 5.1.2. (FHWA/NHI, 2000).

Devido à necessidade de uma alternativa ao método de Marshall, surgiu o método de formulação volumétrica, de maneira a conseguir colmatar algumas das lacunas existentes no método de Marshall, tornando a formulação mais eficaz, incidindo mais no estudo do desempenho de misturas betuminosas quando em serviço. Tal como no método de Marshall, diferentes composições granulométricas da mistura são ensaiadas utilizando várias percentagens de betume, sendo os provetes compactados com a PGC (Prensa Giratória de Corte). A percentagem ótima de betume é calculada com base na porosidade, a qual vai sendo calculada ao longo do processo de compactação dos provetes, visto que o equipamento permite que se conheça a altura dos provetes durante o processo.

Sabendo a porosidade para vários níveis de compactação, torna-se possível selecionar a percentagem ótima de betume. Esta vai corresponder à porosidade desejada para a mistura, correspondendo geralmente a um valor de 4%. Este valor traduz a chamada compactação de construção, assumida como aquela em que se obtém 92% da baridade máxima teórica. Verifica-se assim que a energia de compactação vai influenciar diretamente a percentagem ótima de betume obtida, tornando-se esta energia um critério essencial nesta metodologia. O controlo da energia de compactação é efetuada através do controlo do número de giros a que o provete é sujeito, o chamado de N_{design} . O valor do N_{design} varia, geralmente, entre 80 e 100 giros, o que, segundo alguns autores, permite obter um bom equilíbrio das propriedades da mistura, nomeadamente na resistência à deformação permanente e à fadiga (Prozzi et al., 2007).

5.1.2 Níveis de formulação

O método de formulação SUPERPAVE de misturas betuminosas considera três níveis de exigência, em função da solicitação a que o pavimento no qual irá ser aplicada a mistura

estará previsivelmente sujeito (Gomes, 2005). O primeiro nível de formulação é aquele em que se procede à determinação da percentagem ótima em betume na mistura através das propriedades volumétricas, utilizando provetes compactados no compactador giratório. Os restantes dois níveis de formulação compreendem ensaios mecânicos e de desempenho das misturas, como sejam a avaliação da resistência à deformação permanente e à fadiga, ou a determinação do módulo de deformabilidade. Na Tabela 5.1 faz-se uma síntese das condições de aplicação de cada um dos níveis da metodologia SUPERPAVE.

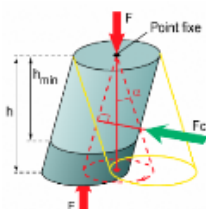
Tabela 5.1 Requisitos para cada nível de formulação (Gomes, 2005)

Nível	SUPERPAVE	Tráfego (eixos de 80 kN)	Requisitos
1 – Pavimentos com tráfego leve	Formulação volumétrica	$\leq 10^6$	Seleção dos materiais e proporções volumétricas
2 – Pavimentos com tráfego pesado	Análise intermédia	$\leq 10^7$	Formulação volumétrica + ensaios para a previsão do desempenho
3 – Pavimentos com tráfego muito pesado	Análise completa	$> 10^7$	Formulação volumétrica + ensaios para a previsão do desempenho em maior número

O nível 1 deste método de formulação aplica-se para um tráfego ligeiro ($NAEP_{80kN} \leq 10^6$). Este método consiste em efetuar uma avaliação volumétrica da mistura, devendo os materiais constituintes cumprir as respetivas especificações. No nível 1 estão compreendidas três fases principais (Gomes, 2005):

- Seleção dos materiais (agregados e betume);
- Determinação da curva granulométrica da mistura de agregados;
- Determinação da percentagem de betume da mistura betuminosa.

No nível 1 do método de formulação SUPERPAVE os provetes da mistura betuminosa são compactados com o compactador giratório, nas condições que se ilustram na Figura 5.1, a qual procura reproduzir as condições de compactação *in situ* (Gomes, 2005). Este foi o nível usado no trabalho laboratorial realizado no âmbito da presente dissertação.



F – Força Axial h_{min} – Altura do provete no início do ensaio

F_c – Força de corte

h – Altura do provete após N giros

Figura 5.1 Configuração do provete durante o processo de compactação no compactador de corte giratório (Memoire Online, 2013)

Durante a compactação a PGC efetua vários giros do provete, em torno do seu eixo vertical, como assinalado na figura 5.1, ao mesmo tempo que um pistão aplica uma pressão vertical sobre o material colocado dentro de um molde cilíndrico. Este equipamento permite avaliar, no decorrer da compactação, a massa volúmica da mistura betuminosa (figura 5.2) e a porosidade em função do número de giros. Deste modo pode obter-se a curva de densificação da mistura betuminosa. (Gomes, 2005).

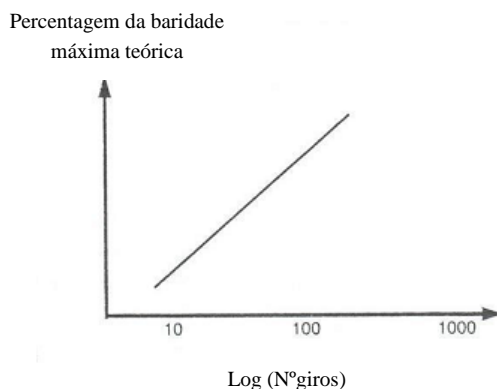


Figura 5.2 Evolução típica das características da mistura em função do número de giros durante a compactação no compactador de corte giratório *SUPERPAVE* (Gomes, 2005)

Os níveis 2 e 3 do método de formulação *SUPERPAVE* envolvem ensaios de avaliação e modelos de previsão do desempenho. Os ensaios de avaliação do desempenho que foram desenvolvidos envolvem dois ensaios: o ensaio de corte (*SUPERPAVE Shear Tester- SST*), representado na figura 5.3, e o ensaio de tração indireta (*Indirect Tensile Tester ITT*) ilustrado na figura 5.5 (Gomes, 2005). A figura 5.5 mostra a estrutura dos vários níveis da formulação *SUPERPAVE*.

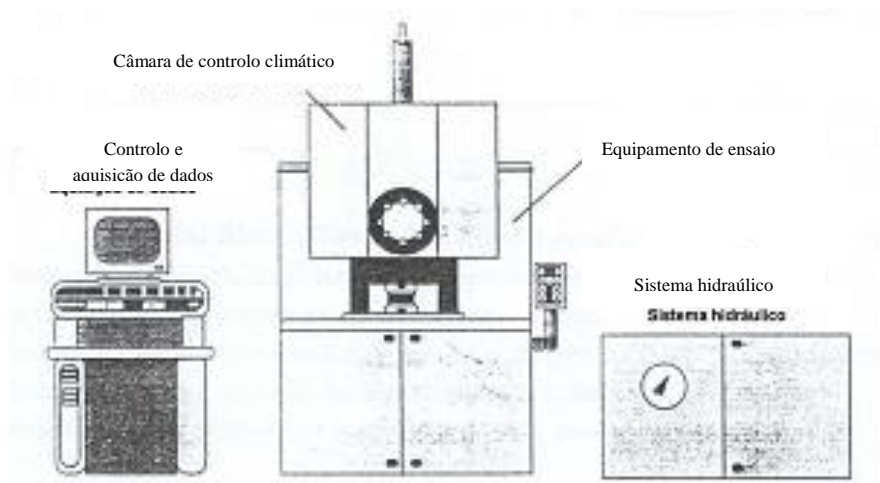


Figura 5.3 Equipamento SST (*SUPERPAVE Shear Tester*) (Gomes, 2005)



Figura 5.4 Equipamento ITT (Indirect Tensile Tester) (Shell, 2003)

Nestes equipamentos é possível realizar vários ensaios de acordo com a tabela 5.2.

Tabela 5.2 Ensaios a efetuar com o SST e ITT (Gomes,2005)

Equipamento	Ensaio
Equipamento SST (<i>SUPERPAVE Shear Tester</i>)	Ensaio volumétrico
	Ensaio de extensão uniaxial
	Ensaio de corte repetido a taxa de tensão constante
	Ensaio de corte repetido a altura constante
	Ensaio de corte simples a altura constante
	Ensaio de corte a altura constante com varrimento de frequências
Equipamento ITT (<i>Indirect Tensile Tester</i>)	Ensaio de fluência por tração indireta
	Ensaio de avaliação da resistência à tração indireta

O nível 2 do programa SUPERPAVE envolve ensaios de avaliação do desempenho a uma temperatura efetiva (T_{ef}). Devido ao facto das deformações permanentes e fendilhamento por fadiga ocorrerem a temperaturas diferentes são utilizadas duas temperaturas efetivas: T_{ef} (DP) e T_{ef} (FF) (AI, 1997). Ambas as temperaturas são determinadas no programa informático SUPERPAVE e são função da temperatura média anual do ar, espessura da camada e fiabilidade escolhida pelo utilizador (Gomes, 2005).

O nível 3 envolve uma avaliação mais rigorosa do desempenho do pavimento dado que envolve uma gama de temperaturas mais alargada (4°C, 20°C e 40°C). Este aspecto permite a utilização do modelo de efeitos ambientais do SUPERPAVE para prever de forma mais eficiente o desempenho do pavimento (AI, 1997, referido por Gomes, 2005).

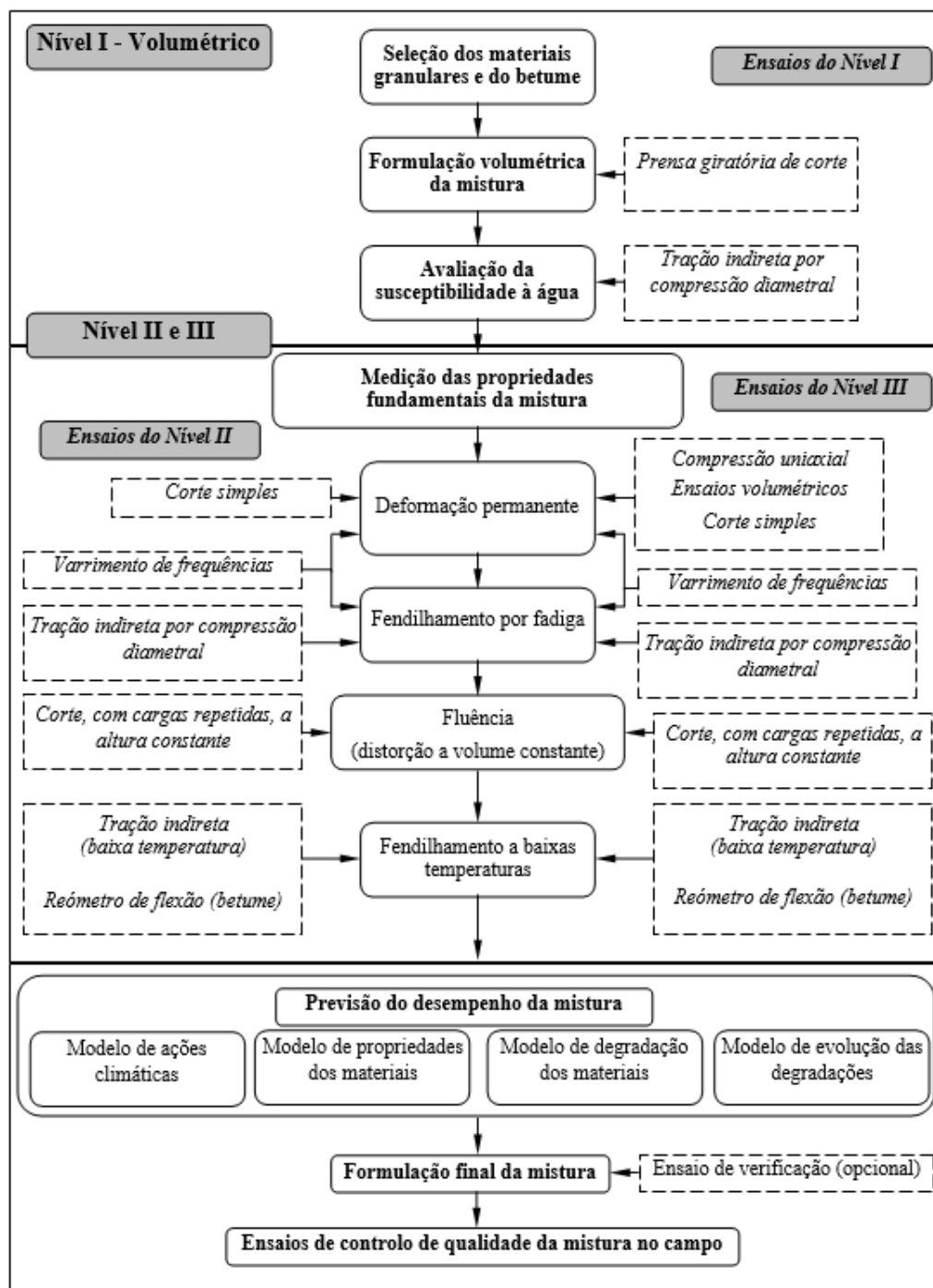


Figura 5.5 Estrutura dos vários níveis de formulação do SUPERPAVE (Capitão, 2003)

A utilização da PGC é considerada uma técnica adequada para simular em laboratório a compactação em obra, apesar de existirem estudos que mostram que, apesar de o volume de vazios ser muito semelhante ao verificado em obra, a distribuição dos vazios não reproduz integralmente o que acontece em obra. Através de tomografia computadorizada foi possível provar que ao contrário do que acontece em laboratório, o volume de vazios é maior nos topos e menor no centro do provete (Figuras 5.6 e 5.7).

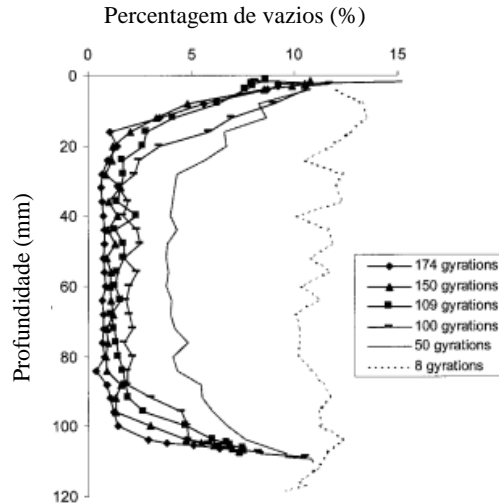


Figura 5.6 Distribuição da percentagem de vazios ao longo da altura do provete produzido em laboratório com a PGC, em função do número de giros (Massad *et al*, 1999).

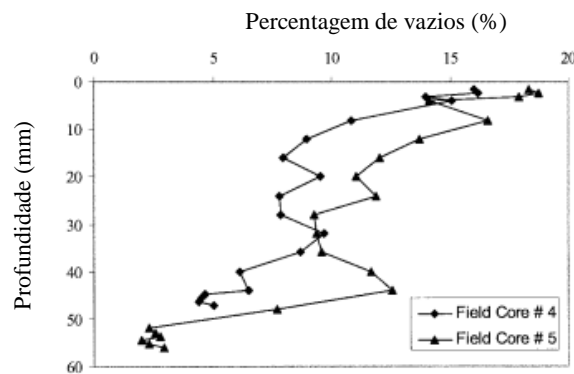


Figura 5.7 Distribuição da percentagem de vazios ao longo da altura do provete recolhido do pavimento (Massad *et al*, 1999)

Tal como se observa na figura 5.6, para um número pequeno de giros a distribuição de vazios é quase uniforme ao longo da altura do provete. Com o aumento do número de giros, a zona central do provete passa a ficar mais compactada, e por isso ter uma menor percentagem de vazios, ou seja, verificam-se diferenças maiores entre a percentagem de vazios nos topos e no centro do provete.

Pela análise da figura 5.7 verifica-se que a percentagem de vazios numa camada de pavimento tem tendência a ser maior à superfície, diminuindo gradualmente com o aumento da profundidade, até à face em que a camada está apoiada na subjacente.

5.1.3 Procedimentos de ensaio

A prensa giratória de corte (figura 5.8) utilizada para compactar os provetes tem os seguintes componentes (FHWA/NHI, 2000):

- Quadro de rotação, base giratória e motor;
- Sistema de aplicação da carga, êmbolo de carregamento e medidor de pressão;
- Sistema de medição de altura e de gravação de dados;
- Molde e prato de base.

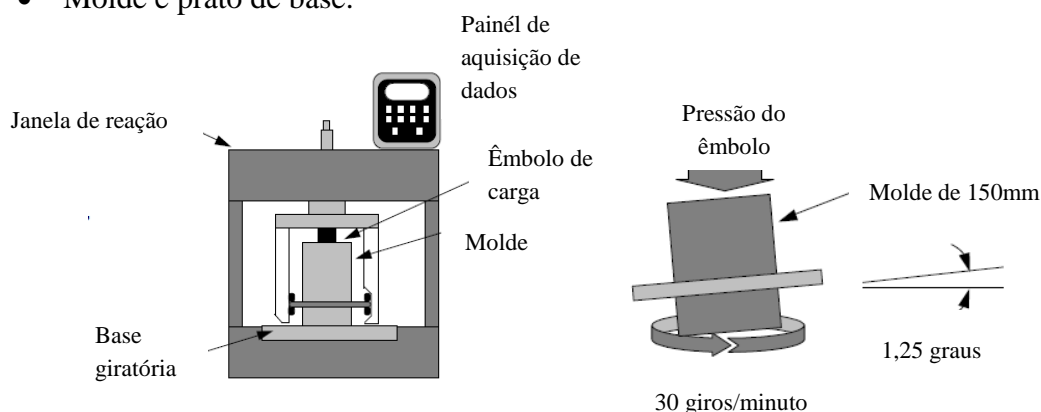


Figura 5.8 Equipamento de ensaio para o Método Volumétrico (FHWA/NHI, 2000)

A base de reação proporciona uma estrutura rígida contra a qual o êmbolo de carregamento pode exercer uma força durante a compactação dos provetes. A base da PGC gira e é fixada ao quadro de rotação. Esta suporta o molde enquanto a compactação ocorre. A PGC utiliza um molde com um diâmetro interno de 150mm e uma altura nominal de pelo menos 250mm. A placa de base encontra-se encaixada no fundo do molde de maneira a conseguir-se um confinamento do provete durante a compactação. São utilizados rolamentos de reação para se conseguir posicionar o molde com um ângulo de compactação de 1,25 graus, o que corresponde ao ângulo de compactação da PGC. Um motor elétrico impulsiona a base rotativa de maneira a esta rodar a uma velocidade constante de 30 rotações por minuto (FHWA/NHI, 2000).

Um sistema hidráulico ou mecânico aplica uma carga ao êmbolo de carregamento, o qual transfere uma pressão de compactação de 600kPa ao provete. O diâmetro do êmbolo de carregamento é de 150mm, correspondendo ao diâmetro interior do molde. Um medidor de pressão mede a pressão aplicada no provete no decorrer do ensaio. O medidor de pressão e o êmbolo de carregamento são os responsáveis por manter a pressão constante durante o ensaio, visto que o provete vai sofrendo uma densificação ao longo do processo (FHWA/NHI, 2000).

A medição da altura do provete no decorrer do ensaio é uma função importante da PGC (Figura 5.9). Conhecendo a massa da amostra colocada no molde, o diâmetro deste e a altura da amostra é possível estimar a baridade do provete em qualquer momento do processo de compactação no decorrer do ensaio. A baridade é obtida dividindo a massa da amostra pelo volume. Em cada instante de medição, este volume é o de um cilindro de face lisa, com um

diâmetro de 150mm e uma altura igual ao valor medido pela PGC nesse momento. A altura é obtida medindo a posição do êmbolo em determinados intervalos de tempo. Os sistemas da PGC encontram-se ligados a um computador com uma placa de aquisição de dados, sendo o cálculo dos parâmetros efetuados através dum *software* específico (FHWA/NHI, 2000).

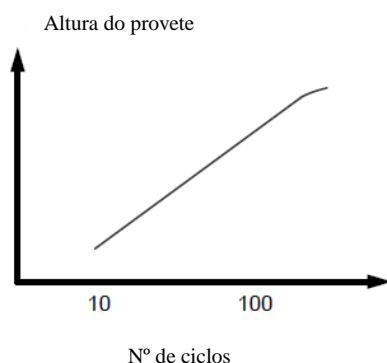


Figura 5.9 Evolução da altura do provete com o nº de ciclos (FHWA/NHI, 2000)

Tal como explicitado anteriormente, a energia de compactação vai influenciar diretamente a percentagem ótima de betume a que se chega. Por sua vez, esta energia vai depender do número de ciclos a que o provete vai estar sujeito no decorrer do ensaio. Em suma, existem três níveis de energia de compactação, associados a diferentes números de ciclos a aplicar ao provete a ensaiar, os quais se descrevem a seguir e se resumem na tabela 5.3:

- **N_{initial}**: número de ciclos usado como uma medida de caracterização da compactabilidade da mistura durante a construção, fornecendo uma previsão da qualidade do agregado. Por exemplo, misturas que compactem muito rapidamente (percentagem de vazios com $N_{initial}$ muito baixas), podem tornar-se instáveis e muito maleáveis;
- **N_{design}**: número de ciclos necessários para produzir um provete com a mesma baridade que se espera existir em obra, após o pavimento ter sido solicitado pelo tráfego no seu período de vida útil. A percentagem de vazio ideal com N_{design} é de 4%;
- **N_{max}**: número de ciclos necessários para produzir um provete com uma baridade que nunca deverá ser excedida em obra. Se a percentagem de vazios com N_{max} for muito baixa, a mistura poderá estar mais propícia à deformação permanente quando submetida a tráfego elevado. A percentagem de vazios com N_{max} nunca deverá ser menor que 2%.

As primeiras especificações definiam 28 valores diferentes para N_{design} , conforme o tráfego e a temperatura prevista para o pavimento. No entanto, alguns estudos revelaram que a diferença nas propriedades volumétricas obtidas entre os níveis de compactação para diferentes temperaturas era muito pequena, facto que se deve à utilização de betumes mais viscosos para temperaturas mais elevadas (Brown *et al.*, 2001). Deste modo, o número de níveis de formulação foi reduzido para quatro (AASHTO, 2001), diferindo com o tráfego esperado para o pavimento (Gardete *et al.*, 2009).

Tabela 5.3 Níveis de compactação para a formulação pelo método SUPERPAVE nível 1 (adaptado de PI, 2012)

Tráfego 20 anos (em milhões de eixos padrão de 80kN)	Nº de ciclos		
	N _{initial}	N _{design}	N _{max}
< 0,3	6	50	75
0,3 a < 3	7	75	115
3 a < 10 *	8 (7)	100 (75)	160 (115)
10 a < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

* Quando o Tráfego para 20 anos (em milhões de eixos padrão de 80kN) está no intervalo 3 a <10 a entidade gestora poderá especificar N_{initial}=7, N_{design}=75 e N_{max}=115

Habitualmente, os provetes são compactados com N_{design} para se conseguir calcular a percentagem ótima de betume, que é determinada como a que permite obter um volume de vazios de 4%. Adicionalmente, são compactados alguns provetes com N_{max} como verificação. A tabela 5.4 indica os valores aconselhados de baridades para N_{initial}, N_{design} e N_{max} (AASHTO, 2001). Na figura 5.10 mostra-se, a título ilustrativo uma PGC.

Tabela 5.4 Baridade aconselhável para cada nível de compactação (adaptado de PI, 2012)

Tráfego em 20 anos (milhões de eixos padrão de 80kN)	Baridade aconselhável (definida como % da baridade máxima teórica)		
	N _{initial}	N _{design}	N _{max}
< 0,3	≤ 91,5	96	≤ 98,0
0,3 a < 3	≤ 90,5		
3 a < 10	≤ 89,0		
10 a < 30			
≥ 30			



Figura 5.10 Equipamento Gyrocomp Gyratory Compactor da CONTROLS (Controls-Group, 2014)

As misturas betuminosas são produzidas da forma que se descreveu para o método empírico, sendo utilizadas quatro percentagens de betume. Os provetes são compactados com a PGC a uma determinada temperatura que depende do tipo de mistura.

As misturas são compactadas com o compactador de corte giratório para se obterem curvas de densificação das misturas (permite avaliar no decorrer da compactação a massa volúmica da mistura betuminosa compactada e o volume de vazios em função do número de giros), após terem sido sujeitas a um envelhecimento de curto prazo.

Como se referiu, a baridade da mistura compactada em cada momento (para cada n^o de ciclos) é estimada a partir da massa da amostra, da altura do provete que está a ser compactado nesse momento de densificação e do raio do molde. Tal implica um erro inerente ao facto do provete poder não ocupar o molde em todo o seu diâmetro devido à existência de irregularidades no topo superior de compactação. Assim, no fim da compactação, para N_{max}, é determinada através de ensaio a baridade da mistura compactada do provete.

O quociente entre a baridade do provete determinada experimentalmente após compactação e a baridade calculada pelo *software* da PGC para N_{max} é o fator de correção que é aplicado a todos os valores da baridade da mistura compactada calculados pelo *software* da PGC. Assim, a curva de densificação do provete pode representar-se graficamente pela evolução da baridade com o número de ciclos.

Além disso, após a determinação experimental da baridade máxima teórica do provete, a curva de densificação pode ser traduzida pela evolução da baridade, calculada em percentagem da baridade máxima teórica, com o número de giros. Para isso, é necessário levar em linha de conta o fator de correção da baridade calculada pelo *software* da PGC que se referiu anteriormente. A percentagem de baridade máxima teórica (C) de uma mistura para um determinado valor de giros (N) é definido pela equação (5.1) (Gomes, 2005).

(5.1)

$$C(N) = \frac{Gmb(N)}{Gmm} \times 100$$

Onde:

- $Gmb(N)$ é a baridade da mistura betuminosa compactada, considerando o volume total aparente da mistura betuminosa compactada;
- Gmm é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa, considerando o volume total da mistura betuminosa com exceção do volume de vazios da mistura betuminosa.

5.1.4 Parâmetros utilizados na formulação pelo método base

No método volumétrico, a percentagem “ótima” de betume é selecionada como aquela que permite obter a porosidade desejada de 4% para a energia de compactação considerada para a formulação, ou seja, para N_{design}. Depois de obtida esta percentagem “ótima” é necessário confirmar se essa percentagem permite cumprir os critérios requeridos pelo *SUPERPAVE*, no que diz respeito a algumas propriedades da mistura:

1. Porosidade para N_{initial} > 11% (para tráfego em 20 anos ≥ 3 milhões de eixos de 80 kN);
2. Porosidade para N_{max} > 2%;

3. VMA acima do mínimo especificado na tabela 5.5;
4. VFB dentro do intervalo especificado na tabela 5.5.

Depois de efetuados os ensaios e escolhida a percentagem “ótima” em betume, tal como se exemplifica na figura 5.11, é necessário garantir que a mistura selecionada satisfaz os limites especificados para diversas propriedades volumétricas, nomeadamente, o VMA (vazios no esqueleto do agregado), VFB (vazios preenchidos por betume) e a relação filer/betume. A tabela 5.5 especifica quais os limites a serem respeitados, de acordo com Brown et al. (2001), referidos por (Gardete et al., 2009).

Tabela 5.5 Limites especificados para propriedades das misturas compactadas com PGC (Brown et al., 2001)

Tráfego em 20 anos (milhões de eixos padrão de 80kN)	Grau de Compactação (definido como % da baridade máxima teórica)			VMA (mínimo %)					VFB (%)	Filer/betume
	N _{initial}	N _{design}	N _{max}	Dimensão máxima do agregado (mm)						
				37,5	25	19	12,5	9,5		
< 0,3	≤ 91,5	96	≤ 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	70-80	0,6 a 1,2
0,3 a < 3	≤ 90,5								65-78	
3 a 30	≤ 89,0								65-75	
≥ 30										

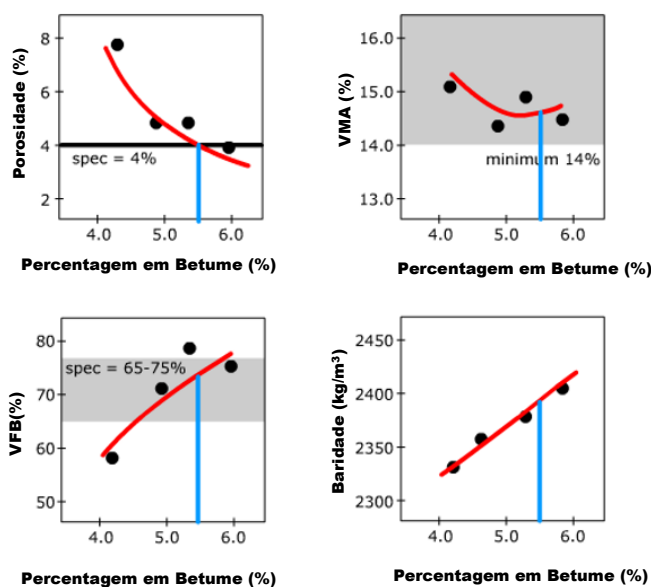


Figura 5.11 Exemplo do processo de escolha do teor “ótimo” em betume (adaptado de PI, 2012)

O valor do volume de vazios do esqueleto mineral da mistura de agregados (VMA) e o valor da percentagem desse volume de vazios ocupados por betume (VFB) para N_{design} podem ser obtidos pelas equações (5.2) e (5.3) (FHWA/NHI, 2000):

$$VMA = 100 - \left[\frac{C(N_{design}) \times Gmm \times Pa}{Gsb} \right] \quad (5.2)$$

$$VFB = 100 \times \left[\frac{VMA - Vv}{VMA} \right] \quad (5.3)$$

Onde:

- Vv é o volume de vazios;
- Pa é a percentagem de agregados na mistura betuminosa;
- Gmm é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa, considerando o volume total da mistura betuminosa com exceção do volume de vazios da mistura betuminosa;
- Gsb é razão entre massa de um dado volume de agregado seco pesado ao ar (incluindo os vazios permeáveis e impermeáveis) e a massa de água para um mesmo volume, a uma dada temperatura;
- $C(N_{design})$ é a percentagem da baridade máxima teórica (C) de uma mistura para o valor de giros N_{design} .

5.1.5 Indicador Complementar com base no ensaio com a PGC

Com a evolução da compactação dos provetes é possível avaliar a trabalhabilidade das misturas, o que influencia a sua compactabilidade. Com base nas curvas de compactação obtidas na prensa giratória de corte podem determinar-se indicadores tais como o CEI (*Compaction Energy Index*).

O CEI traduz os resultados da compactação entre o giro 8 e aquele em que se obtém 92% da baridade máxima teórica (BMT), o qual pode ser traduzido pela equação(5.4).

$$CEI = \sum_{i=N8}^{i=N(\%BMT=92\%)} (\%BMT_{Ni} - \%BMT_{N8}) \quad (5.4)$$

Onde:

- $\%BMT_{Ni}$ é a percentagem da baridade máxima teórica no ciclo i ;
- $\%BMT_{N8}$ é a percentagem da baridade máxima teórica no ciclo 8;

- $N(\%BMT = 92\%)$ é o giro no qual se obtém uma compactação de 92% da baridade máxima teórica.

Teoricamente, o CEI representa a energia aplicada pelo cilindro compactador durante a aplicação da mistura betuminosa em obra para se obter a baridade necessária. O número de 8 giros foi selecionado para simular o esforço aplicado pela pavimentadora aquando da colocação da mistura betuminosa em obra. A referência de 92% da baridade máxima teórica corresponde à baridade desejada no final da construção da camada betuminosa, antes da abertura ao tráfego (Mahmoud *et al.*, 2004).

As misturas com valores de CEI menores têm, em geral, uma melhor trabalhabilidade (podem compactar-se mais facilmente), sendo, por isso, as desejadas. Contudo, as misturas com um CEI muito baixo tendem a ser exageradamente moles, o que deve ser evitado (Mahmoud *et al.*, 2004).

5.2 Síntese

A designação de “métodos volumétricos” resulta do facto das dosagens dos materiais constituintes da mistura serem obtidos através da análise dos volumes parcelares que compõem a mistura (agregados, betume e vazios).

Estes volumes são medidos sobre provetes produzidos em laboratório de modo a reproduzirem, tão fielmente quanto possível, as condições de compactação aplicadas em obra.

A formulação através de métodos volumétricos não requer genericamente a realização de ensaios para aferir as propriedades mecânicas, uma vez que se considera que o ensaio de compactação utilizado em laboratório, utilizando uma PGC, permite obter misturas com propriedades volumétricas semelhantes às obtidas em obra. É a avaliação de parâmetros volumétricos, tais como o VMA, a porosidade e o VFB que permitem suportar a decisão sobre a composição a adotar para a mistura.

6 Apresentação, Análise e Interpretação dos Resultados

6.1 Considerações Iniciais

Este trabalho consiste no estudo de dois métodos de formulação de misturas betuminosas a quente: um empírico e outro volumétrico.

Este capítulo trata principalmente da descrição e análise dos trabalhos experimentais levados a cabo neste estudo. Apresentam-se as propriedades dos materiais constituintes das misturas produzidas e as características das composições a que se chegou pelas duas metodologias de formulação em confronto.

Faz-se ainda uma análise dos resultados obtidos com o objetivo de enfatizar os pontos fortes e fracos das metodologias de formulação utilizadas para formular uma mistura do tipo AC 14 surf 35/50.

6.2 Método Empírico

6.2.1 Estudo laboratorial pelo método de Marshall

Como forma de formular a mistura betuminosa foram produzidos provetes em laboratório, com 101 ± 3 mm de diâmetro, os quais foram submetidos aos ensaios geralmente efetuados no âmbito do método de Marshall. Foram fabricados cinco grupos de quatro provetes cada um, incrementando a percentagem de betume em 0,5% de um conjunto para o seguinte, de modo a testar as seguintes percentagens de ligante: 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%.

Os agregados utilizados no estudo experimental provêm da central de betuminosos do Grupo Júlio Lopes, S.A. localizada em Pombal. De acordo com a ficha técnica de cada uma das frações de agregados que se apresentam Anexo I, os agregados têm as características gerais enumeradas na tabela 6.1. As propriedades de cada uma das frações são as indicadas no Anexo I.

Tabela 6.1 Características dos agregados

Material agregado	Descrição
Pó 0/4	98% de calcário e 2% de calcite, com forma subprismática e subdiscoidal, muito anguloso e subarredondado de superfície rugosa/lisa
4/12	Rocha metamórfica – gnaisse Estrutura bandada gnaisica com textura granoblástica
8/20	Rocha metamórfica – gnaisse Estrutura bandada gnaisica com textura granoblástica
Filer	Carbonato de cálcio natural

No estudo laboratorial, utilizou-se um betume de classe de penetração 35/50. Na tabela 6.2 estão descritas as propriedades e exigências de conformidade que o betume de classe de penetração 35/50 deve respeitar, de acordo com a norma EN 12591 e com o CETO da EP.

Tabela 6.2 Propriedades e exigências de conformidade para um betume de classe de penetração 35/50

Requisitos	Propriedades	Referencia Normativa	Unidade	Betume de Penetração 35/50
Consistência da temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25°C	NP EN 1426	0,1 mm	35-50
	Temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	50-58
Durabilidade (Resistência ao envelhecimento - RTFOT a 163°C, NP EN 12607-1)	Penetração retida	NP EN 1426	%	≥ 53
	Aumento da temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	≤ 11
	Variação em massa	NP EN 12607-1	%	≤ 0,5
	Índice de penetração	EN 12591, EN 13927 (Anexo A)	-	-1,5 a +0,7
	Temperatura de fragilidade de Fraas	EN 12593	°C	≤ -5
Outros Requisitos	Temperatura de inflamação	EN ISSO 2592	°C	≥ 240
	Viscosidade cinemática a 135°C	NP EN 12595	mm ² /s	≥ 370
	Teor em parafinas	EN 12606-2	% (m/m)	≤ 4,5
	Solubilidade	NP EN 12592	%	≥ 99,0

A mistura de agregados utilizada era formada pelas seguintes proporções de cada uma das frações disponíveis:

- Brita de gnaiss 8/20: 10 %;
- Brita de gnaiss 4/12: 40 %;
- Pó de calcário 0/4: 48 %;
- Filer: 2 %.

Para a produção da mistura, de acordo com a norma EN 12607-35, aqueceu-se o betume 35/50 a 165°C e os materiais agregados a 160°C, recorrendo a estufas munidas de ventilação forçada.

Antes do fabrico de cada uma das amassaduras, as frações de agregados foram doseadas de forma ponderal e colocadas em tabuleiros à temperatura desejada. Após o correto doseamento

dos componentes, estes foram misturados numa misturadora elétrica, com um sistema de manutenção da temperatura, durante aproximadamente 3 minutos.

Na tabela 6.3 estão descritas as quantidades utilizadas de cada agregado e de betume, para cada série de amostras. Na figura 6.1 encontra-se representada a curva granulométrica da mistura de agregados utilizada nos ensaios.

Tabela 6.3 Quantidades de agregados utilizadas em cada um dos provetes

Pb (%)	Massa Betume (g)	10%	40%	48%	2%
		8/20 (g)	4/12 (g)	0/4 (g)	Filer (g)
4,0	48	115	461	553	23
4,5	54	115	458	550	23
5,0	60	114	456	547	23
5,5	66	113	454	544	23
6,0	72	113	451	541	23

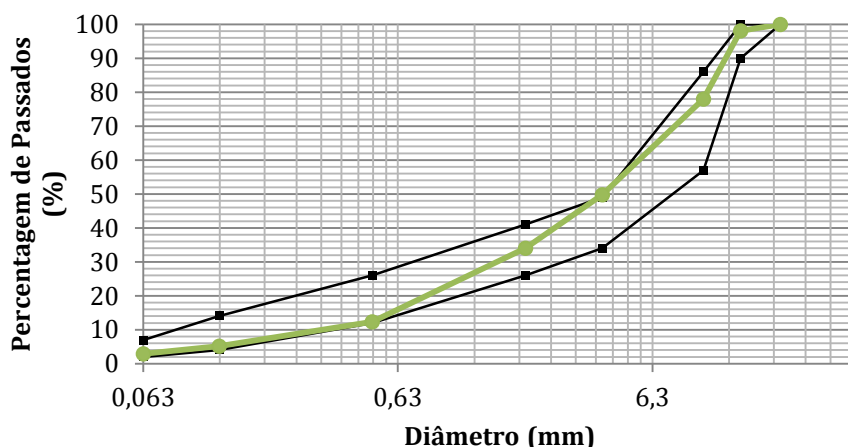


Figura 6.1 Fusão granulométrica a cumprir e curva da mistura

Os provetes foram compactados pela aplicação de impactos sucessivos, tal como se descreveu no Capítulo 4. Depois de produzidos os provetes necessários, determinaram-se as suas propriedades volumétricas. Os valores obtidos para a baridade e para a porosidade são os que se indicam nos gráficos da figura 6.2, através das equações (2.5) e (2.4), respetivamente. A porosidade foi determinada com base nos resultados da baridade máxima teórica obtida pelo método volumétrico.

Na figura 6.3 mostram-se os resultados da baridade máxima teórica obtidos experimentalmente pelo método volumétrico, e determinados pelo procedimento matemático, tal como descrito na EN 12697-5+A1.

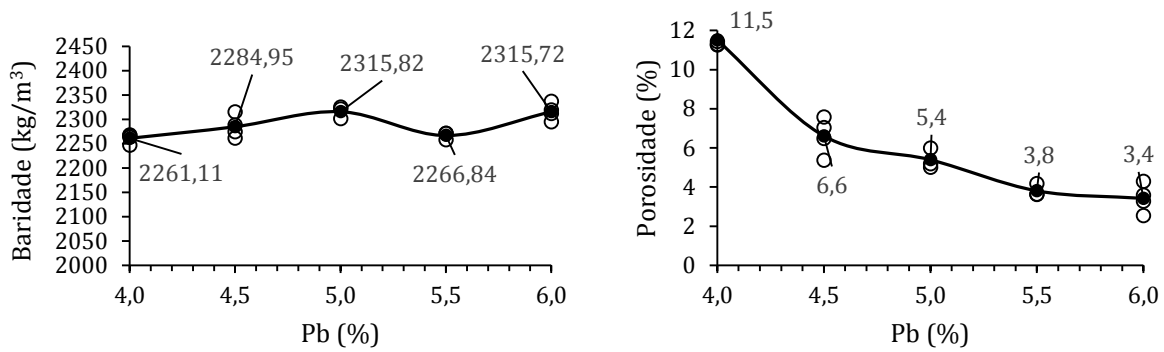


Figura 6.2 Gráficos da variação da baridade e da porosidade com a percentagem de betume

A variação da baridade com a percentagem de betume não apresenta um traçado típico, uma vez que depois da obtenção de valores máximos para uma percentagem de 5%, voltou a apresentar máximos para 6%, quando tipicamente a baridade apresenta apenas um máximo. No entanto, os máximos da baridade no caso em apreço são praticamente iguais.

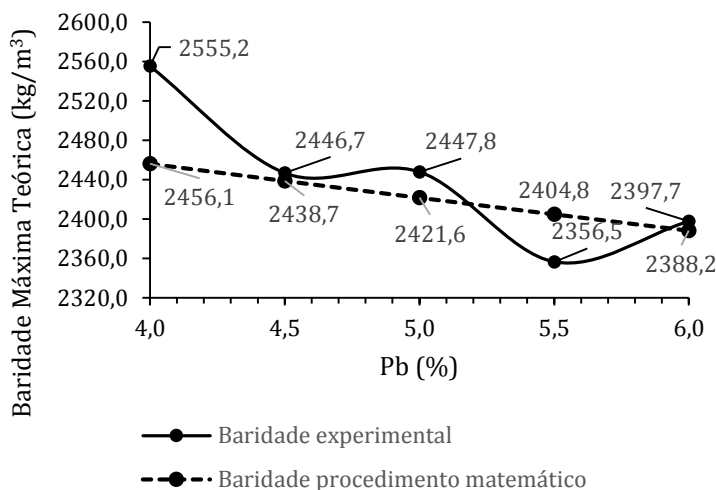


Figura 6.3 Baridade máxima teórica da mistura compactada

Verifica-se alguma divergência de valores entre os resultados obtidos através dos dois procedimentos, particularmente para a percentagem de betume de 4 e 5,5%. Note-se que o procedimento matemático se baseia na composição teórica das misturas, não levando em linha de conta a eventual variação associada ao processo de fabrico dos provetes. Quando a composição das amostras ensaiadas se afasta mais da composição teórica considerada, ocorrem diferenças nos resultados como as que se observam. Para investigar a eventual origem das divergências, poderia repetir-se os ensaios para os casos em que a divergência de resultados é mais acentuada. No caso em análise não foi possível repetir os ensaios.

Os valores calculados para o VMA são os que se apresentam na figura 6.4. Estes resultados foram calculados com base nos valores da porosidade da figura 6.2 e através da equação (2.1).

Verifica-se que o volume de vazios na mistura de agregado (VMA) tem uma traçado aproximadamente típico, em forma de U. Este parâmetro depende diretamente da porosidade.

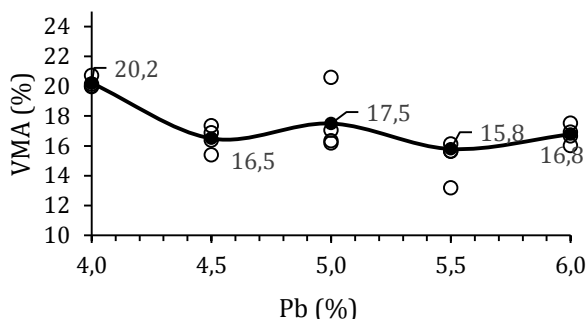


Figura 6.4 Variação do VMA com a percentagem de betume

A figura 6.5 representa a evolução da estabilidade de Marshall e da deformação, respetivamente. Os valores destas propriedades são fornecidos diretamente pelo *software* do equipamento. Os gráficos e resultados ensaio estão explicitados no Apêndice III.

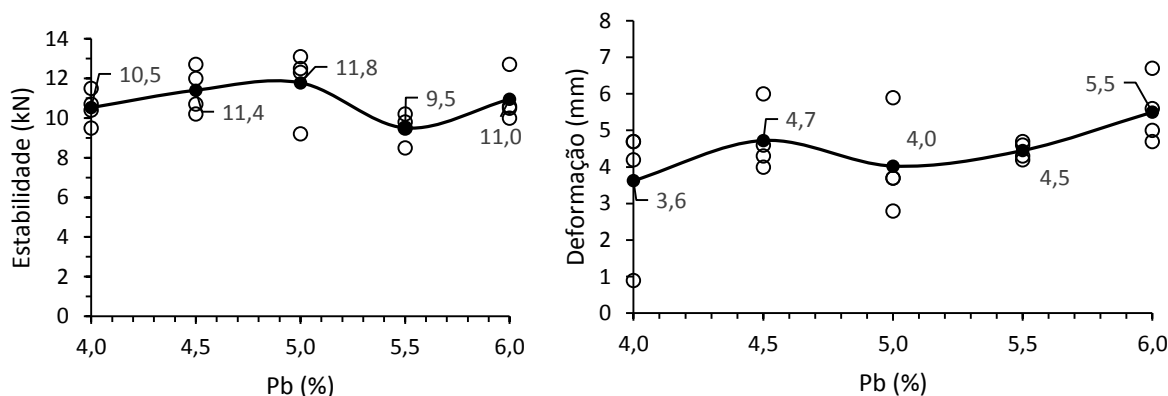


Figura 6.5 Variação dos resultados da estabilidade e da deformação Marshall

Verifica-se que a estabilidade tem um máximo para a percentagem de 5,0% de betume, embora apresente valores da mesma ordem de grandeza para a percentagem de 6,0%. A deformação apresenta alguma dispersão, aumentando tendencialmente com o aumento da percentagem de betume.

A última grandeza obtida através do ensaio de compressão de Marsall é o quociente de Marshall, cujos resultados se encontram representado na figura 6.6. Este valor é obtido através do quociente entre a estabilidade e a deformação, para cada percentagem de betume. Como aquele quociente depende diretamente destas duas propriedades, a dispersão que se obteve para a deformação conduziu a alguma variabilidade dos resultados do quociente de Marshall. Em suma, este quociente corresponde a uma força aplicada (kN) que provoca uma deformação (mm).

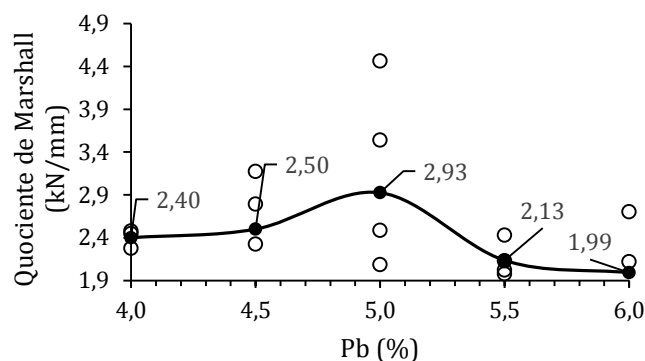


Figura 6.6 Resultados do quociente de Marshall

6.2.2 Percentagem “ótima” em betume

A percentagem “ótima” em betume, de acordo com o Anexo Nacional da NP EN 13108-1, é calculada com base nos resultados combinados dos ensaios de estabilidade Marshall, da baridade e da porosidade dos provetes produzidos. Os valores que dão origem à tabela 6.4, representada a seguir, estão explicitados no Apêndice III e são relativos aos valores médios obtidos nos ensaios laboratoriais efetuados.

A percentagem “ótima” em betume da mistura betuminosa em estudo é determinada a partir dos seguintes gráficos (NP EN 13108-1):

- Percentagem de betume/Estabilidade;
- Percentagem de betume/Baridade;
- Percentagem de betume/Porosidade.

A percentagem “ótima” em betume para a mistura estudada é a média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites da porosidade definidos no CETO da EP, por exemplo. O valor encontrado deverá corresponder a uma deformação e a um VMA dentro de certos limites impostos pelas especificações aplicáveis (também, por exemplo, no CETO da EP). Caso estes critérios não sejam atingidos, será necessário produzir outra mistura que verifique todos os critérios (Branco *et al*, 2008). A tabela 6.4 resume os resultados obtidos, podendo concluir-se que a percentagem ótima em betume para o caso em estudo é de 5,1%.

Tabela 6.4 Cálculo da percentagem “ótima” em betume pelo Método de Marshall

		Pb (%)		
Máxima Estabilidade		5		
Máxima Baridade		6		5,1
Média dos Valores Limites da Porosidade		5,2		
Verificação		Quando Pb=5,1%		
Deformação	Limites	2-4 mm	4	Verifica
VMA		>14	17,5	Verifica

De seguida, torna-se necessário verificar se os resultados obtidos para as diversas variáveis respeitam os limites impostos no CETO da EP (EP, 2012):

- O valor de porosidade para a percentagem ótima de 5,1% de betume foi de 5,3%, o que segundo o CETO da EP está situado entre 3% e 7%;
- Para os provetes com 5,1% de betume o valor de VMA foi de 17,5%, o que está acima do mínimo recomendado pela CETO da EP de 14%;
- O valor encontrado para a resistência dos provetes moldados com a percentagem ótima foi de 11,8kN. No CETO da EP o intervalo indicado é entre 7,5 e 15kN, o qual contém o valor obtido;
- O valor da deformação para a percentagem ótima de betume de 5,1% é de 4mm. Este resultado está no intervalo de 2 a 4 mm preconizado pelo CETO da EP;
- O CETO da EP indica que o quociente de Marshall adequado deve ser superior a 3kN/mm o que é praticamente satisfeito no caso em estudo para a percentagem de betume de 5,1%.

Com a fórmula de trabalho obtida neste estudo, foram moldados os provetes necessários para os ensaios adicionais necessários para a conclusão da formulação da mistura betuminosa pelo método empírico, nomeadamente o ensaio de sensibilidade à água e o ensaio de *Wheel-Tracking*.

6.2.3 Ensaio de sensibilidade à água

A tabela 6.5 resume os valores das quantidades utilizadas para a produção dos seis provetes, com percentagem de betume igual à ótima, obtida através do método de Marshall.

Tabela 6.5 Quantidades utilizadas para a produção de provetes para o estudo da sensibilidade à água

Pb (%)	Massa Betume (g)	Agregado			Filer (g)
		8/20 (g)	4/12 (g)	0/4 (g)	
5,0	60	114	456	547	23

O ensaio de sensibilidade à água avalia a perda de resistência mecânica da mistura betuminosa, em ensaios de compressão diametral, após condicionamento em água em determinadas condições. Na figura 6.7 pode observar-se os provetes após o ensaio. Após a comparação do estado dos provetes do ensaio com a figura 4.5 que representa a existente na EN 12697-2, conclui-se que o tipo de rotura predominante é a rotura combinada.



Figura 6.7 Provetes depois de submetidos à compressão diametral

O resultado obtido para a resistência conservada em tração indireta (ITSR), através dos resultados deste ensaio e pela aplicação da equação (4.2), foi de 76%, o que pode ser considerado um valor aceitável, embora não muito elevado. Relativamente a este parâmetro o CETO da EP (EP, 2012) não determina qualquer valor, indicando apenas o ITSR deve ser uma propriedade declarada aquando da caracterização da mistura. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral encontram-se integralmente apresentados no Apêndice III.

6.2.4 Ensaio de *Wheel-Tracking*

De maneira a proceder à avaliação da resistência à deformação permanente da mistura betuminosa foram produzidas lajes com $40 \times 30 \times 4 \text{ cm}^3$. A compactação foi realizada com a sucessiva passagem dum cilindro vibrador de dois rolos, com 350 kg de massa total, usando a sua máxima potência de vibração (60 Hz com amplitude de 0,35 mm). A altura do provete, com um valor máximo de 80mm, varia consoante a dimensão máxima dos agregados da mistura. De acordo com a norma, para misturas com uma dimensão máxima de agregado entre 8 e 16 mm, as lajes devem apresentar uma espessura de 40mm, como acontecia no caso em estudo. Compactaram-se lajes com três percentagens de betume, em torno da percentagem ótima de betume determinada pelo método de Marshall: 4,5%, 5,0% e 5,5%. Além disso, para o ensaio com equipamento pequeno com provetes ensaiados ao ar, o número mínimo de lajes a ensaiar é de duas para cada percentagem de betume. Na tabela 6.6 e 6.7 resumem-se, respetivamente, as composições utilizadas na preparação das lajes e os valores utilizados para a determinação das suas baridades.

Tabela 6.6 Quantidades para fabrico de lajes moldadas para o ensaio com o Wheel-Tracking

Designação da Laje	Pb (%)	Quantidades (g)				
		Betume	Brita de Gnaisse 8/20	Brita de Gnaisse 4/12	Pó de Calcário 0/4	Fíler
L1	4,50	494	1047	4190	5028	209
L2		494	1047	4190	5028	209
L3	5,00	549	1043	4171	5006	209
L4		549	1043	4171	5006	209
L5	5,50	603	1036	4144	4973	207
L6		603	1036	4144	4973	207

Tabela 6.7 Baridade das lajes ensaiadas no ensaio de Wheel-Tracking

Laje	Pb (%)	Determinação da baridade						
		Massa ao Ar (g)	Massa Hidrostática (g)	Massa com sup.seca com pano (g)	T (°C)	k	Baridade geométrica (g/cm ³)	Baridade ssd (g/cm ³)
L1	4,5	10897,8	6247,4	10919,4	20,5	1,00108	2,348	2,338
L2		10754,8	6246,6	10829,6	20,5	1,00108	2,391	2,352
L3	5,0	10720,9	6244,5	10735,2	21,0	1,00100	2,400	2,392
L4		10923,2	6236,5	10980	21,8	1,00076	2,334	2,306
L5	5,5	10887	6119,6	10795,6	21,8	1,00076	2,287	2,332
L6		10865,1	6273,2	10948,6	21,8	1,00076	2,370	2,327

O resultado do ensaio de *Wheel-Tracking* é geralmente traduzido por uma curva que relaciona o tempo de ensaio (expresso em nº ciclos) com a deformação do provete, tal como se mostra na figura 6.8 para o caso estudado. A informação geral relativa aos elementos determinados no âmbito dos ensaios de *Wheel-Tracking* encontram-se no Apêndice III.

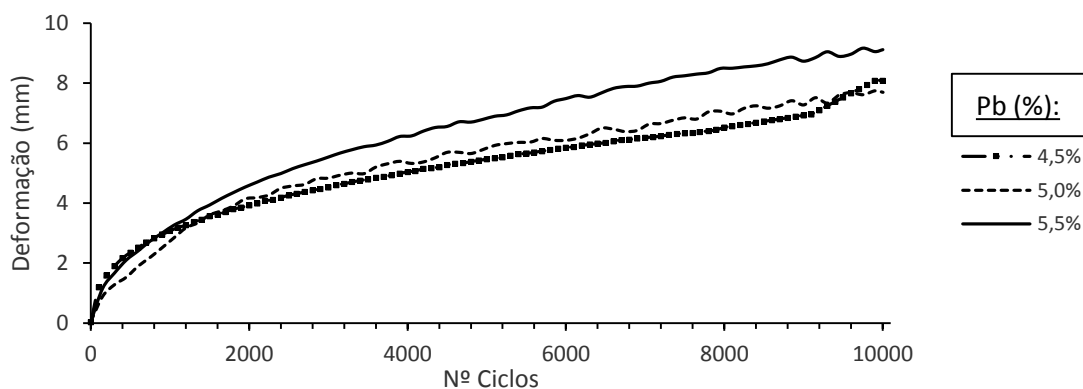


Figura 6.8 Valores médios das curvas de deformação – nº de ciclos obtidas no ensaio de *wheel-tracking* para lajes com diferentes percentagens de betume

Pode observar-se que os provetes com menor percentagem de betume sofreram menores deformações, ou seja, uma maior percentagem de betume corresponde a uma menor

resistência à deformação permanente, tal como era esperado. A diminuição da percentagem de betume corresponde a um aumento do imbricamento entre os agregados que torna a deformação mais difícil.

Na Figura 6.9 apresentam-se os resultados dos parâmetros WTS_{AIR} e PRD_{AIR} obtidos a partir das curvas da Figura 6.8, e pela aplicação das equações (4.3) e (4.4), respetivamente.

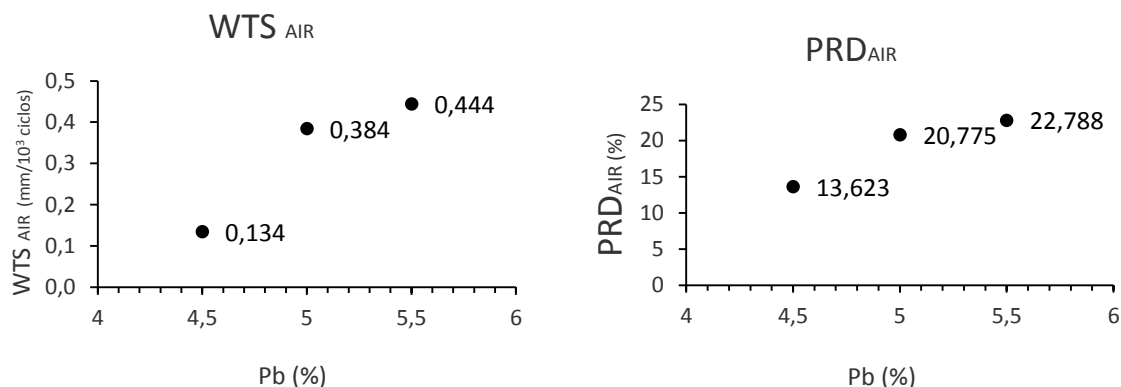


Figura 6.9 Taxa de deformação média (WTS_{AIR}) e profundidade proporcional média da rodeira (PRD_{AIR})

Verifica-se que o parâmetro WTS_{AIR} apresenta o menor valor para 4,5% de betume, com o valor de 0,134mm/10³ciclos, crescendo com a percentagem de betume. No que se refere ao parâmetro PRD_{AIR} , verifica-se uma evolução também crescente com a percentagem de betume. Atendendo às curvas da figura 6.9 e aos resultados dos parâmetros, afigura-se que a utilização duma percentagem de betume de 5,1 % não penaliza demasiadamente esta composição no que se refere à resistência à deformação permanente. Além disso, caso se reduzisse a percentagem de betume para 4,5% a porosidade aumentaria, o que poderia levar a uma menor resistência à ação da água.

Assim, tendo em conta aqueles fatores, considera-se aceitável declarar o valor obtido da taxa de deformação para a percentagem ótima de betume obtida pelo método de *Marshall* (5,1%), o que corresponde a uma categoria de WTS_{AIR} igual a $WTS_{AIR0,40}$. Os valores de PRD_{AIR} são relativamente elevados, tendo em conta as categorias indicadas na NP EN 13108-1, pelo que apenas poderia apresentar-se o valor sob a forma de valor declarado.

6.3 Método Volumétrico

Neste trabalho foi realizada a formulação volumétrica de um AC 14 surf 35/50, de acordo com os procedimentos da metodologia SUPERPAVE.

Como se referiu, os valores da baridade calculadas pela PGC durante o ensaio são influenciados pelo cálculo aproximado do volume aparente do provete. Por essa razão, após a compactação dos provetes, mediram-se experimentalmente as baridades de cada provete, tal como foi feito para o método empírico.

A baridade medida experimentalmente foi determinada após 100 giros de compactação. Como se pretendia conhecer a evolução da baridade com o número de ciclos, a solução encontrada foi corrigir as baridades obtidas na PGC a partir da baridade experimental após 100 giros, utilizando um fator de correção, como se descreveu em 5.1.3. Uma vez obtidas as curvas corrigidas da evolução da baridade com o número de giros, os valores utilizados para as propriedades volumétricas foram os obtidos experimentalmente. A baridade máxima teórica considerada foi a calculada pelo método volumétrico, utilizando um picnómetro de vácuo. Conhecidos os valores corrigidos da baridade, foram calculados as propriedades volumétricas (porosidade, VMA e TVB) para cada provete e para cada giro da PGC. O cálculo destas propriedades é de extrema importância, pois vai permitir obter a percentagem ótima de betume pelo método de formulação volumétrico.

6.3.1 Processo de compactação de provetes com Prensa Giratória de Corte

Neste estudo foi considerado um tráfego para 20 anos até 0,3 milhões de eixos padrão de 80kN, ou seja: $N_{\text{initial}}=6$, $N_{\text{design}}=50$ e $N_{\text{max}}=75$.

A mistura betuminosa foi produzida da mesma forma que para o método empírico, tendo sido compactada a uma temperatura entre 150°C e 160°C. Antes da compactação, a mistura foi mantida no molde da PGC em estufa durante um período de até 4 horas para simular o envelhecimento do betume a curto prazo. Compactaram-se provetes com quatro percentagens de betume: 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%. As tabelas 6.8 e 6.9 resumem as características do molde da PGC e as quantidades utilizadas de cada agregado e de betume para cada composição ensaiada.

Tabela 6.8 Características do molde utilizado para o fabrico dos provetes

h (cm)	11,5
d (cm)	15
Volume (cm³)	2032,22

Tabela 6.9 Quantidades de agregado e betume

Pb (%)	Massa betume (g)	10%	40%	48%	2%
		8/20 (g)	4/12 (g)	0/4 (g)	Filer (g)
4,5	219,48	465,78	1863,14	2235,76	93,16
5,0	243,87	463,35	1853,38	2224,06	92,67
5,5	268,25	460,91	1843,63	2212,35	92,18
6,0	292,64	458,47	1833,87	2200,65	91,69

Após terminado o ensaio com a PGC, foi determinada a baridade máxima teórica por via experimental, tal como explicitado em 2.3.4.

6.3.2 Resultados obtidos através da PGC

6.3.2.1 Baridade

A figura 6.10 representa a evolução da baridade obtida através da PGC, para cada percentagem de betume utilizado, em função do número de ciclos. Esta baridade é calculada diretamente pela PGC, com base na massa da amostra e na altura do provete em cada ciclo, através da equação (6.1). Os valores representados na figura correspondem à média da baridade de cada grupo de provetes. A evolução da curva é a esperada ou seja, com o aumento do número de ciclos (e conseqüentemente um aumento do nível de compactação) a baridade vai aumentando. No que se refer à influência do aumento de quantidade de betume, verifica-se que os valores de baridade sobem até determinado limite (5,5%) para cada provete, diminuindo em seguida.

$$Baridade (i) = \frac{m_{amostra}}{V_{molde}} = \frac{m_{amostra}}{\pi r_{molde}^2 h_i} \quad (6.1)$$

Onde:

- $m_{amostra}$ é a massa da amostra de mistura betuminosa;
- V_{molde} é o volume do molde da PGC;
- r_{molde} é o raio do molde da PGC;
- h_i é a altura do provete no ciclo i.

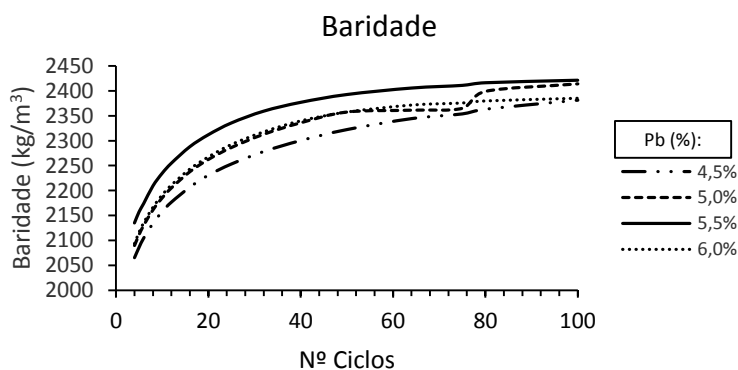


Figura 6.10 Baridade obtida através da PGC

6.3.2.2 Porosidade, TVB e VMA

As figuras seguintes representam a evolução da porosidade, TVB e VMA obtidos através da PGC, respetivamente. Estes valores foram calculados com base nos valores da baridade da figura 6.10.

A figura 6.11 representa a porosidade determinada através da equação (2.4), verificando-se a presença de valores negativos de porosidade. Esta situação não tem tradução prática, pois a

porosidade representa a percentagem do volume total das amostras ocupada por vazios que, no limite, seria nula. Apesar de a curva da porosidade ter o traçado esperado, ou seja, diminui com o aumento do número de ciclos (aumento da densidade da mistura), seria de esperar que para maiores percentagens de betume se obtivessem porosidades menores devido ao facto de existir uma maior quantidade de betume para preencher os vazios entre as partículas de agregado. Pela análise da figura 6.11 é possível observar que os valores de porosidade para uma percentagem de betume de 6,0% são maiores que os valores para uma percentagem de betume de 5,5%, o que pode indiciar alguma incoerência nos resultados. A incerteza associada ao cálculo da baridade na PGC pode explicar os valores negativos a que se chegou para a porosidade no caso da percentagem de betume de 5,5%. Além disso, o valor da baridade máxima teórica utilizado para o cálculo da porosidade foi determinado experimentalmente sobre uma única amostra, para cada percentagem de betume, o que no caso em análise pode ter sido pouco representativo. Note-se que, o valor da baridade máxima teórica obtido pelo método matemático, para 5,5% de betume, foi de $2404,8 \text{ kg/m}^3$, o que é consideravelmente superior ao valor de 2356 kg/m^3 obtido experimentalmente. Caso se considere o valor da baridade máxima teórica calculado pelo método matemático, os valores de porosidade manter-se-iam negativos, mas apenas para um número de giros acima de cerca de 60 giros, o que reforça a ideia de que serão os valores da baridade que conduziram a porosidades negativas acima de cerca de 30 giros.

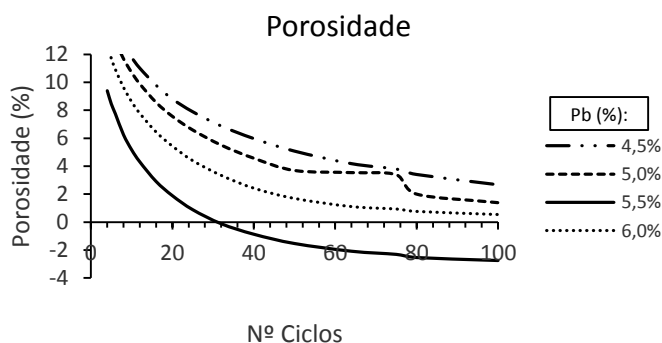


Figura 6.11 Porosidade obtida através da PGC

As figuras 6.12 e 6.13 representam os valores de VMA e TVB, respetivamente. Estas propriedades foram calculadas com base nos valores de porosidade da figura 6.11, através da aplicação das equações (2.1) e (2.2), respetivamente. Quanto aos valores de TVB e VMA, estes não se afastam muito dos valores esperados para este tipo de mistura. No entanto, como estes valores dependem do valor da porosidade e da baridade, ao considerarem-se os valores obtidos para estas propriedades, particularmente para a percentagem de 5,5% de betume, podem obter-se valores influenciados pela incoerência que se discutiu anteriormente.

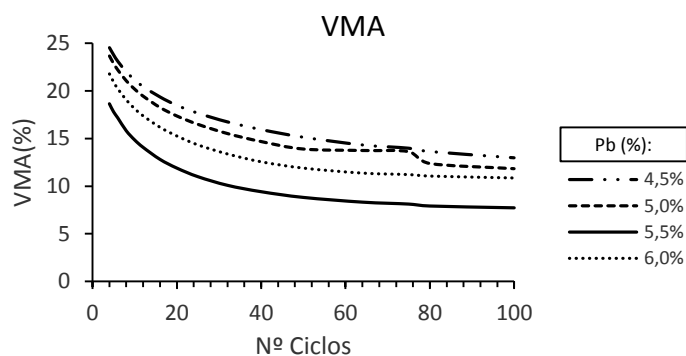


Figura 6.12 VMA obtido através da PGC

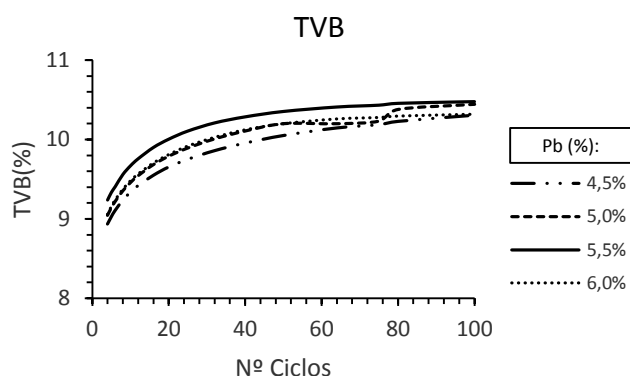


Figura 6.13 TVB obtido através da PGC

6.3.2.3 Percentagem da baridade máxima teórica

A figura 6.14 representa a evolução da baridade, em percentagem da baridade máxima teórica (C), com o número de ciclos, obtida através da PGC. Este parâmetro foi calculado com base nos valores de baridade da figura 6.10 e nos valores de baridade máxima teórica determinada pelo método volumétrico previsto na NP EN 12697-5. Através da equação (5.1) obtem-se os valores representados na figura 6.14.

A variável C representa a relação entre a baridade da mistura compactada (considerado o volume aparente total da mistura betuminosa compactada) com a baridade máxima teórica dessa mesma mistura (sem considerar o volume de vazios da mistura betuminosa), para um dado número de giros N. Pela análise do gráfico da figura 6.14 pode concluir-se que com o aumento do número de giros, ou seja, o aumento do nível de compactação da mistura, existe um aumento da variável C. Isto significa que a baridade está a aumentar, ou seja, o volume da mistura está a diminuir. No caso da mistura com 5,5% de betume, verifica-se que é ultrapassado o limite de 100% a partir do ciclo número 32, o que mostra, mais uma vez, a incoerência relacionada com a determinação da baridade pela PGC.

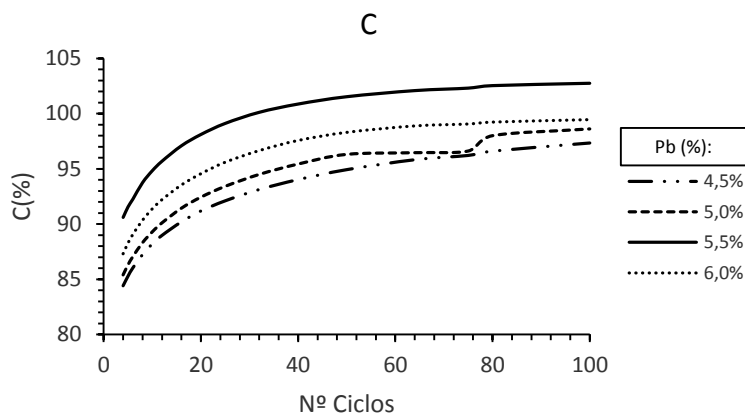


Figura 6.14 C obtida através da PGC

6.3.2.4 Percentagem “ótima” em betume

Como já foi referido na Capítulo 5, no método volumétrico a percentagem “ótima” de betume é selecionada como aquela que permite obter a porosidade desejada de 4% para a energia de compactação considerada para a formulação, ou seja, para N_{design} . O tráfego considerado para 20 anos foi um valor até 0,3 milhões de eixos padrão de 80kN, ao que corresponde $N_{initial}=6$, $N_{design}=50$ e $N_{max}=75$. Na tabela 6.10 resumem-se as propriedades volumétricas das composições ensaiadas, medidas para 50 ciclos (N_{design}). Na figura 6.15 pode determinar-se a percentagem de betume correspondente a 4% de porosidade.

Tabela 6.10 Propriedades Volumétricas para $N_{design}=50$ obtidas através da PGC

$N_{design}=50$				
Pb (%)	Porosidade (%)	VMA (%)	VFB (%)	Baridade da PGC (kg/m^3)
4,5	5,1	15,1	69,34	2322,50
5,0	3,7	15,0	75,39	2357,50
5,5	-1,5	11,1	113,45	2392,70
6,0	1,7	15,3	88,89	2357,30

Nota: os valores de porosidade, VMA e VFB a que se chegou para 5,5% de betume estão influenciados pelos valores da baridade incoerentes a que se chegou diretamente pela PGC.

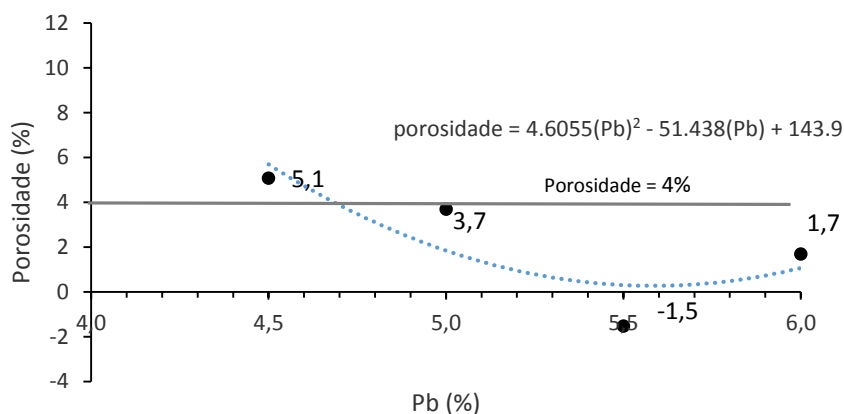


Figura 6.15 Escolha da percentagem “ótima” em betume obtida pela PGC

Pela análise da figura 6.15, a percentagem “ótima” em betume é de 4,7 %. De acordo com o procedimento da formulação volumétrica, é necessário confirmar que para a percentagem obtida a mistura cumpre certos critérios presentes no *SUPERPAVE* que podem verificar-se na figura 6.16:

1. Porosidade para o $N_{\text{initial}}=6 > 11\%$ - este critério é cumprido, pois a porosidade em N_{initial} para uma percentagem de betume de 4,7 % é de 13,61%;
2. Porosidade para $N_{\text{max}}=75 > 2\%$ - este critério é cumprido, pois a porosidade em N_{max} para uma percentagem de betume de 4,7% é de 3,64%;
3. VMA acima do mínimo especificado na Tabela 6.11- este critério é cumprido, pois o valor de VMA para uma percentagem de betume de 4,7 % está acima do valor mínimo de 12%;
4. VFB dentro do intervalo especificado na tabela 6.11 - este critério é cumprido, pois o valor de VFB correspondente à percentagem “ótima” em betume de 4,7 % encontra-se dentro do intervalo de 70-80%.

Os critérios 1, 2 e 3 têm de ser respeitados obrigatoriamente. Caso contrário a mistura necessitará de ser reformulada. Quanto ao critério 4, este pode não ser respeitado porque é considerado um termo um tanto redundante, uma vez que é função da porosidade e do VMA (Roberts *et al.*, 1996).

Tabela 6.11 Requisitos mínimos para propriedades volumétricas da mistura

Requisitos Mínimos - Tráfego em 20 anos: < 0,3 milhões de eixos padrão de 80kN)

Grau de Compactação (em % da baridade máxima teórica)			VMA (mínimo %)					VFB (%)	Filer/betume
N_{initial}	N_{design}	N_{max}	Dimensão máxima do agregado (mm)						
			37,5	25	19	12,5	9,5		
≤ 91,5	96	≤ 98,0	11	12	13	14	15	70-80	65-75

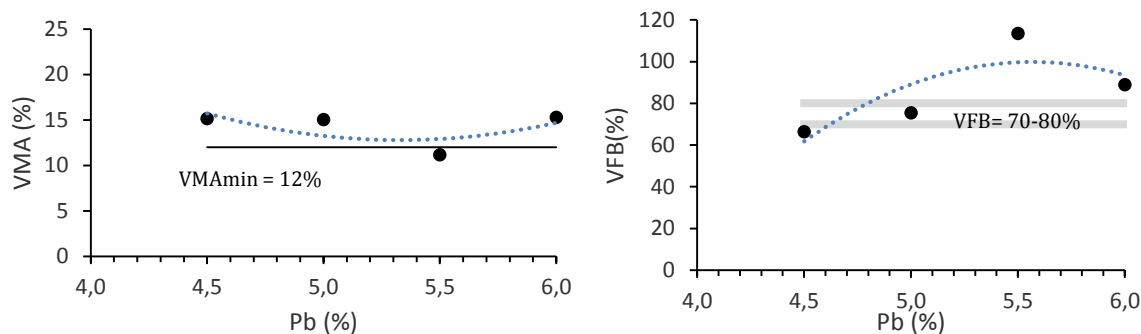


Figura 6.16 VMA – Variação de VMA e de VFB com a percentagem de betume com base nos resultados obtidos com a PGC

Estando verificados os critérios mais relevantes presentes no *SUPERPAVE*, pode concluir-se que a percentagem “ótima” em betume obtida pelo método volumétrico, com base nos resultados obtidos diretamente pela PGC é de 4,7 %.

A percentagem “ótima” em betume também pode ser calculada com base nas propriedades volumétricas determinadas a partir da baridade máxima teórica obtida pelo procedimento matemático (equação (2.6)) em substituição da baridade máxima teórica determinada pelo método volumétrico. Na tabela 6.12 resumem-se as propriedades volumétricas das composições ensaiadas, medidas para 50 ciclos (N_{design}), com a utilização da baridade máxima teórica obtida pela expressão (2.6). Na figura 6.17 determina-se a percentagem de betume correspondente a 4% de porosidade.

Tabela 6.12 Propriedades Volumétricas para $N_{design}=50$ obtidas através da PGC, utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático

$N_{design}=50$				
Pb (%)	Porosidade (%)	VMA (%)	VFB (%)	Baridade (kg/cm^3)
4,5	4,76	14,81	67,84	2322,50
5,0	2,65	13,98	81,07	2357,50
5,5	0,50	13,16	96,18	2392,70
6,0	1,28	14,88	91,42	2357,70

Nota: os valores de porosidade, VMA e VFB a que se chegou para 5,5% de betume estão influenciados pelos valores da baridade incoerentes a que se chegou diretamente pela PGC.

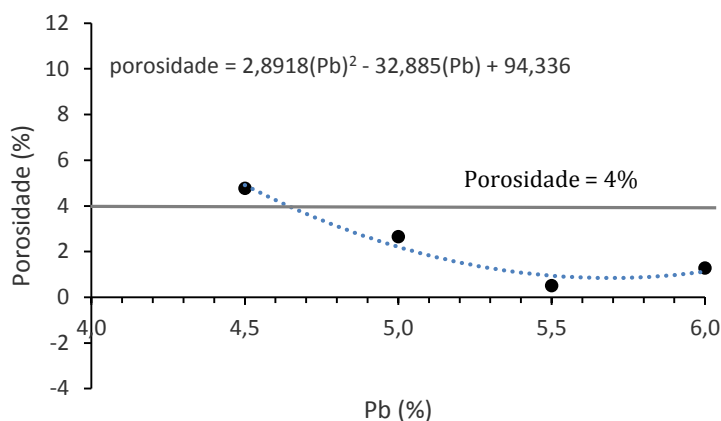


Figura 6.17 Escolha da percentagem “ótima” em betume obtida pela PGC, utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático

Pela análise da figura 6.17, obtém-se uma percentagem “ótima” em betume de 4,6%, ligeiramente inferior à percentagem “ótima” de 4,7% obtida quando se considera a baridade máxima teórica medida experimentalmente. Utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático deixam de existir valores negativos para a porosidade, embora o valor obtido para 5,5% de betume seja inferior ao determinado para 6%.

Isto reforça a ideia de menor representatividade do resultado experimental a que se chegou para 5,5% de betume.

6.3.3 Resultados obtidos a partir dos ensaios com PGC ajustados em função da baridade medida experimentalmente

De modo a reduzir as dificuldades associadas ao cálculo correto da baridade com a PGC, realizou-se um procedimento complementar no qual os valores da baridade obtidos com a PGC foram ajustados, levando em linha de conta os valores dessa propriedade medidos experimentalmente.

Após a compactação dos provetes na PGC, foi determinada experimentalmente a baridade para cada provete compactado, através do método SSD (proвете saturado com superfície seca), de acordo com na EN 12697-6. Os valores medidos experimentalmente correspondem a um N_{max} de 100 ciclos, quando o que se pretendia era conhecer a baridade para o N_{design} de 50 ciclos. Para se conseguir o desejado, foi determinado um coeficiente de ajuste dado pela relação entre ρ_{SSD} e a baridade obtida pela PGC aos 100 ciclos de compactação para cada um dos provetes. Utilizando aquele coeficiente ajustaram-se todos os valores da baridade medidos pela PGC, admitindo que, para cada provete, o coeficiente seria o mesmo para todos os níveis de compactação (ciclos) dos provetes. Sendo conhecidos os valores da baridade obtidos pela PGC de 0 a 100 ciclos, e também a baridade experimental (ρ_{SSD}) para $N=100$ ciclos, determinaram-se os valores ajustados das curvas de baridade em função do número de ciclos.

6.3.3.1 Baridade

A figura 6.18 representa a evolução da baridade ajustada das misturas, para as diferentes percentagens de betume, em função do número de ciclos. Com o aumento do número de ciclos (e consequentemente um aumento do nível de compactação) a baridade vai aumentando. Igualmente, com o aumento da quantidade de betume, os valores de baridade para cada provete em cada ciclo também tendem a aumentar.

Comparativamente aos gráficos da baridade representados na figura 6.10, verifica-se um visível ajustamento da curva referente à percentagem de betume de 5,5%, tendo as restantes um traçado bastante semelhante ao das obtidas diretamente pela PGC.

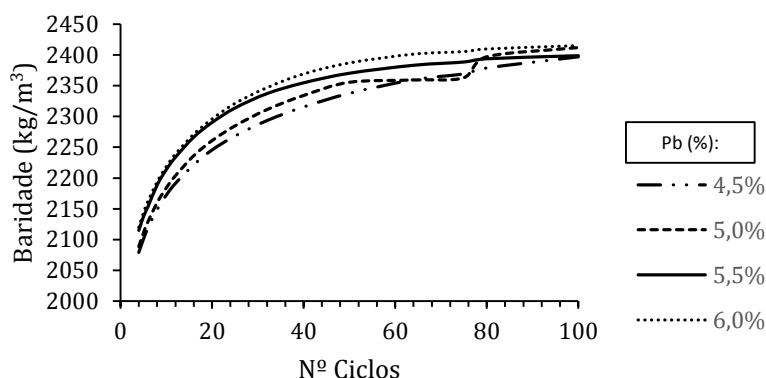


Figura 6.18 Baridade obtida pela PGC ajustada em função do valor obtido experimentalmente

6.3.3.2 Porosidade, TVB e VMA

As figuras 6.19, 6.20 e 6.21 representam a evolução da porosidade, do TVB (Teor Volumétrico em Betume) e do VMA (Vazios na Mistura de Agregados), respetivamente. Estes valores foram obtidos a partir das curvas da figura 6.18, através da aplicação das equações (2.4), (2.2) e (2.1), respetivamente.

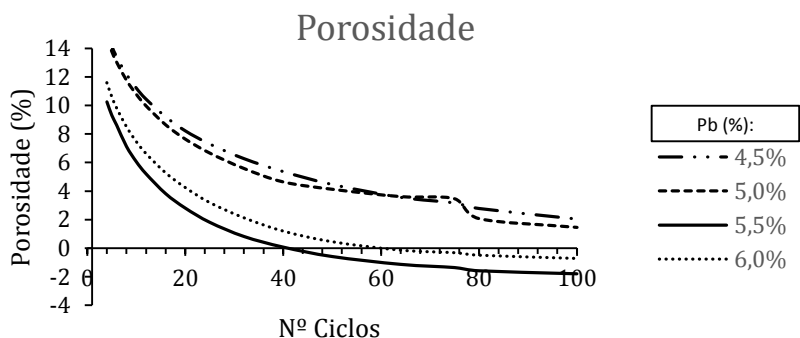


Figura 6.19 Porosidade obtida a partir dos ensaios com PGC, ajustados em função da baridade determinada experimentalmente

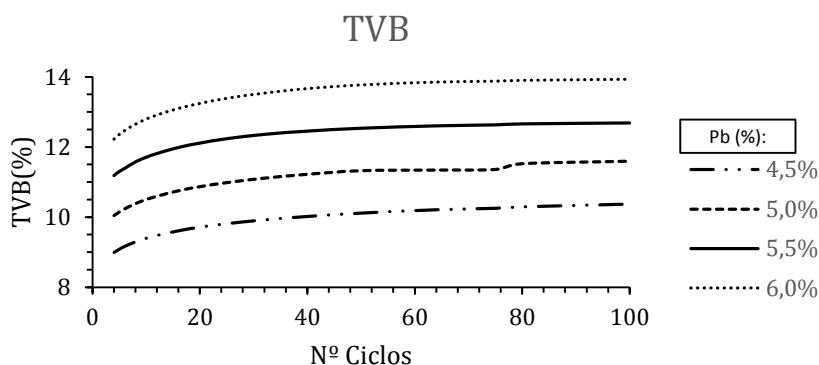


Figura 6.20 TVB obtidos a partir dos ensaios com PGC, ajustados em função da baridade determinada experimentalmente

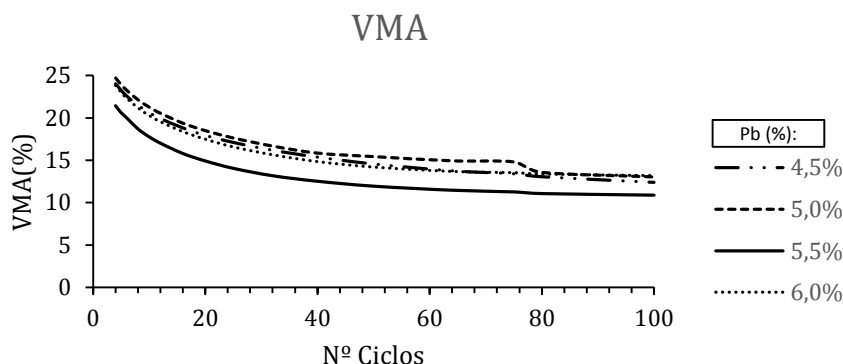


Figura 6.21 VMA obtidos a partir dos ensaios com PGC, ajustados em função da baridade determinada experimentalmente

Analisando as figuras 6.19 a 6.21, conclui-se que a evolução dos parâmetros medidos é a esperada e semelhante à que se observou quando os mesmos parâmetros foram calculados apenas com base nos ensaios realizados com PGC.

Mais uma vez, justifica-se a apresentação de alguns comentários adicionais relativamente à porosidade. Esta vai diminuindo com o aumento do número de ciclos, à medida que o nível de compactação aumenta. No entanto, verifica-se a ocorrência de valores negativos para a porosidade nas misturas com 5,5 e 6 % de betume. Além disso, determinaram-se valores da porosidade mais elevados para a percentagem de betume de 5,5% que para a de 6,0%. Apesar do ajuste efetuado aos valores da baridade determinados pela PGC, permanecem as questões discutidas a propósito da figura 6.11, embora com menor magnitude. Como os valores de baridade ajustados foram calculados a partir dos valores obtidos pela PGC, manter-se-á algum nível de incoerência nos resultados, apesar do ajuste efetuado com base na baridade dos provetes medida experimentalmente após 100 ciclos de compactação.

Quanto ao teor volumétrico de betume, este corresponde à percentagem total de volume da mistura que está ocupada com betume. Como era de esperar, quanto maior a percentagem de

betume maiores são os valores de TVB para cada grupo. No entanto, o TVB não tem um aumento significativo com o aumento do número de ciclos. Isto provem do facto do nível de compactação não influenciar em grande escala este parâmetro, pois o TVB depende mais do volume total da mistura e que da percentagem de vazios presentes nessa mesma mistura.

Por fim, verifica-se que o volume de vazios na mistura de agregado (VMA) diminui à medida que vai aumentando o número de ciclos. Este parâmetro depende diretamente da porosidade, pelo que seria de esperar que tivesse uma evolução semelhante àquela. O valor do VMA tende a aumentar com o aumento da quantidade de betume, embora pela questões relacionadas com o cálculo de porosidades negativas a tendência não se verifique completamente.

6.3.3.3 Percentagem da baridade máxima teórica

A figura 6.22 representa a evolução de C – baridade expressa em percentagem da baridade máxima teórica – obtida com base nos ensaios com PGC, ajustando as curvas da baridade a partir da medição experimental desta propriedade, para N=100 ciclos. O parâmetro C foi calculado com base nos valores de baridade representados na figura 6.18 e nos valores de baridade máxima teórica obtida pelo método volumétrico. Através da equação (5.1) obtêm-se os valores representados na figura 6.22.

A evolução do parâmetro C é semelhante à que se obteve na figura 6.14. Quando a percentagem de betume na mistura é de 5,5 e 6%, verifica-se que é ultrapassado o limite de 100%, sensivelmente a partir do ciclo número 50, o que mostra, mais uma vez, alguma dificuldade do procedimento com PGC na determinação precisa dos parâmetros volumétricos da mistura. Contudo, verifica-se que a utilização de um fator de ajustamento dos valores da baridade obtidos com PGC melhorou a qualidade geral dos resultados quando comparados com os resultados da baridade medidos diretamente pela PGC, ao longo dos ciclos de compactação.

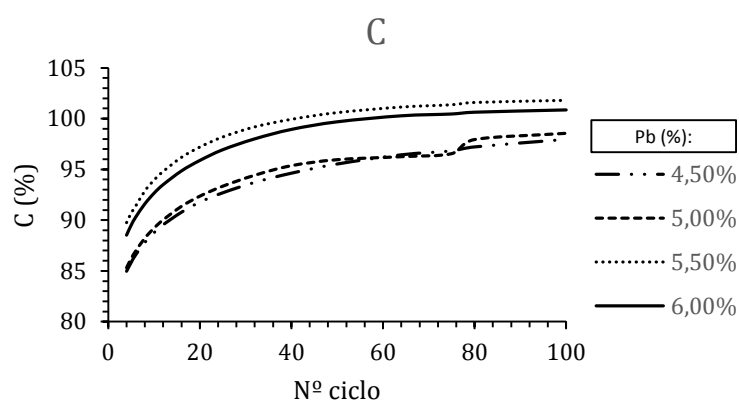


Figura 6.22 Percentagem da baridade máxima teórica (C) obtida a partir dos resultados da baridade determinados na PGC, ajustados em função da baridade determinada experimentalmente

6.3.3.4 Percentagem “ótima” em betume

Seguindo a mesma metodologia de cálculo usada na secção 6.3.2.4, calculou-se a percentagem “ótima” em betume, para N_{design} , com base nas propriedades volumétricas obtidas experimentalmente apresentadas na tabela 6.13. Na figura 6.23 determina-se a percentagem de betume correspondente a 4% de porosidade.

Tabela 6.13 Propriedades Volumétricas para $N_{design}=50$ obtidas considerando uma fator de ajustamento em função da baridade determinada experimentalmente

$N_{design}=50$				
Pb (%)	Porosidade (%)	VMA (%)	VFB (%)	Baridade (kg/cm ³)
4,5	4,46	14,57	69,40	2337,57
5,0	4,12	15,45	73,31	2355,76
5,5	-0,59	11,95	104,91	2370,33
6,0	0,45	14,22	96,87	2387,02

Nota: os valores de porosidade, VMA e VFB a que se chegou para 5,5% de betume estão influenciados pelos valores da baridade incoerentes a que se chegou diretamente pela PGC

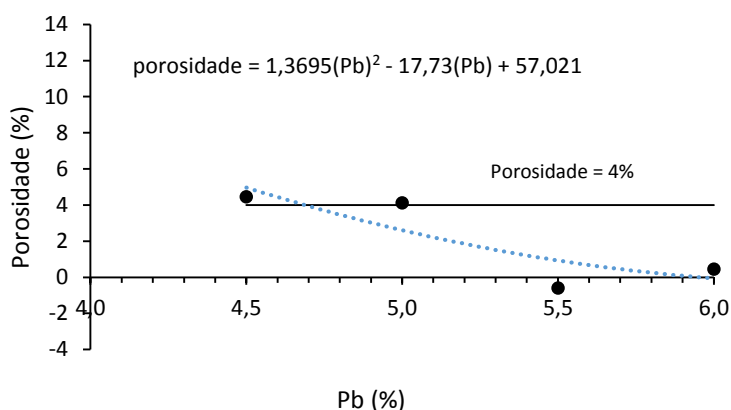


Figura 6.23 Escolha da percentagem “ótima” em betume obtida obtida pela PGC, com base nos resultados da baridade ajustados

Pela análise da figura 6.23, a percentagem “ótima” em betume será de 4,7%. De acordo com o procedimento da formulação volumétrica, é necessário confirmar que para a percentagem obtida a mistura cumpre certos critérios presentes no *SUPERPAVE* que podem verificar-se na figura 6.24:

1. Porosidade para o $N_{initial}=6 > 11\%$ - este critério é cumprido, pois a porosidade para $N_{initial}$ para uma percentagem de betume de 4,7% é de 13,18%;
2. Porosidade para $N_{max}=75 > 2\%$ - este critério é cumprido, pois a porosidade em N_{max} para uma percentagem de betume de 4,7% é de 3,46%;

3. VMA acima do mínimo especificado na Tabela 6.14 - este critério é cumprido, pois o valor de VMA para uma percentagem de betume de 4,8% está acima do valor mínimo de 12%;
4. VFB dentro do intervalo especificado na tabela 6.14 - é cumprido, pois o valor de VFB correspondente à percentagem “ótima” em betume de 4,7% encontra-se dentro do intervalo de 70-80%.

Os critérios 1, 2 e 3 têm de ser respeitados obrigatoriamente, caso contrário a mistura necessitará de ser reformulada. Quanto ao critério 4, este pode não ser respeitado porque este é considerado um termo um tanto redundante, uma vez que é função da porosidade e do VMA. (Roberts *et al.*, 1996)

Tabela 6.14 Requisitos mínimos para propriedades volumétricas da mistura

Requisitos Mínimos - Tráfego em 20anos: < 0,3 milhões de eixos padrão de 80kN									
Grau de Compactação (em % da baridade máxima teórica)			VMA (mínimo %)					VFB (%)	Filer/ betume
N _{initial}	N _{design}	N _{max}	Dimensão máxima do agregado (mm)						
			37,5	25	19	12,5	9,5		
≤ 91,5	96	≤ 98,0	11	12	13	14	15	70-80	65-75

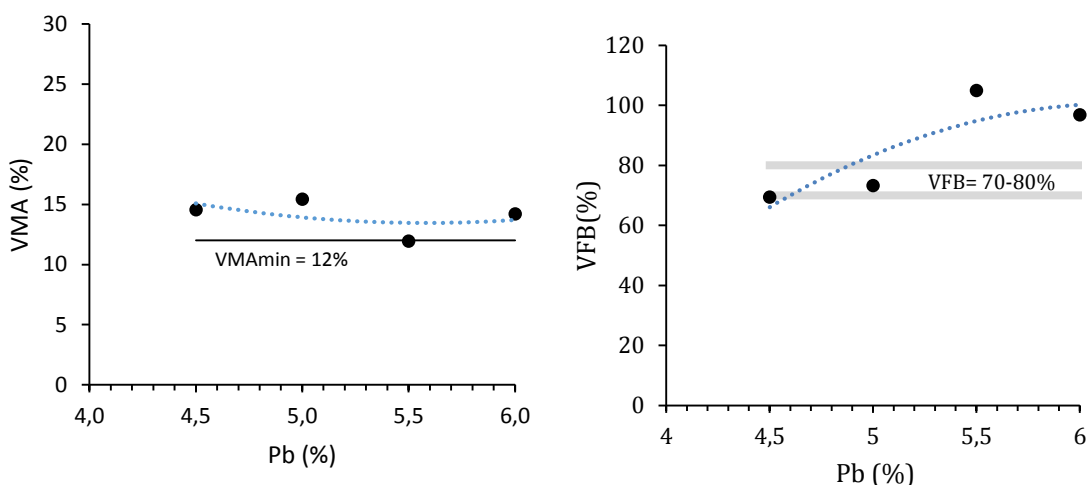


Figura 6.24 VMA – Variação de VMA e de VFB com a percentagem de betume com base nos resultados da baridade, obtidos com a PGC, ajustados

Estando verificados os critérios mais relevantes presentes no *SUPERPAVE*, pode concluir-se que a percentagem “ótima” em betume obtida pelo método volumétrico, com base nos resultados obtidos pela PGC ajustados é de 4,7%.

Da mesma forma que se procedeu em 6.3.2.4, a percentagem “ótima” em betume pode ser calculada com base nas propriedades volumétricas obtidas com base nos resultados da

baridade ajustados e usando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático em substituição da baridade máxima teórica determinada experimentalmente. Para esta situação, a tabela 6.15 resume as propriedades volumétricas das composições ensaiadas, medidas para 50 ciclos (N_{design}). Na figura 6.25 pode determinar-se a percentagem de betume correspondente a 4% de porosidade.

Tabela 6.15 Propriedades Volumétricas para $N_{design}=50$ obtidas através da PGC com base nos resultados na baridade ajustados, utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático

$N_{design}=50$				
Pb (%)	Porosidade (%)	VMA (%)	VFB (%)	Baridade (kg/cm ³)
4,5	4,15	14,26	70,92	2337,57
5,0	2,72	14,04	80,64	2355,76
5,5	1,43	13,97	89,74	2370,33
6,0	0,05	13,82	99,64	2387,02

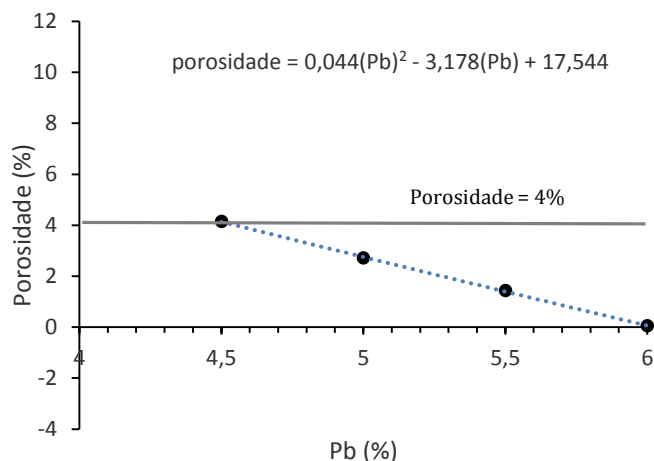


Figura 6.25 Escolha da percentagem “ótima” em betume obtida pela PGC com base nos resultados na baridade ajustados, utilizando a baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático

Pela análise da figura 6.25, obtém-se uma percentagem “ótima” em betume de 4,5%, a qual é ligeiramente inferior à percentagem “ótima” de 4,7% obtida quando se considera a baridade máxima teórica obtida experimentalmente.

6.3.3.5 **Trabalhabilidade da Mistura (CEI)**

A figura 6.26 representa a evolução da CEI (*Compaction Energy Index*) obtida a partir dos resultados da PGC ajustados. Com base nos valores de baridade da figura 6.18 e através da equação (5.4), obtêm-se os valores representados na figura 6.26.

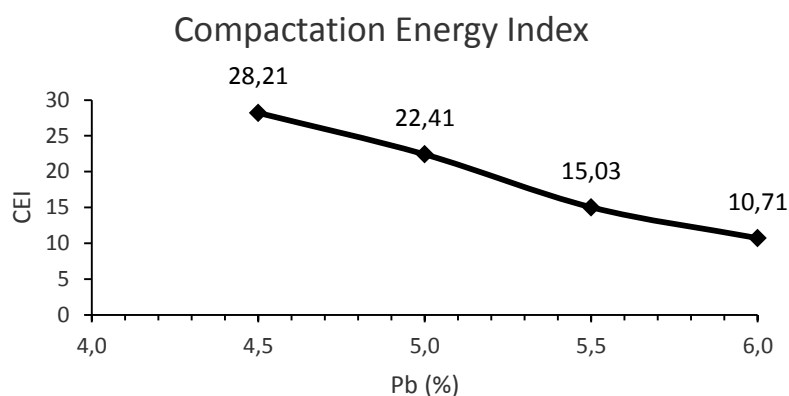


Figura 6.26 CEI – Compaction Energy Index

Sabe-se que com o aumento do número de giros a percentagem de vazios vai diminuindo, pois a mistura vai ficando cada vez mais compactada. Por outro lado, quanto maior a quantidade de betume, menores serão os espaços vazios por preencher, e conseqüentemente serão menores os contatos entre os agregados. Quando os agregados começam a ficar em contacto, existe um aumento da resistência que vai fazer com que a expulsão do ar dos vazios se processe de forma mais lenta, o que vai tornar a compactação mais difícil. O CEI permite avaliar a trabalhabilidade da mistura, o que influencia a sua compactabilidade, ou seja, se a compactabilidade das misturas melhoram com a diminuição do CEI, a sua trabalhabilidade também irá aumentar.

6.4 Comparação da Formulação pelos Métodos Empírico e Volumétrico

A tabela 6.16 faz um resumo dos resultados obtidos para diversos parâmetros através do método empírico e do método volumétrico (neste último, considerando os resultados obtidos pela PGC com base nas baridades ajustadas e tomando como base a baridade máxima teórica calculada experimentalmente). Os parâmetros passíveis de comparação são a baridade, a porosidade e o VMA por serem comuns aos dois métodos de formulação. Nesta tabela faz-se ainda referência ao número de giros para o qual os valores dos parâmetros volumétricos da mistura mais se aproximam dos obtidos pelo método empírico.

Apesar de ter sido considerado o nível de formulação mais baixo, ou seja, para um tráfego inferior a 0,3 milhões de eixos padrão de 80kN, os provetes foram compactados até 100 ciclos de forma a conseguir obter-se um leque de resultados mais abrangente que permitisse análises mais completas. Através da análise dos valores obtidos com $N=100$ ciclos, tornou-se possível observar a dificuldade de obtenção de resultados fiáveis com N_{design} mais elevado, o que leva a crer que o tipo de mistura betuminosa utilizada neste estudo é muito “trabalhável” para um número de ciclos mais elevado. Com percentagens de betume menores obter-se-iam resultados melhores, pois dessa forma a mistura será menos deformável.

Tabela 6.16 Comparação de propriedades da mistura obtidas pelos métodos empírico e volumétrico

Pb (%)	Baridade (kg/m ³)			Porosidade (%)			VMA (%)		
	Mét. Empírico	Mét. Volumétrico		Mét. Empírico	Mét. Volumétrico		Mét. Empírico	Mét. Volumétrico	
		Nº Ciclos	Valor		Nº Ciclos	Valor		Nº Ciclos	Valor
4,5	2284,95	32	2293,29	6,6	32	6,27	16,5	32	16,19
5,0	2315,82	32	2311,28	5,4	32	5,58	17,5	25	17,64
5,5	2266,84	16	2266,53	3,8	16	3,82	15,8	16	15,80
6,0	2315,73	25	2321,16	3,4	25	3,19	16,8	25	16,58

Nas figuras 6.27 e 6.28 representam-se as evoluções de certas propriedades volumétricas, para os métodos empírico e volumétrico (para este método obtidas para N_{design}=50 ciclos) e considerando os valores da baridade ajustados, no caso em que se utilizou a PGC.

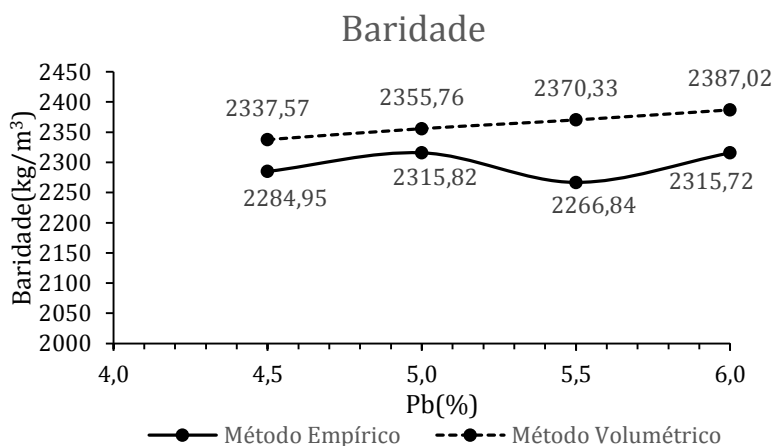


Figura 6.27 Evolução da baridade para os métodos empírico e volumétrico

Pela análise da Figura 6.27, é notório que as baridades obtidas pelo método volumétrico, para N_{design}, são superiores às obtidas pelo método empírico, embora estas diferenças não sejam muito significativas. Esta diferença pode dever-se ao facto de os provetes compactados pelo método volumétrico estarem sujeitos a uma compactação mais controlada e sujeitos a uma rotação e ângulo de inclinação que permite um melhor arranjo das partículas da mistura.

Com base nos valores de baridade da figura 6.27, obtiveram-se os valores de porosidade (calculados com a baridade máxima teórica obtida experimentalmente) e de VMA representados na figura 6.28.

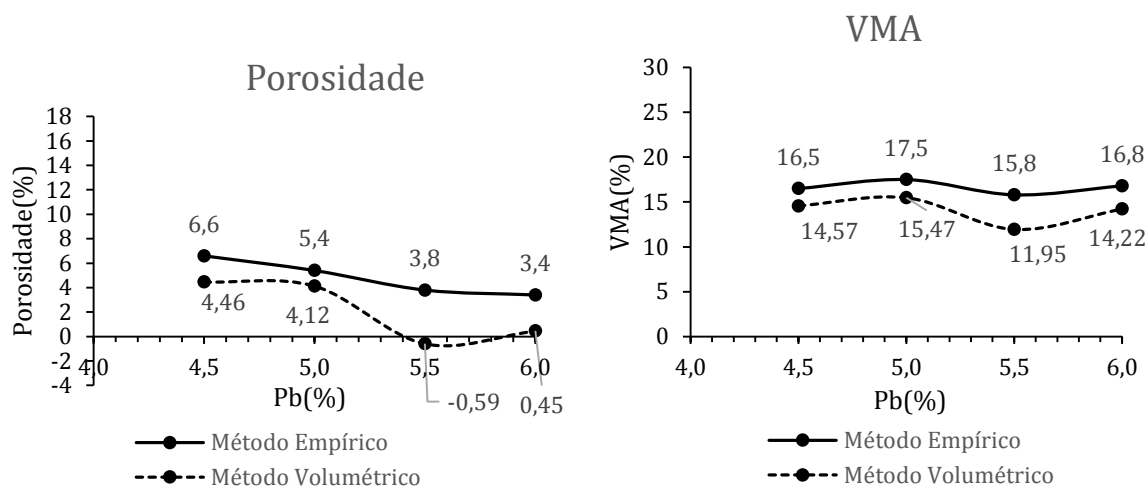


Figura 6.28 Evolução da porosidade e do VMA para os métodos empírico e volumétrico

Contrariamente ao que se sucede com a baridade, a porosidade e o VMA apresentam valores menores para o método volumétrico. Estes dois parâmetros são ambos dependentes da baridade, ou seja, se a mistura apresenta maior compacidade, significa que as partículas se encontram mais juntas, o que leva a que os espaços vazios sejam menores. Assim, os vazios na mistura de agregados (VMA) têm menor valor. Este facto faz com que a porosidade seja menor, pois existem menos espaços vazios que permitam a entrada de água na mistura compactada.

Na tabela 6.17 resumem-se os resultados do teor ótimo em betume determinado por ambas as metodologias de formulação utilizados neste trabalho.

Tabela 6.17 Resumo da percentagem “ótima” em betume

Percentagem "ótima" em betume		
Método Empírico		5,1%
Método Volumétrico	PGC	4,7%
	Baridade ajustada	4,7%

As conclusões obtidas corroboram os estudos que referem que a percentagem ótima de betume obtida pelo método empírico é superior à que se obtém pelo método volumétrico (Neubauer e Partl, 2004; Ibrahim, 2007). No entanto, apesar da diferença obtida na percentagem “ótima” em betume para os dois métodos utilizados, esta varia numa gama que está praticamente dentro das tolerâncias habitualmente consideradas nos cadernos de encargos (da ordem de $\pm 0,3\%$). Assim, pode concluir-se que considerando $N_{design}=50$ obtêm-se misturas pelo método volumétrico similares às obtidas pelo método empírico no que diz respeito à percentagem ótima de betume. No que diz respeito às propriedades volumétricas, observaram-se algumas diferenças.

6.5 Síntese

Este capítulo reúne os resultados obtidos nos estudos experimentais, bem como a análise dos mesmos. O objetivo principal era conseguir comparar os métodos de formulação empírico e volumétrico, utilizando os procedimentos inerentes a cada um deles, de forma a cotejar os parâmetros que são comuns a esses dois métodos.

Os ensaios permitiram caracterizar da mesma forma as diferentes misturas. A mistura com maior percentagem de betume apresenta um pior comportamento, enquanto que a uma menor percentagem em betume correspondeu um melhor comportamento à deformação permanente.

Por fim, foi possível concluir com alguma segurança que para o caso em estudo, utilizando as formulações e níveis de tráfego considerados, houve uma boa correlação entre os dois métodos, ou seja, a percentagem em betume obtida para os dois métodos foi muito próxima, com uma diferença de cerca de 0,20% a 0,32%.

Em suma, este trabalho experimental permitiu chegar à conclusão de que, para um tráfego em 20 anos inferior a 0,3 milhões de eixos padrão a 80kN, ou seja, $N_{\text{initial}}=6$, $N_{\text{design}}=50$ e $N_{\text{max}}=75$, chega-se a uma fórmula de trabalho próxima à obtida pelo método empírico, embora com uma percentagem de betume inferior.

7 Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

7.1 Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais

O desenvolvimento deste trabalho tinha como objetivo fazer o estudo de formulação laboratorial de misturas betuminosas através de métodos empíricos e volumétricos. O método empírico seguido foi o denominado por método de Marshall, enquanto para o método volumétrico foi selecionado um procedimento baseado na utilização da PGC.

Primeiro, no Capítulo 2 foram descritos os aspetos gerais a saber acerca de misturas betuminosas. Nesta dissertação realizou-se um estudo utilizando uma mistura betuminosa correntemente utilizada em camadas de desgaste, um AC 14 surf 35/50. Deu-se especial atenção a este tipo de misturas, descrevendo-as com mais pormenor e determinando as características fundamentais que estas devem possuir, bem como a influência que a composição de uma mistura betuminosa tem ao longo do seu ciclo de vida.

O Capítulo 2 descreve também, os principais constituintes de uma mistura betuminosa – agregados e betume. Nesse capítulo encontra-se uma descrição sumária dos constituintes utilizados neste estudo, bem como das características volumétricas e mássicas das misturas betuminosas. A composição volumétrica é de extrema importância no estudo de misturas betuminosas, pois o seu conhecimento é essencial para se conseguir avaliar a qualidade da mistura após a sua compactação e colocação em obra. Dessa forma, são explicitados alguns ensaios importantes para conhecer propriedades volumétricas tais como a baridade máxima teórica e a baridade da mistura compactada.

Para o estudo de formulação das misturas betuminosas fabricadas a quente, no Capítulo 3 fez-se uma descrição sumária dos vários tipos de métodos de formulação existentes, incidindo maioritariamente nas vantagens e desvantagens principais de cada um.

Nos Capítulos 4 e 5 são descritos com maior pormenor os métodos empírico e volumétrico utilizados neste estudo.

No Capítulo 6 são apresentadas todas as análises efetuadas sobre os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

Embora ao longo desta dissertação tenham sido apresentadas conclusões relativas aos trabalhos realizados, apresentam-se seguidamente de forma sumária as conclusões gerais e mais importantes deste trabalho.

Verificou-se que o aumento da percentagem em betume, provocou um aumento da baridade aparente da mistura compactada e uma diminuição da sua resistência à deformação. Por outro lado, quanto maior a quantidade de betume, menor foram os valores de baridade máxima, porosidade e VMA encontrados. Através da ponderação destes vários parâmetros, seguindo as

regras de formulação de misturas betuminosas segundo o método de Marshall, chegou-se a um valor de percentagem ótima em betume de 5,1%. Este valor encontra-se dentro do intervalo de valores esperado (entre 4,0% e 6,0%), de acordo com a experiência existente na utilização neste método de formulação.

O método de formulação empírico incluiu a realização de dois ensaios adicionais, de modo a verificar a bondade da percentagem ótima em betume de 5,1% obtida. Os dois ensaios adicionais - sensibilidade à água e Wheel-Tracking – revelaram resultados bastante satisfatórios. No ensaio de sensibilidade à água o valor de resistência conservada foi de 76%, o que significa que a mistura, mesmo em meio aquoso e em condições desfavoráveis, conserva grande parte da sua resistência.

No que diz respeito à formulação pelo método volumétrico, a percentagem ótima em betume obtida foi de 4,7%, portanto ligeiramente inferior àquela obtida pela formulação empírica. Esta diminuição da percentagem em betume é um indicador de que o método volumétrico poderá ser mais económico, e mesmo assim levar a composições adequadas. Esta diferença deve-se também ao facto de os valores definidos para N_{design} fornecerem elevadas energias de compactação.

Em suma, verificou-se que o método de formulação empírica, proposto na NP EN 13108-1 tem a grande vantagem de incluir o método de Marshall, o qual é muito utilizado, advindo um grande conhecimento e experiência na sua utilização, o que leva a que o comportamento da mistura possa ser mais facilmente previsto para misturas que usam agregados correntes. A formulação de misturas betuminosas utilizando o método empírico, difere do método de Marshall pelo facto de utilizar critérios ensaios adicionais baseados na performance da mistura, o que reduz o risco de insucesso da mistura formulada quando o pavimento onde for aplicada entrar ao serviço.

7.2 Prosseguimento de Trabalhos Futuros

Com o prosseguimento de trabalhos futuros, indica-se a importância de continuar o estudo de comparação entre os métodos empíricos e volumétricos, visto que estes são cada vez mais utilizados actualmente para formulação de misturas betuminosas. Sendo o método volumétrico de execução mais simples e controlado, este poderá tornar-se mais vantajoso do que o método empírico. Seria útil, em termos de trabalhos futuros, desenvolver outras composições em laboratório que incorporem outros tipos de misturas betuminosas, com outros tipos de betume e formulações. Além disso, deveria estudar-se um maior número de propriedades das misturas com a realização de mais ensaios, nomeadamente ensaios de desempenho mecânico, que são necessários para a verificação de certos requisitos. Isso permitiria validar melhor as misturas formuladas pelo método volumétrico, embora mantendo o seu procedimento simples.

Os resultados obtidos nesta dissertação permitiram concluir que, para o caso em estudo, utilizando as duas metodologias e os níveis de tráfego considerados, as diferenças obtidas foram pequenas, o que revela perspectivas futuras positivas para uma maior incorporação de

métodos volumétricos em Portugal. Como em qualquer técnica pouco divulgada, será necessário continuar com trabalhos de investigação de modo a aprofundar os conhecimentos sobre este tipo de método de formulação.

7.3 Considerações Finais

No âmbito da utilização de métodos volumétricos para formulação de misturas betuminosas a quente, no que diz respeito à realidade portuguesa, ainda existe um longo caminho a percorrer. Por essa razão, foram encontradas algumas dificuldades na utilização da PGC. Apesar destas dificuldades, entende-se que foram atingidos os objetivos inicialmente estabelecidos. Além de se ter conseguido efetuar a formulação pelos dois métodos previstos, também foi possível uma comparação entre os dois, utilizando parâmetros que lhes são comuns.

Em síntese, julga-se que o trabalho desenvolvido poderá contribuir para um melhor estudo do método volumétrico e também para uma maior aceitação na utilização deste método em substituição do método de *Marshall*. Trata-se de um método menos trabalhoso, conseguindo-se resultados de forma mais célere, ao mesmo tempo que permitem manter o nível de confiança nas composições a que se chega, no que diz respeito ao seu desempenho no seu ciclo de vida. Quanto às percentagens ótimas em betume obtidas, uma vez que são um pouco inferiores às que se obtêm pelo método empírico, pode concluir-se que o método volumétrico dá origem a misturas mais económicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2001). *Practice for Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA)*. AASHTO R 35, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.
- AI., (1997). *Mix design methods for asphalt – Manual Series N°2*, Asphalt Institute, Lexington, Kentucky, USA, 1997.
- Antunes, V. (2013) *Influência do Fíler no Comportamento de Mastiques Betuminosos*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Araújo, J., Oliveira, J., Silva, H., Sampaio, J., Palha, C. (2012). *Avaliação da Influência da Camada de Desgaste na Sustentabilidade dos Pavimentos Rodoviários*, Guimarães, Portugal, 2012
- Archilla, A.R. (2006). *Use of Superpave Gyratory Compaction Data for Rutting Prediction*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 9, September 2006
- Asphalt Institute (2012). *Superpave Mix Design*, Superpave Series No. 2, Asphalt Institute, Lexington, Kentucky, USA, 2012
- Baptista, A. (2006). *Misturas betuminosas recicladas a quente em central - Contribuição para o seu estudo e aplicação*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Barbosa, F. (2012). *Contribuição para o Estudo do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Barreno, I., Saíz, A., Dueñas, A., (2004). *Relationships between bituminous binder rheological properties and Wheel-Tracking rutting resistance of asphalt mixtures*. Proceedings of the 3rd Euroasphalt and Eurobetume Congress, Viena, Book II, pp. 1659-1668.
- Batista, F.A., Antunes, M.L., Fonseca, P., (2008). *Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha*, V Congresso Rodoviário Português “Estradas 2008”, CRP, Estoril, Portugal, 2008.
- Bekoe, M. (2012). *Comparison of Laboratory Compacted Plant Mix and Field Cores*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade da Flórida, Gainesville.
- Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra. ISBN 972-40-2648-5.

- Brown, E., Buchanan, M., (2001). *Literature review: verification of gyration levels in the Superpave N_{design} table*, NCHRP Web Document 34, Transportation Research Board, Washington D.C., USA, 2001.
- Capitão, S. (2003). *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade – Volume 1*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Capitão, S., (1996). *Misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade – contribuição para a caracterização do seu comportamento*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Chen, J., Lin, C., Stein, E., Hothan, J., (2004). *Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements*. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers.
- Collop, A.C., Airey, G.D., (2014). *Mechanical and Structural Assessment of Laboratory and Field-Compacted Asphalt Mixtures*, International Journal of Civil Engineering, 2014
- Controls-Group (2014). <http://www.controls-group.com/eng/asphaltbituminous-mixture-testing-equipment/pavelab-gyrocomp-gyratory-compactor.php>. Controls Group, USA(consultado em 2014).
- COST 333 (1999). *Development of New Bituminous Pavement Design Method*. Final Report of the Action. European Commission. Luxembourg.
- COST 334 (2000). *Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres*. Final Report of the Action. European Commission. Luxembourg.
- Craus, J., Ishai, I., Sides, A., (1978). *Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures*. Journal of the Association of Asphalt Paving tcehnologists. Volume 47.
- Delorme, J., (1991). *Méthode française de formulation des enrobés*. Revue Générale des Routes et des Aérodomes.
- Dias, V. (2012). *Aplicação de Resíduos Sólidos em Pavimentos Rodoviários*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Doucet, F., Auger, B., (2007). *Essai de tension-compression cyclique pour la détermination du comportement mécanique des enrobés*. 42^{ème} Congrès Annuel de l'AQTR Association Québécoise de Transport et des Routes, Montréal, Canadá..
- Duarte, R. (2010). *Aplicação das Normas Europeias nas Misturas Betuminosas*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- EP(2012). *Caderno de Engargos Tipo Obra – Volume V: 03 – Pavimentação – Características dos Materiais, Capítulo 14.03*, Estradas de Portugal, S.A., Almada, 2012.
- EP, (2009). *Caderno de Engargos Tipo Obra – Volume V: 03 – Pavimentação – Métodos Construtivos, Capítulo 15.03*, Estradas de Portugal, S.A., Almada, 2009.

- EP, (2009a). *Caderno de Engargos Tipo Obra – Volume V: 03 – Pavimentação – Dicionário e Rubricas e Critérios de Medição, Capítulo 16*, Estradas de Portugal, S.A., Almada, 2009.
- Erkens, S., (2002). *Asphalt Concrete Response (ACRe) – Determination, Modeling and Prediction*. Delft University Press, Delft.
- Ferreira, C. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- FHWA/NHI (2000). *Superpave Fundamentals Reference Manual (NHI Course #131053)*, USA.
- Fonseca, P. (2011). *Propriedades Volumétricas de Misturas Betuminosas (Com e sem Fibras)*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- Freire, A., (2002). *Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gardete, D. (2006). *Comparação de Ensaaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gardete, D., Picado-Santos, L., Capitão, S. (2009). *Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas Tradicionais Portuguesas: Análise de Procedimentos Implementados Noutros Países*, Atas do XV CILA – Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto, XV CILA – Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto Lisboa, Portugal, 2009, pp. 529-538
- Gardete, D., Picado-Santos, L., Capitão, S. (2011). *Influência da Energia de Compactação Giratória nas Propriedades Volumétricas e na Resistência à Deformação Permanente de Misturas Betuminosas*, Atas do XVI CILA – Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- Gardete, D., Picado-Santos, L., Capitão, S. (2012). *Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas-Análise dos Níveis de Compactação para Formulação de um AC20 e de um SMA*.
- Gardete, D., Picado-Santos, L., Capitão, S., Silva, H. (2011). *The Use of the Gyratory Compactor in the Design of Portuguese Bituminous Mixtures*.
- Gomes, L. (2005). *Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Hofko, B., Blab, R., Alisov, A., (2014). *Influence of Compaction Direction on Performance Characteristics of Roller-Compacted HMA Specimens*, International Journal of Pavement Engineering, 2014
- Ibrahim, A. (2007). *Performance Evaluation of SUPERPAVE and Marshall Asphalt Mix Designs to Suite Jordan Climatic and Traffic Conditions*. Construction and Building Material, n. °21, p. 1732-1740.

- Jasmin, I., (2012). *Comparison Between Marshall and Superpave Mixtures Design*, Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences, Vol. 5, No.4, Iraque, 2012
- Jiménez, F.E.P., (2014). *Manual de Pavimentação Cepsa*, Cepsa Portuguesa Petróleos S.A., 2014
- Lopes, O. (2009). *Misturas Betuminosas – Determinação das Características para o Cálculo dos Pavimentos*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto
- López, E., Veja-Zamanillo, M.A., Calzada-Pérez, M.Á., Taborga-Sedana, M.A., (2015). *Use of bottom ash thermal power plant and lime as filler in bituminous mixtures*, Revista Materiales de Construcción, Vol 65, No 317 2015.
- Mahmoud, A.F.F., Bahia, P.H., (2004). *Using Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures*, Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02, Wisconsin Department of Transportation, 2004.
- Martinho, F. (2013). *Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização da Validação Tecnológica*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Masad, E., Jandhyala, V.K., Dasgupta, N., Somadevan, N. (2002). *Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes using X-ray Computed Tomography*. Journal of Materials in Civil Engineering Vol. 14, No. 2, April 2002
- Massad, E., Munhunthan, B., Shashidhar, N., Harman, T., (1999). *Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis*, Journal of Computing in Civil Engineering, April 1999.
- Mediante Desempeño Relativo*. Revista Infraestructura Vial, N.º 17, p. 35-45.
- Memoire Online (2013). http://www.memoireonline.com/07/08/1346/m_comparaison-formulation-enrobes-a-chaud-roulement-chaussees-tres-circulees9.html. Memoire Online, França.
- Mendes, S. (2011). *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas a Aplicar em Infra-estruturas de Transportes*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Miranda, H.M., (2010). *Slides da disciplina de Pavimentação*. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Muraya, P.M., (2007). *Homogeneous Test Specimens from Gyratory Compaction*, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, No.3, 2007
- Murtinheira, F. (2011). *Reabilitação Estrutural de Pavimentos Rodoviários. Correção do Módulo de Deformabilidade das Camadas Betuminosas*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu.

- Neubauer, O., Partl, M. (2004). *Impact of Binder Content on Selected Properties of Stone Mastic Asphalt*. Proceedings of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria.
- Neves, J.M., Correia, A.G., (2006). *Caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios de tração indireta por compressão diametral de provetes cilíndricos*. Publicação n°26, Universidade do Minho, Guimarães.
- Nunes, T. (2010). *Marcação CE de Misturas Betuminosas: A Experiência Portuguesa*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- Nunes, T., Picado-Santos, L., Capitão, S. (2011). *Estudo Sobre a Aplicação da Marcação CE em Misturas Betuminosas em Portugal*, Atas do XVI CILA – Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- Oh, Il-Seok, (2003). *A rapid performance test for Superpave HMA mixtures*, Retrospective Theses and Dissertations, Paper 609, Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
- Owende, P. M. O., Hartman, A. M., Ward, S. M., Gilchrist, M. D., O’Mahony, M. J.,(2001). *Minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure*. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers.
- Partl, Bahia, Canestrari, De La Roche, Di Benedetto, Piber, Sybiliski (2012). *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials*. Springer, Berlin. ISBN 978-94-007-5103-3.
- Pereira, F. (2009). *Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- PI (2012). <http://www.pavementinteractive.org/article/superpave-mix-design/>. Pavement Interactive, USA
- Pimentel, C. (2013). *Formulação de Misturas Betuminosas a Quente. Contribuição para um novo método de formulação*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa.
- Prowell, B.D., Brown, E.R., Huner, M., (2003). *Evaluation of the Internal Angle of Gyration of Superpave Gyration Compactors in Alabama*, NCAT Report 03-04, Montgomery, Alabama, USA, 2003
- Prowell, B.D., Zhang, J., Brown, E.R., (2005). *NCHRP Report 539 - Aggregate Properties and the Performance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt*. Transportation Research Board, Washington. ISBN 0-309-08825-9.
- Prozzi, J., Aguiar, J. (2007). *Método de Optimización del Número de Giros de Diseño*. Infraestructura Vial, n. °17, p.35-45.
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D-Y., Kennedy, T.W., (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*, Napa Research and Education Foundation, 2º edição, Lanham, MD, 1996.

- Rushing, J.F., Mejías, M., Brown, E.R., (2010). *Development of Criteria for Using the Superpave Gyrotory Compactor to design Airport Pavement Mixtures*, FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA, 2010.
- Salifu, A. (2010). *Evaluation of Compaction Sensitivity of Saskatchewan Asphalt Mixes*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon.
- Sanchez-Leal, F.J., Anguas, P.G., Larreal, M., Valdés, D.B.L., (2011). *Polyvoids: Analytical Tool for Superpave HMA Design*, American Society of Civil Engineers, 2011
- Shell (2003). *The Shell bitumen handbook*, Fifth Edition. Thomas Telford Publishing. London, UK.
- Silva, H. (2006). *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique: Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Braga.
- Torres, M.J., Castro-Gomes, J., Zoorob, S.E., (2010). *Ensaaios de "imersão-compressão", "sensibilidade à água" e "gelo-degelo" em misturas betuminosas recicladas a semi-quente do pavimento da EN244, em Ponte de Sôr*, Engenharia Civil-UM, No.36, 2010.
- Vargas, P. (2013). *Aplicação de Betão Britado reciclado em Misturas Betuminosas para Camadas de Base*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Vasconcelos, K.L., Soares, J.B., Leite, L.M., (-). *Influência da Densidade Máxima Teórica na Dosagem de Misturas Asfálticas*, Ceará, Brasil.
- Zeidaab, W.A., Kalousha, K.E., B.S. Underwooda, B.S., Mamlouka, M.E., (2013). *Improved Method of Considering Air Void and Asphalt Content Changes on Long-Term Performance of Asphalt Concrete Pavements*, International Journal of Pavement Engineering, 2013.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

- NP EN 12591 *Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens* (Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betimes de pavimentação)
- NP EN 12607-1 *Bitumen and bituminous binders – Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air – Part 1: RTFOT Method*
- EN 12697-5+A1 *Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 5: Determination of Maximum Density*. (Misturas Betuminosas – Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente – Parte 5: Determinação da baridade máxima)
- EN 12697-6 *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*
- EN 12697-8 *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*
- EN 12697-12 *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*
- EN 12697-22 *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking*
- EN 12697-23 *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*
- EN 12697-24 *Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 24: Resistance to Fatigue*
- EN 12697-26 *Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 26: Stiffness*
- EN 12697-29 *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 29: Determination of the dimensions of bituminous specimen*
- EN 12697-30+A1 *Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 30: Specimen Preparation by Impact Compactor*
- EN 12697-31 *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 31: Specimen Preparation by Gyratory Compactor*
- EN 12697-34+A1 *Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 34: Marshall Test*
- EN 12697-35+A1 *Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 35: Laboratory Mixing*

EN 12697-39 *Bituminous mixtures –Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 39: Binder Content by Ignition*

NP EN 13043 *Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments, for roads, airfields and other trafficked areas* (Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação)

NP EN 13108-1 *Bituminous mixtures –Material Specification – Part 1: Asphalt Concrete*(Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 1: Betão betuminoso)

NP EN 13108-8 *Bituminous mixtures –Material Specifications – Part 8: Reclaimed Asphalt*(Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 1: Misturas betuminosas recicladas)

NP EN 13108-20 *Bituminous mixtures –Material Specification – Part 20: Type Testing*(Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 20: Ensaios de tipo)

APÊNDICES E ANEXOS

APÊNDICE I. Análise Granulométrica



Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

LABORATÓRIO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS
Análise granulométrica

Data: Fev2014

Amostra: AC 14 surf

peneiro malha (mm)	massa de retidos (g)	massa de retidos acumulados (g)	%retidos acumulados	% retidos passados
20	0,0	0,0	0,0	100,0
14	43,0	43,0	1,9	98,1
10	457,4	500,4	22,0	78,0
4	643,3	1143,7	50,2	49,8
2	360,3	1504,0	66,0	34,0
0,5	493,6	1997,6	87,7	12,3
0,125	162,6	2160,2	94,8	5,2
0,063	52,7	2212,9	97,1	2,9
base	64,4			

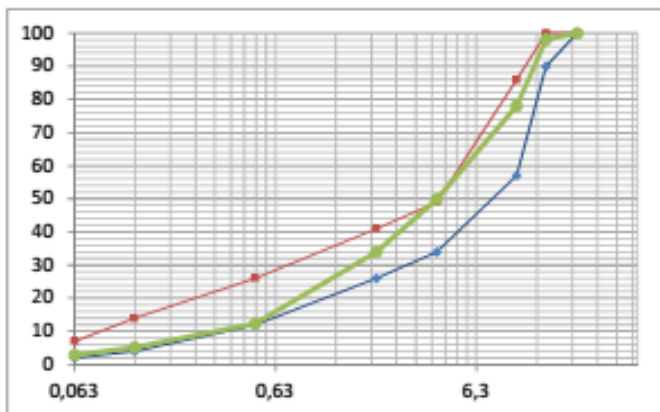
Massa seca total M1: 2278,8 g

Massa das particulasa com dimensões superior a 0,063mm M2: 2212,9 g

Massa do material retido na base P: 64,4 g

Percentagem de finos (f) que passa no peneiro de 63 mm:
 $f = [(M1 - M2 + P) / M1] * 100$
 (arredondado à décima mais próxima)

mm	Limites do fuso		amostra
20	100	100	100,0
14	90	100,0	98,1
10	57	86,0	78,0
4	34	49,0	49,8
2	26	41,0	34,0
0,5	12	26,0	12,3
0,125	4	14,0	5,2
0,063	2	7,0	2,9



Observações: _____

APÊNDICE II. Método Empírico – Resultados Laboratoriais

II.1 Baridade da mistura compactada

Tabela II 1 Baridade da mistura compactada

Provete	Pb (%)	Massa do provete (g)			T (°C)	Valor de K (água)	Baridade (kg/m ³)		Baridade (g/cm ³)
		Ar	Imerso	Sup.Seca			Provete	Média	
1.1	4,0	1167,0	658,5	1177,6	14,0	1,0022	2246,53	2261,1	2,26
1.2		1160,3	660,6	1172,1	14,0	1,0022	2266,82		
1.3		1163,2	659,6	1173,2	14,0	1,0022	2263,2		
1.4		1167,2	666,1	1180,4	14,0	1,0022	2267,89		
2.1	4,5	1168,6	667,8	1172,3	12,0	1,0025	2315,41	2285,0	2,28
2.2		1160,4	658,0	1170,9	12,0	1,0025	2261,51		
2.3		1172,8	668,9	1181,2	12,0	1,0025	2288,35		
2.4		1153,2	657,8	1164,6	12,0	1,0025	2274,53		
3.1	5,0	1184,1	675,2	1185,1	13,0	1,0023	2320,81	2287,6	2,29
3.2		1171	665,9	1174,4	13,0	1,0023	2301,4		
3.3		1188	678,1	1188,7	13,0	1,0023	2325,26		
3.5		1145,7	638,3	1158,0	14,0	1,0022	2203,0		
4.1	5,5	1157,4	650,5	1159,7	14,0	1,0022	2271,4	2284,3	2,28
4.2		1168,1	654,3	1171,2	14,0	1,0022	2258,22		
4.3		1166,5	656,4	1169,7	14,0	1,0022	2270,94		
4.4		1157,1	648,3	1161,4	15,0	1,0021	2336,81		
5.1	6,0	1173,5	663,1	1174,0	15,0	1,0021	2295,08	2315,7	2,32
5.2		1167,7	665,8	1168,9	15,0	1,0021	2319,14		
5.3		1157,1	660,2	1160,3	15,0	1,0021	2311,87		
5.4		1164,2	667,5	1165,3	15,0	1,0021	2336,81		

II.2 Baridade máxima teórica

Tabela II 2 Picnómetro de vácuo

Pb (%)	Amostra: Série AC14				
	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%
Massa do picnómetro completo (g) m1	1603,0	1603,0	1603,0	1603,6	1604,3
Massa do picnómetro completo + água(g) m2	11625,5	11625,5	11658	11649,3	11659,7
Temperatura da água (°C)	18,2	18,2	19,7	16,8	18,0
Factor K de correcção	1,001569	1,001569	1,00126	1,001724	1,0016
Volume(Vpt)=(m2-m1)/rw*0,001 (m3)	0,010036	0,010036	0,010072	0,010058	0,010069
Massa da amostra (g)	2307,6	2307,6	2311,7	2312,2	2261
Massa do picnómetro completo (g) m1	1603,0	1603,0	1602,7	1603,6	1604,3
Massa do picnómetro completo com a amostra (g) m2	3910,6	3910,6	3914,4	3915,8	3865,3
Massa do picnómetro completo + amostra + água (g) m3	13030,7	13030,7	13025,6	13020,2	12961,5
Temperatura da água (°C)	18,5	18,5	20,0	15,8	18,6
Factor K de correcção	1,001514	1,001514	1,0012	1,001963	1,001492
Máxima densidade (ρmv)=(m2-m1)/(1000xVpt-(m3-m2)/(ρw ^{25°C})xK	2555,2	2555,2	2446,7	2447,8	2356,5

Tabela II 3 Baridade máxima teórica

Provete	Pb (%)	Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)	Baridade Máxima Teórica (g/cm ³)
1.1			
1.2	4,0	2555,20	2,56
1.3			
1.4			
2.1			
2.2	4,5	2446,70	2,45
2.3			
2.4			
3.1			
3.2	5,0	2447,80	2,45
3.3			
3.5			
4.1			
4.2	5,5	2356,5	2,45
4.3			
4.4			
5.1			
5.2	6,0	2397,70	2,40
5.3			
5.4			

II.3 Porosidade

Tabela II 4 Porosidade

Provet	Pb (%)	Porosidade (%)
1.1		
1.2		
1.3	4,0	11,5
1.4		
2.1		
2.2		
2.3	4,5	6,6
2.4		
3.1		
3.2		
3.3	5,0	6,5
3.5		
4.1		
4.2		
4.3	5,5	3,1
4.4		
5.1		
5.2		
5.3	6,0	3,4
5.4		

II.4 VMA – Volume de vazios na mistura de agregados

Tabela II 5 Volume de vazios na mistura de agregados

Proвете	Pb (%)	Volume de vazios da mistura de agregados
1.1		
1.2	4,0	20,2
1.3		
1.4		
2.1		
2.2	4,5	16,5
2.3		
2.4		
3.1		
3.2	5,0	25,5
3.3		
3.5		
4.1		
4.2	5,5	15,1
4.3		
4.4		
5.1		
5.2	6,0	16,8
5.3		
5.4		

II.5 Estabilidade e Deformação (Ensaio de compressão de Marshall)

Tabela II 6 Estabilidade e deformação de Marshall

Provete	Pb (%)	Estabilidade de Marshall Corrigida (kN)		Deformação Marshall Nominal (mm)	
		Valor	Média	Valor	Média
1.1	4,0	9,5	10,525	0,9	3,625
1.2		11,5		4,7	
1.3		10,4		4,2	
1.4		10,7		4,7	
2.1	4,5	12,7	11,4	4	4,725
2.2		10,7		4,6	
2.3		12		4,3	
2.4		10,2		6	
3.1	5,0	12,5	11,775	2,8	4,025
3.2		12,3		5,9	
3.3		13,1		3,7	
3.5		9,2		3,7	
4.1	5,5	9,8	9,5	4,6	4,45
4.2		8,5		4,3	
4.3		10,2		4,2	
4.4		9,5		4,7	
5.1	6,0	10	10,95	5,6	5,5
5.2		10,5		6,7	
5.3		10,6		5	
5.4		12,7		4,7	

II.6 Ensaio de Sensibilidade à água

Tabela II 7 Ensaio de sensibilidade à água – Características dos provetes

Provete	h (mm)				h médio(mm)
	S1	62,5	62,7	63,0	63,4
S2	63,0	62,4	63,4	63,1	63,0
S3	62,5	63,0	63,1	63,0	62,9
S4	62,2	62,0	61,5	61,7	61,9
S5	61,2	65,0	65,0	66,0	64,3
S6	61,0	61,4	61,5	61,4	61,3

Tabela II 8 Ensaio de sensibilidade à água – Baridade dos provetes

Provete	h (mm)	Diâmetro (mm)	Massa do provete (g)			Temperatura da água (°C)	k	Baridade (kg/m ³)
			Ar	Imerso	Superfície seca com pano			
S1	62,9	101,3	1167,2	682,6	1169,4	21,8	1,00076	2392,6
S2	63,0	101,3	1167,5	678,2	1170,5	21,2	1,00094	2366,9
S3	62,9	101,3	1171,4	680,2	1173,1	21,6	1,00082	2371,6
S4	61,9	101,3	1158,0	671,6	1161,2	21,8	1,00076	2359,9
S5	64,3	101,3	1160,4	665,6	1166,3	21,8	1,00076	2312,6
S6	61,3	101,3	1108,6	634,9	1113,7	22,2	1,00066	2310,2

Tabela II 9 Ensaio de sensibilidade à água – Resistência conservada em tração indireta

Grupos / Características dos provetes	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"		
	s1	s2	s5	s4	s3	s6
Massa do provete (arredondado a 0,1g)	1167,2	1167,5	1160,4	1158,0	1171,4	1108,6
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	62,9	63,0	64,3	61,9	62,9	61,3
Altura média (mm)		63,4			62,0	
Diferença entre a altura média dos dois grupos (arredondada a 0,1 mm) Não deve exceder os 5mm				1,4		
Volume geométrico do provete (cm ³)	506,9	507,5	518,2	498,5	506,9	494,2
Baridade geométrica média (g/cm ³)	2,302	2,300	2,239	2,323	2,311	2,243
Massa do provete imerso em água (arredondado a 0,1g)	682,6	678,2	665,6	671,6	680,2	634,9
Massa provete com superfície seca	1169,4	1170,5	1166,3	1161,24	1173,1	1113,7
Valor de K para correção	1,00076	1,00094	1,00076	1,00076	1,00082	1,00066
Baridade imersa (g/cm ³)	2,393	2,367	2,313	2,360	2,372	2,310
Baridade imersa média (g/cm ³)		2,357			2,347	
A diferença da baridade imersa média dos dois grupos de provetes (g/cm ³) Não deve exceder os 0,015g/cm ³ (15 kg/m ³)				0,010		
Características dos provetes depois do vácuo						
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	-	-	-	101,6	101,8	102,2
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	-	-	-	62,2	63,1	62,05
Volume do provete (cm ³)	-	-	-	504,5	513,6	509,0
O aumento do volume dos provetes Após o vácuo não deve exceder 2%				509,0		(g/cm ³)
					1,0	
Ensaio de tração indireta EN 12697-23						
Tempo de condicionamento (h)					72 horas	

Temperatura de ensaio (°C)		25 ° C					
Resistência máxima (KN)		18,2	17,6	17,3	13,7	12,9	12,9
Resistência média (KN)		17,7			13,2		
Tração indireta ITS (GPa)		0,00182	0,00176	0,00169	0,00139	0,00129	0,00132
Tração indireta média ITS arredondada até 3 algarismos significativos	GPa	0,00176			0,00133		
	kPa	1755			1334		
Resistência conservada em tração indireta (%)		76					

II.7 Ensaio de Wheel-Tracking

Tabela II 10 Ensaio de Wheel-Tracking – N° Ciclos

Laje	Pb (%)	60°C	
		Final do ensaio	
		Duração (min)	N° ciclos
L1	4,5		10000
L2			7900
L3	5,0		10002
L4			10002
L5	5,5		10002
L6			10002

Tabela II 11 Ensaio de *Wheel-Tracking*

Laje	Pb (%)	Baridade (kg/cm ³)	Vv (%)	Dimensões (mm)	d10000	d5000
L1	4,5	2388,0	8,429	400x300x40	4,77	4,1
L2		2352,0	6,866		6,128	5,46
L3	5,0	2392,0	10,403		8,93	6,86
L4		2306,0	6,628		7,69	5,92
L5	5,5	2332,0	9,595		9,82	7,19
L6		2327,0	9,373		8,41	6,6

Tabela II 12 Ensaio de *Wheel-Tracking* – Propiedades volumétricas

Laje	Pb (%)	Baridade (kg/cm ³)	Baridade max teo (kg/cm ³)	Porosidade (%)	TVB (%)	Vv (%)
L1	4,5	2388,0	2438,7	-2,123	10,55203	8,429
L2		2352,0	2438,7	-3,686	10,55203	6,866
L3	5,0	2392,0	2421,6	-1,239	11,64250	10,403
L4		2306,0	2421,6	-5,015	11,64250	6,628
L5	5,5	2332,0	2404,8	-3,123	12,71783	9,595
L6		2327,0	2404,8	-3,344	12,71783	9,373

Tabela I 1 Resultados obtidas através do ensaio com o *Wheel-Tracking*

Laje	Pb (%)	Vv (%)	RD _{AIR} (mm)	RD _{AIRm} (mm)	WTS _{AIR} (mm/10 ³)	WTS _{AIRm} (mm/10 ³)	PRD _{AIR} (%)	PRD _{AIRm} (%)
L1	4,5	8,429	4,770	5,449	0,134	0,134	11,93	13,623
L2		6,866	6,128		0,134		15,32	
L3	5,0	10,403	8,930	8,310	0,414	0,384	22,33	20,775
L4		6,628	7,690		0,354		19,23	
L5	5,5	9,595	9,820	9,115	0,526	0,444	24,55	22,788
L6		9,373	8,410		0,362		21,03	

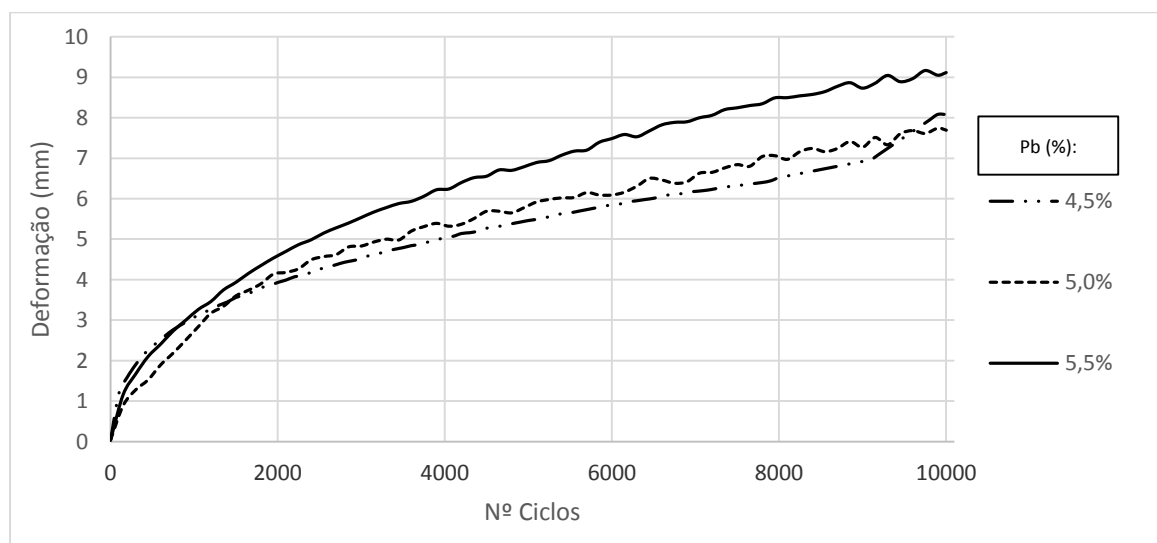


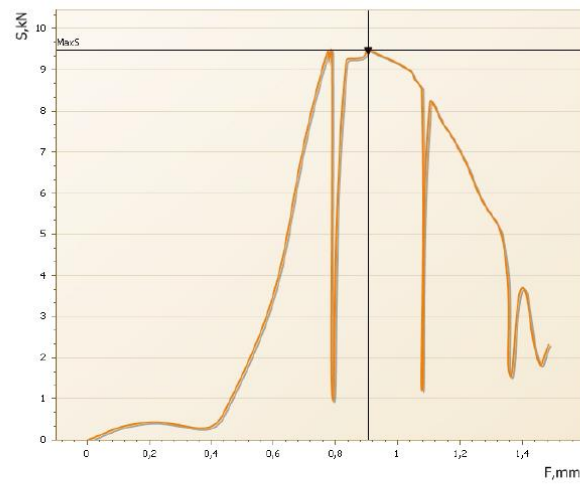
Figura II 1 Ensaio de *Wheel-Tracking* – Curva Deformação/Nº Ciclos

Tabela II 13 Ensaio de *Wheel-Tracking* - Equação da Curva Deformação/Nº Ciclos

Pb (%)	Equação	R ²
4,5	Y=0,0004x+2,8969	0,783
5,0	Y= 0,0006x+2,491	0,8945
5,5	Y= 0,0007x+2,801	0,9201

APÊNDICE III. Método Empírico - Resultados Gráficos

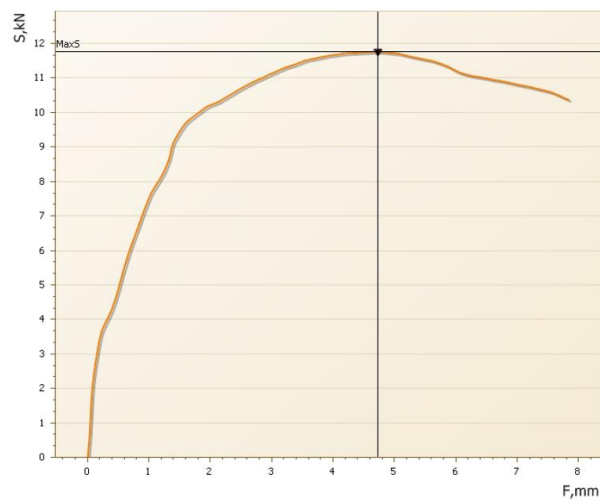
III.1 Estabilidade de Marshall



Resultados

Estabilidade de Marshall: 9,5 kN
Factor de correção (c): 0,997 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,5 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 0,9 mm

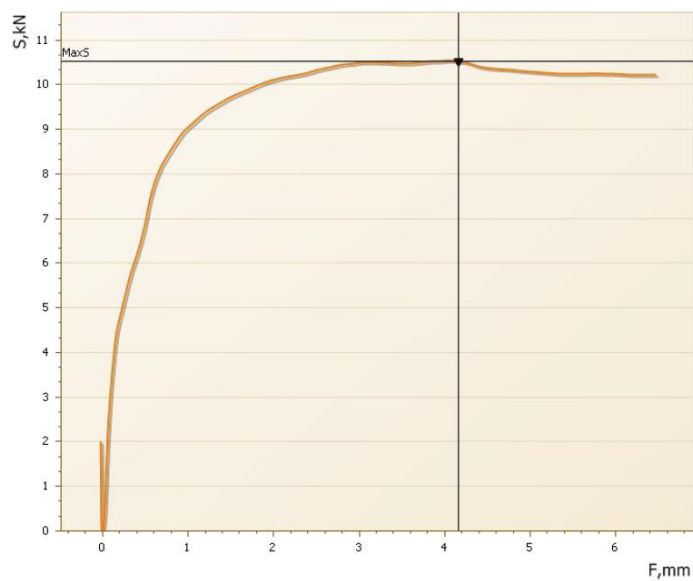
Figura III 1 Estabilidade de Marshall – Provete 1.1



Resultados

Estabilidade de Marshall: 11,8 kN
Factor de correção (c): 0,980 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 11,5 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,7 mm

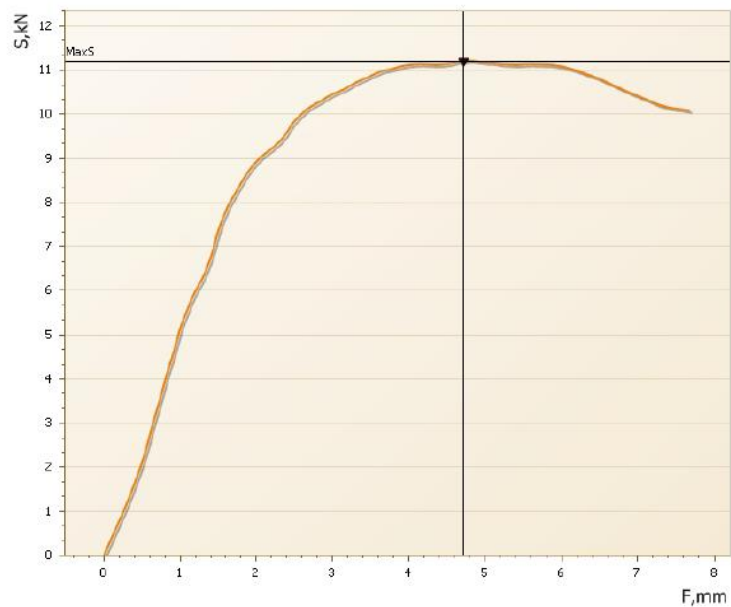
Figura III 2 Estabilidade de Marshall – Provete 1.2



Resultados

Estabilidade de Marshall: 10,5 kN
Factor de correcção (c): 0,987 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,4 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,2 mm

Figura III 3 Estabilidade de Marshall – Provet 1.3



Resultados

Estabilidade de Marshall: 11,2 kN
Factor de correcção (c): 0,957 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,7 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,7 mm

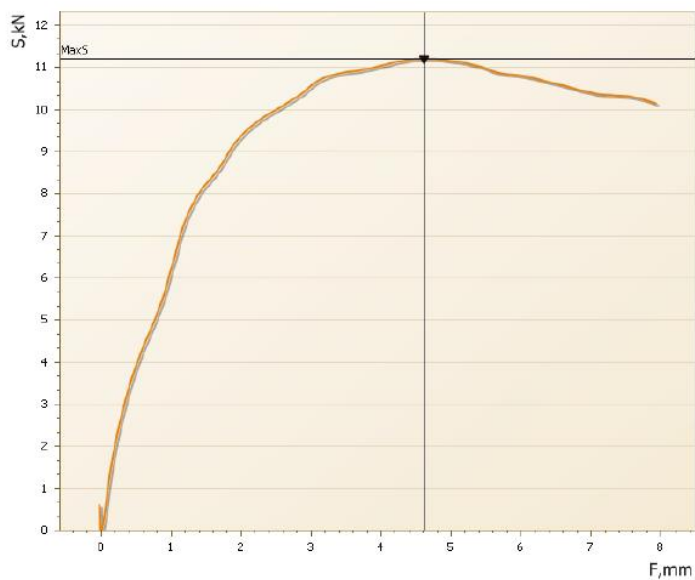
Figura III 4 Estabilidade de Marshall – Provet 1.4



Resultados

Estabilidade de Marshall: 13,0 kN
Factor de correção (c): 0,980 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 12,7 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,0 mm

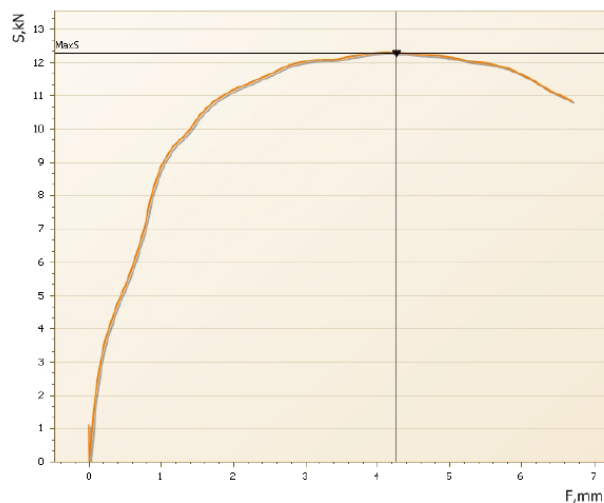
Figura III 5 Estabilidade de Marshall – Provet 2.1



Resultados

Estabilidade de Marshall: 11,2 kN
Factor de correção (c): 0,952 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,7 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,6 mm

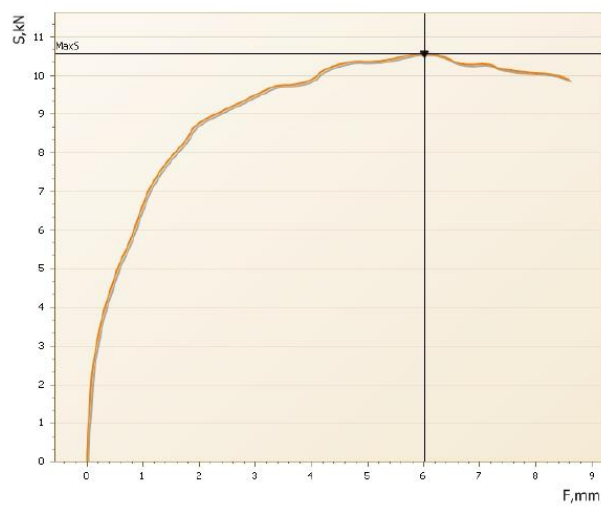
Figura III 6 Estabilidade de Marshall – Provet 2.2



Resultados

Estabilidade de Marshall: 12,3 kN
Factor de correção (c): 0,974 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 12,0 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,3 mm

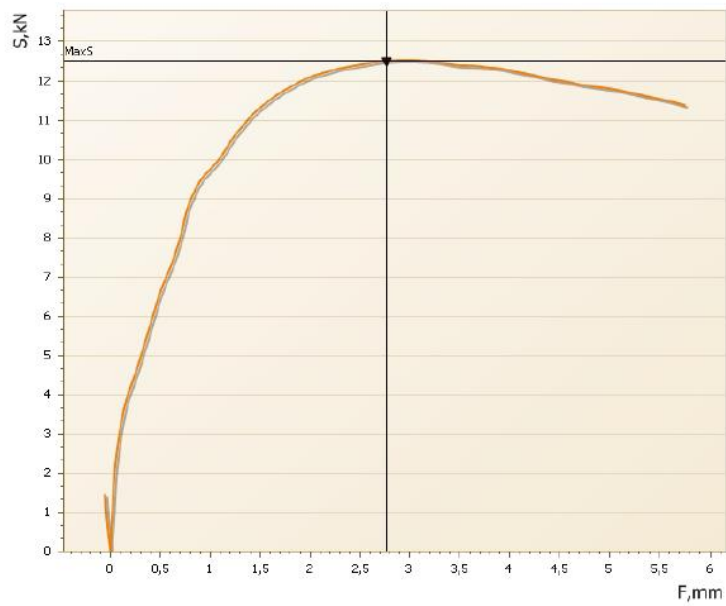
Figura III 7 Estabilidade de Marshall – Provet 2.3



Resultados

Estabilidade de Marshall: 10,6 kN
Factor de correção (c): 0,964 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,2 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 6,0 mm

Figura III 8 Estabilidade de Marshall – Provet 2.4



Resultados

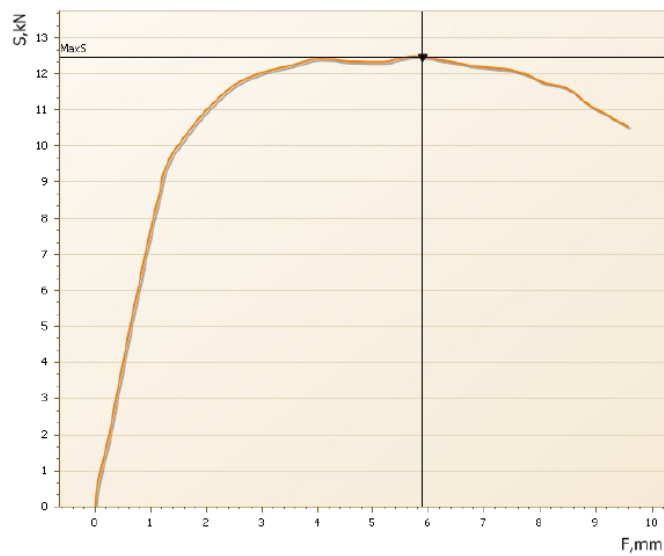
Estabilidade de Marshall: 12,5 kN

Factor de correção (c): 0,997 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 12,5 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,8 mm

Figura III 9 Estabilidade de Marshall – Provet 3.1



Resultados

Estabilidade de Marshall: 12,5 kN

Factor de correção (c): 0,985 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 12,3 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 5,9 mm

Figura III 10 Estabilidade de Marshall – Provet 3.2



Resultados

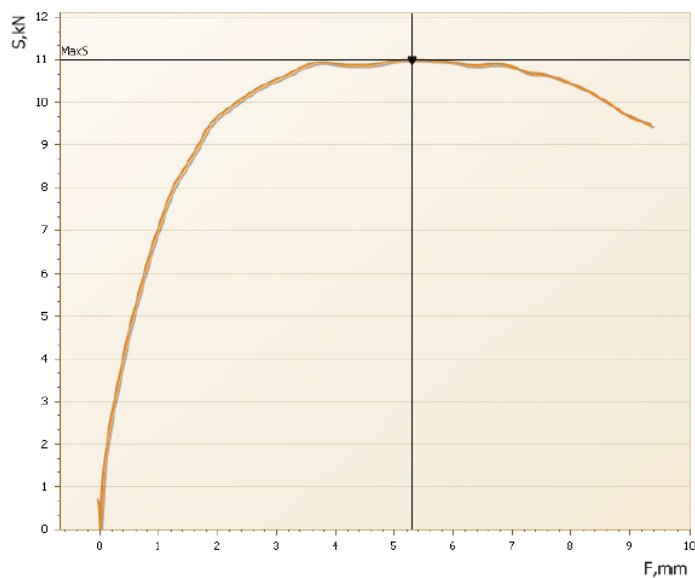
Estabilidade de Marshall: 13,3 kN

Factor de correção (c): 0,987 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 13,1 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 3,7 mm

Figura III 11 Estabilidade de Marshall – Provede 3.3



Resultados

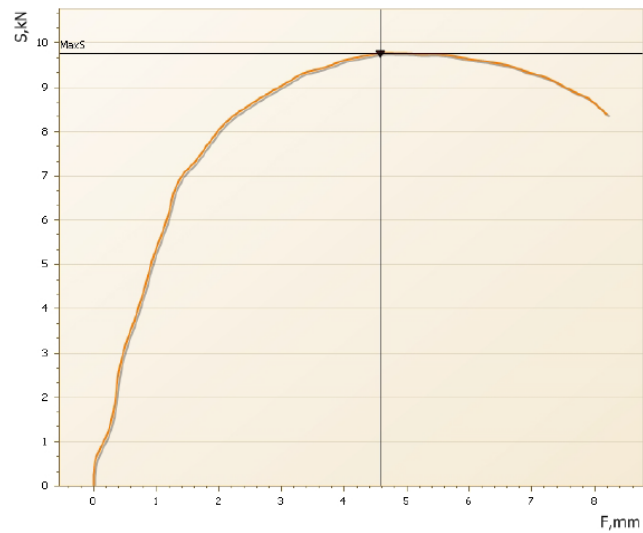
Estabilidade de Marshall: 11,0 kN

Factor de correção (c): 0,893 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,8 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 5,3 mm

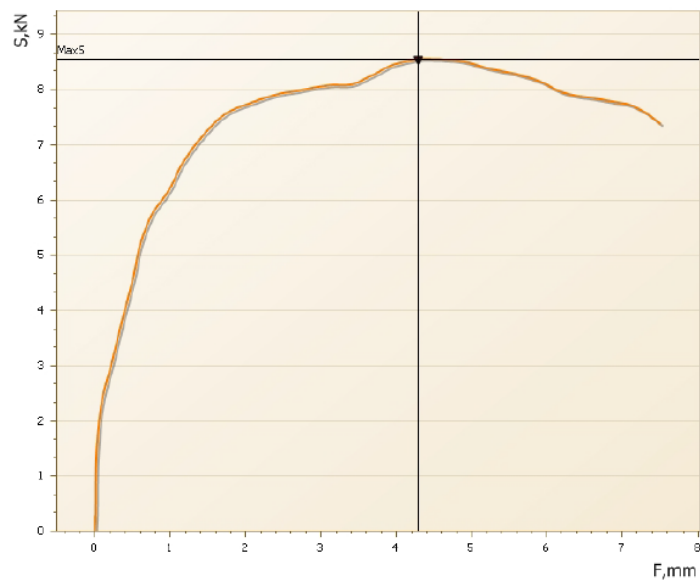
Figura III 12 Estabilidade de Marshall – Provede 3.4



Resultados

Estabilidade de Marshall: 9,8 kN
Factor de correcção (c): 1,003 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,8 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,6 mm

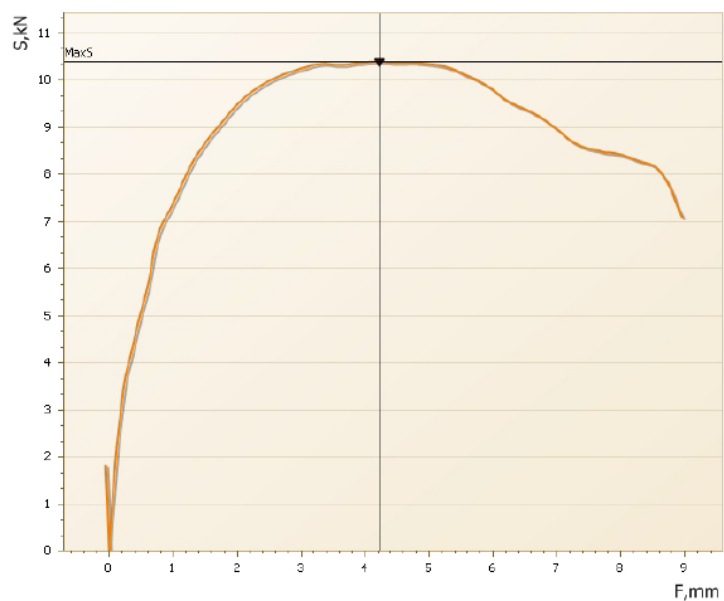
Figura III 13 Estabilidade de Marshall – Provetete 4.1



Resultados

Estabilidade de Marshall: 8,5 kN
Factor de correcção (c): 0,990 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 8,5 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,3 mm

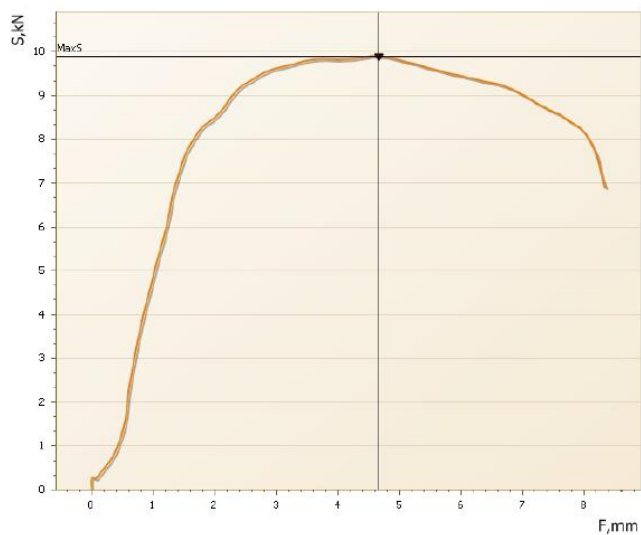
Figura III 14 Estabilidade de Marshall – Provetete 4.2



Resultados

Estabilidade de Marshall: 10,4 kN
Factor de correcção (c): 0,985 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,2 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,2 mm

Figura III 15 Estabilidade de Marshall – Provet 4.3



Resultados

Estabilidade de Marshall: 9,9 kN
Factor de correcção (c): 0,957 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,5 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,7 mm

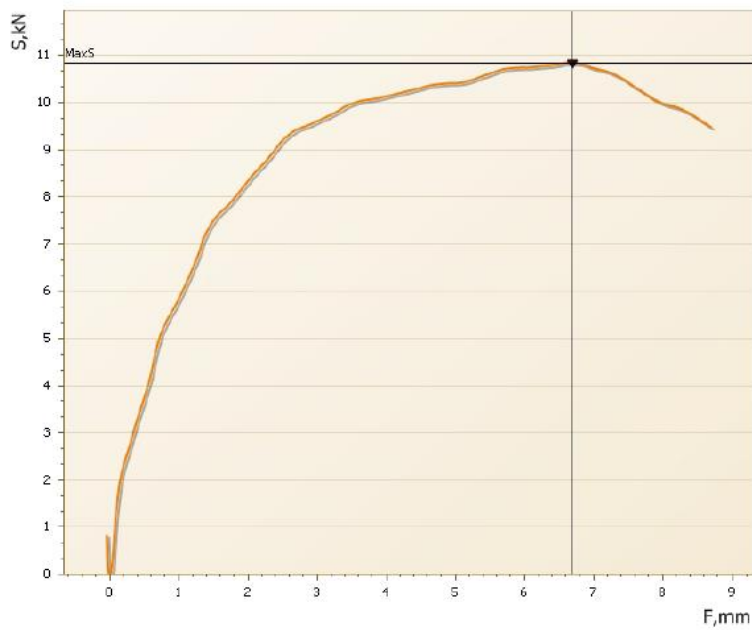
Figura III 16 Estabilidade de Marshall – Provet 4.4



Resultados

Estabilidade de Marshall: 9,8 kN
Factor de correcção (c): 1,016 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,0 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 5,6 mm

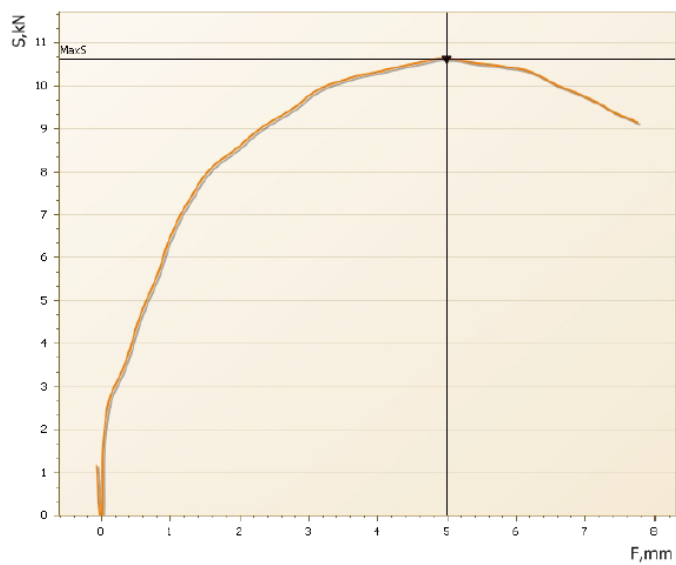
Figura III 17 Estabilidade de Marshall – Provet 5.1



Resultados

Estabilidade de Marshall: 10,9 kN
Factor de correcção (c): 0,964 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,5 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 6,7 mm

Figura III 18 Estabilidade de Marshall – Provet 5.2

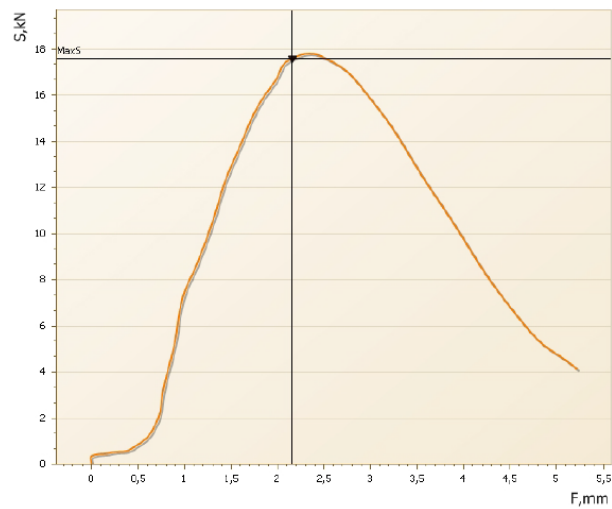


Resultados

Estabilidade de Marshall: 10,6 kN
Factor de correcção (c): 0,995 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,6 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 5,0 mm

Figura III 19 Estabilidade de Marshall – Provette 5.3

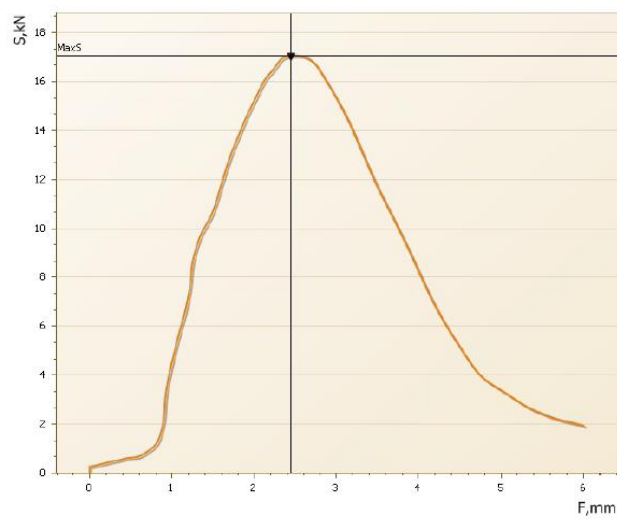
III.2 Sensibilidade à água



Resultados

Estabilidade de Marshall: 17,6 kN
Factor de correção (c): 1,034 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 18,2 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,2 mm

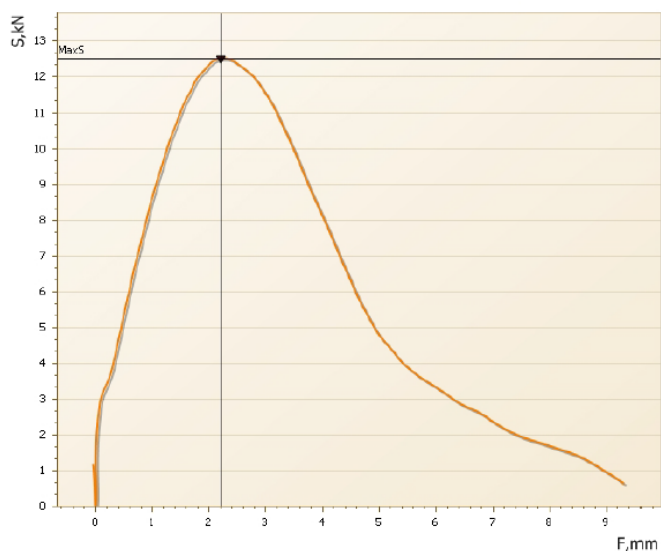
Figura III 20 Sensibilidade à água – Provetete S1



Resultados

Estabilidade de Marshall: 17,1 kN
Factor de correção (c): 1,031 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 17,6 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,4 mm

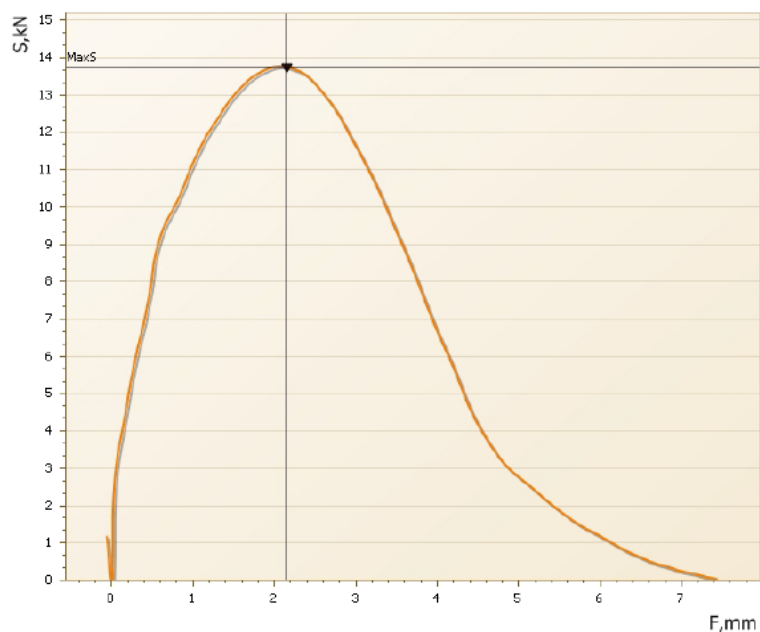
Figura III 21 Sensibilidade à água – Provetete S2



Resultados

Estabilidade de Marshall: 12,5 kN
Factor de correção (c): 1,034 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 12,9 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,2 mm

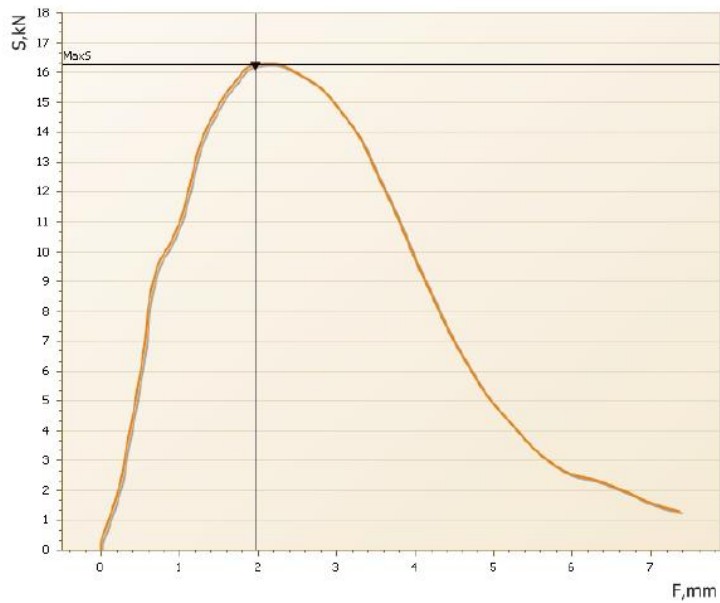
Figura III 22 Sensibilidade à água – Provet S3



Resultados

Estabilidade de Marshall: 13,7 kN
Factor de correção (c): 0,997 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 13,7 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,1 mm

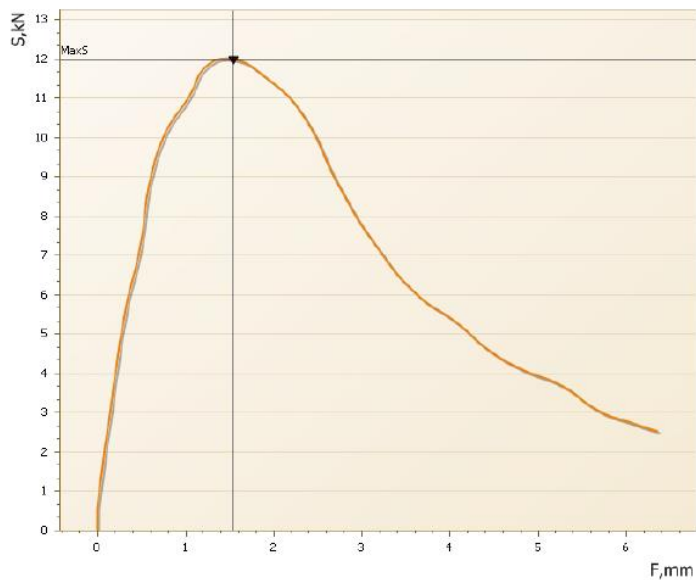
Figura III 23 Sensibilidade à água – Provet S4



Resultados

Estabilidade de Marshall: 16,3 kN
Factor de correcção (c): 1,061 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 17,3 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,0 mm

Figura III 24 Sensibilidade à água – Provet S5



Resultados

Estabilidade de Marshall: 12,0 kN
Factor de correcção (c): 1,078 (altura) [mm]
Estabilidade de Marshall corrigida (S): 12,9 kN
Deformação Marshall Nominal (Fn): 1,5 mm

Figura III 25 Sensibilidade à água – Provet S6

III.3 Ensaio de Wheel-Tracking

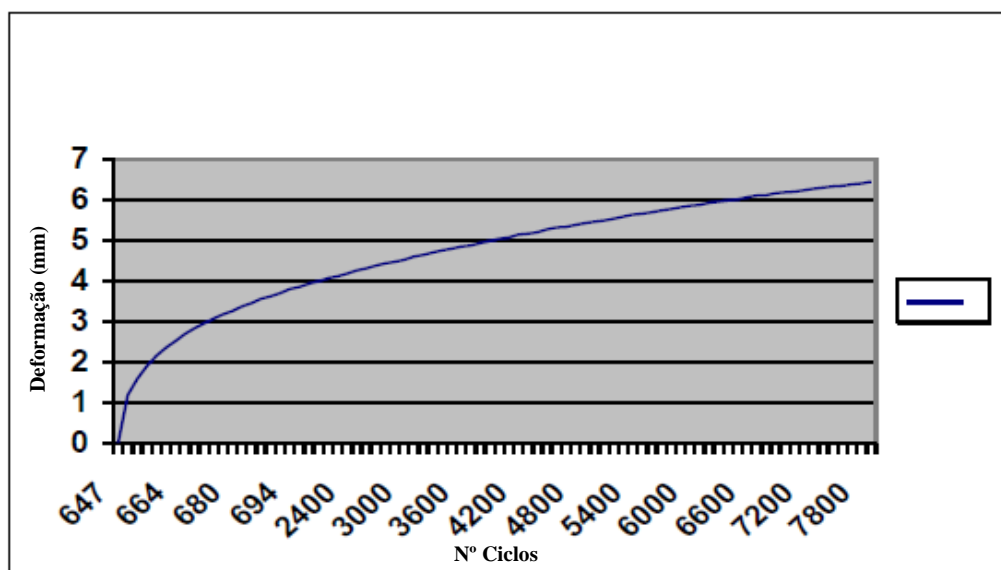


Figura III 26 Ensaio de Wheel-Tracking – Provet L2

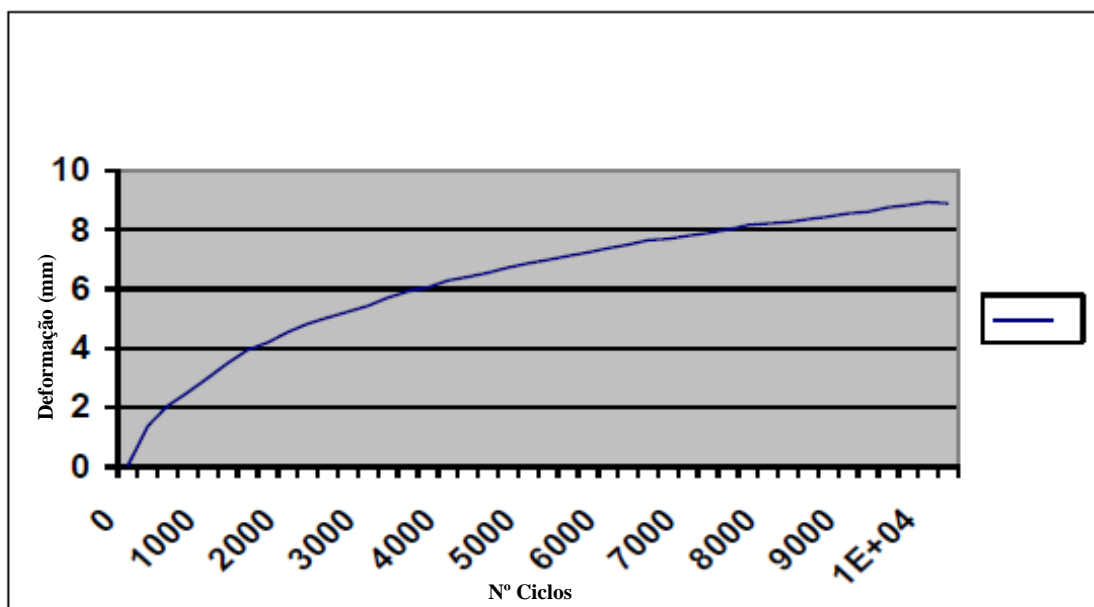


Figura III 27 Ensaio de Wheel-Tracking – Provet L3

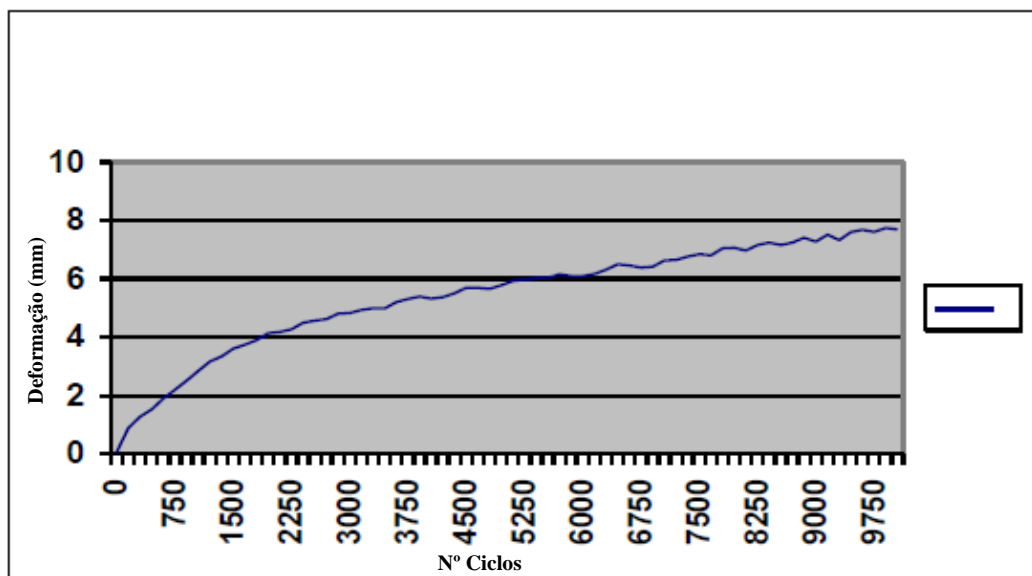


Figura III 28 Ensaio de Wheel-Tracking – Provet L4

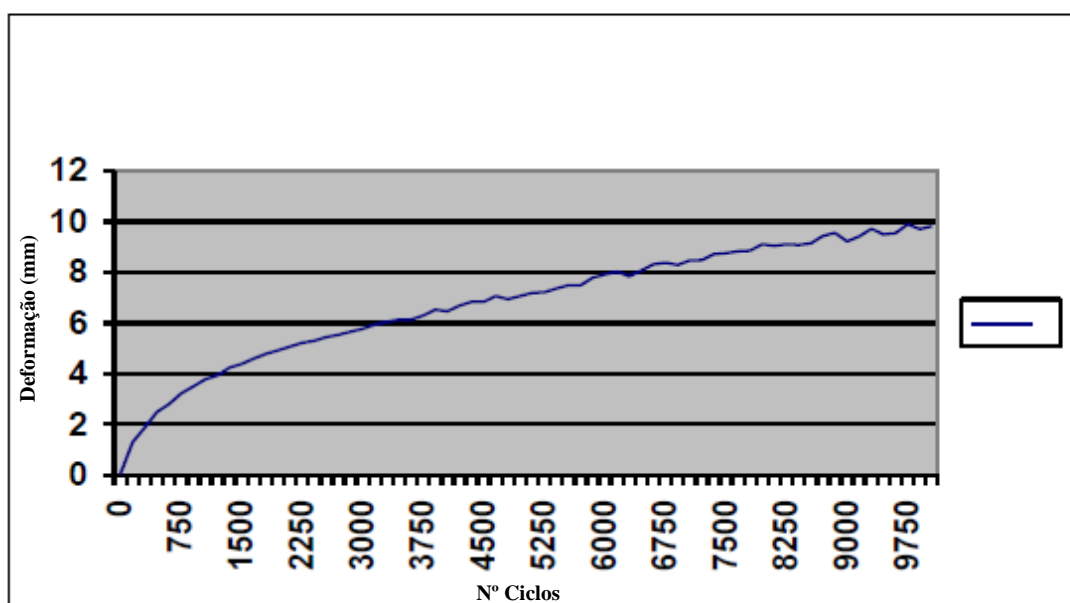


Figura III 29 Ensaio de Wheel-Tracking – Provet L5

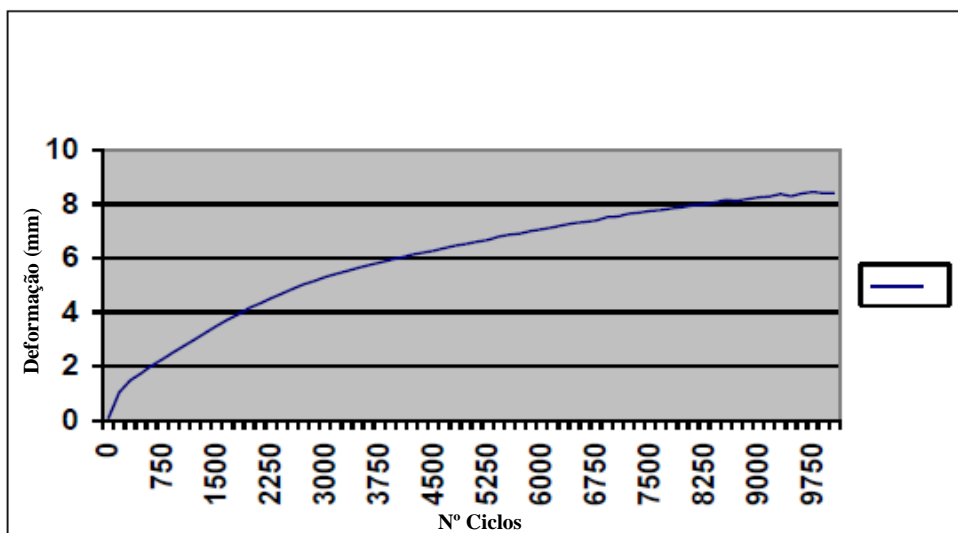


Figura III 30 Ensaio de Wheel-Tracking – Provet L6

APÊNDICE IV. Método Volumétrico – Resultados Laboratoriais

IV.1 Baridade medida experimentalmente

Tabela IV 1 Baridade medida experimentalmente

Provete	N	Pb (%)	Massa ar (g)	Massa Hid (g)	Massa sup. seca com pano (g)	T°C	valor de K	Baridade ssd	
								(g/cm ³)	(kg/cm ³)
1.1		4,5	4867,80	2835,70	4871,00	22,60	1,00	2,40	2398,23
1.2			4864,50	2831,60	4870,90	22,60	1,00	2,40	2395,66
1.3			4642,80	2681,60	4655,00	22,60	1,00	2,37	2370,07
2.1		5,0	4869,90	2877,60	4871,50	24,00	1,00	2,45	2446,81
2.2			4712,20	2779,00	4713,70	24,00	1,00	2,44	2439,95
2.3			4817,60	2789,40	4823,10	25,50	1,00	2,38	2377,68
3.1	100 ciclos	5,5	4836,20	2834,40	4837,20	22,20	1,00	2,42	2419,12
3.2			4829,50	2831,90	4830,00	22,20	1,00	2,42	2420,84
3.3			4762,60	2739,00	4763,90	22,20	1,00	2,36	2356,64
4.1		6,0	4829,50	2838,30	4830,50	21,80	1,00	2,43	2429,11
4.2			4846,90	2837,60	4848,60	21,80	1,00	2,42	2415,90
4.3			4744,80	2765,10	4748,30	21,80	1,00	2,40	2400,37

Tabela IV 2 Porosidade, TVB e VMA

Provete	N	Pb (%)	Baridade ssd (g/cm ³)	Baridade max teo (kg/cm ³)	Porosidade (%)	TVB (%)	VMA (%)
1.1		4,5	2,39	2446,70	1,98	10,38	12,36
1.2			2,39		2,09	10,37	12,45
1.3			2,36		3,13	10,26	13,39
2.1		5,0	2,44	2447,80	0,04	11,76	11,80
2.2			2,44		0,32	11,73	12,05
2.3			2,37		2,86	11,43	14,30
3.1	100 ciclos	5,5	2,42	2356,50	-2,66	12,79	10,14
3.2			2,42		-2,73	12,80	10,07
3.3			2,36		-0,01	12,46	12,46
4.1		6,0	2,43	2397,70	-1,31	14,01	12,70
4.2			2,41		-0,76	13,94	13,18
4.3			2,40		-0,11	13,85	13,74

IV.2 Estimativa da baridade por interpolação em cada ciclo

Tabela IV 3 Baridade para cada ciclo – Pb=4,5%

Pb = 4,5%								
Nº giro	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm
4	1.1	2069	2088,36	85,35	1.2	2069	2088,36	85,35
5		2090	2109,56	86,22		2090	2109,56	86,22
6		2109	2128,73	87,00		2109	2128,73	87,00
8		2137	2157,00	88,16		2137	2157,00	88,16
10		2160	2180,21	89,11		2160	2180,21	89,11
12		2179	2199,39	89,89		2179	2199,39	89,89
16		2208	2228,66	91,09		2208	2228,66	91,09
20		2231	2251,88	92,04		2231	2251,88	92,04
25		2253	2274,08	92,94		2253	2274,08	92,94
32		2278	2299,32	93,98		2278	2299,32	93,98
40		2298	2319,50	94,80		2298	2319,50	94,80
50		2319	2340,70	95,67		2319	2340,70	95,67
64		2340	2361,90	96,53		2340	2361,90	96,53
75		2350	2371,48	96,93		2350	2371,48	96,93
80		2359	2381,07	97,32		2359	2381,07	97,32
100		2376	2398,23	98,02		2376	2398,23	98,02

Tabela IV 4 Baridade para cada ciclo – Pb=5,0%

Pb = 5,0%								
Nº giro	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm
4	2.2	2141	2133,85	87,17	2.3	2039	2043,02	83,46
5		2164	2156,78	88,11		2060	2064,07	84,32
6		2182	2174,72	88,84		2079	2083,10	85,10
8		2214	2206,61	90,15		2109	2113,16	86,33
10		2238	2230,53	91,12		2133	2137,21	87,31
12		2258	2250,46	91,94		2153	2157,25	88,13
16		2291	2283,35	93,28		2185	2189,31	89,44
20		2316	2308,27	94,30		2209	2213,36	90,42
25		2340	2332,19	95,28		2233	2237,41	91,40
32		2367	2359,10	96,38		2259	2263,46	92,47
40		2389	2381,03	97,27		2283	2287,51	93,45
50		2409	2400,96	98,09		2306	2310,55	94,39
64		2431	2422,89	98,98		2231	2235,40	91,32
75		2438	2429,86	99,27		2292	2296,52	93,82
80		2445	2436,84	99,55		2353	2357,64	96,32
100		2455	2446,81	99,96		2373	2377,68	97,14

Tabela IV 5 Baridade para cada ciclo – Pb=5,5%

Pb = 5,5%								
Nº giro	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm
4		2178	2145,29	91,04		2202	2173,13	92,22
5		2199	2165,98	91,91		2225	2195,83	93,18
6		2220	2186,66	92,79		2245	2215,57	94,02
8		2252	2218,18	94,13		2277	2247,15	95,36
10		2278	2243,79	95,22		2303	2272,81	96,45
12		2298	2263,49	96,05		2323	2292,55	97,29
16		2332	2296,98	97,47		2356	2325,12	98,67
20		2356	2320,62	98,48		2379	2347,81	99,63
25	3.1	2379	2343,27	99,44	3.2	2401	2369,53	100,55
32		2403	2366,91	100,44		2421	2389,26	101,39
40		2422	2385,63	101,24		2433	2401,11	101,89
50		2437	2400,4	101,86		2441	2409	102,23
64		2447	2410,25	102,28		2446	2413,94	102,44
75		2451	2413,7	102,43		2448	2415,42	102,5
80		2454	2417,15	102,57		2449	2416,9	102,56
100		2456	2419,12	102,66		2453	2420,84	102,73

Nº giro	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm
4		2025	2026,41	85,99
5		2048	2049,42	86,97
6		2057	2058,43	87,35
8		2099	2100,46	89,13
10		2123	2124,47	90,15
12		2144	2145,49	91,05
16		2176	2177,51	92,4
20		2201	2202,53	93,47
25	3.3	2227	2228,55	94,57
32		2254	2255,57	95,72
40		2276	2277,58	96,65
50		2300	2301,6	97,67
64		2324	2325,61	98,69
75		2335	2336,62	99,16
80		2346	2347,63	99,62
100		2355	2356,64	100,01

Tabela IV 6 Baridade para cada ciclo – Pb=6,0%

Pb = 6,0%								
Nº giro	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm
4	4.1	2112	2137,62	89,15	4.2	2135	2149,15	89,99
5		2134	2159,88	90,08		2160	2174,31	91,04
6		2153	2179,11	90,88		2178	2192,43	91,8
8		2184	2210,49	92,19		2209	2223,64	93,11
10		2209	2235,79	93,25		2234	2248,8	94,16
12		2230	2257,05	94,13		2254	2268,93	95
16		2262	2289,44	95,48		2286	2301,15	96,35
20		2287	2314,74	96,54		2310	2325,3	97,36
25		2312	2340,04	97,6		2335	2350,47	98,42
32		2336	2364,33	98,61		2360	2375,64	99,47
40		2361	2389,64	99,66		2378	2393,76	100,23
50		2381	2409,88	100,51		2389	2404,83	100,69
64		2394	2423,04	101,06		2394	2409,86	100,91
75		2396	2424,56	101,12		2395	2410,87	100,95
80		2397	2426,07	101,18		2396	2411,87	100,99
100		2400	2429,11	101,31		2400	2415,9	101,16

Nº giro	Provete	Baridade (PGC)	Baridade (Real)	%Gmm
4	4.3	2033	2072,17	86,42
5		2055	2094,59	87,36
6		2075	2114,98	88,21
8		2106	2146,57	89,53
10		2130	2171,04	90,55
12		2149	2190,4	91,35
16		2181	2223,02	92,71
20		2205	2247,48	93,73
25		2230	2272,96	94,8
32		2257	2300,48	95,95
40		2280	2323,93	96,92
50		2302	2346,35	97,86
64		2326	2370,81	98,88
75		2336	2381,01	99,3
80		2346	2391,2	99,73
100		2355	2400,37	100,11

IV.3 Propriedades volumétricas em cada ciclo

Tabela IV 7 Propriedades volumétricas em cada ciclo – Pb=4,5%

Pb (%)	Nº ciclo	Baridade (kg/cm3)	Baridade Máxima Teórica (kg/cm3)	Porosidade (%)	TVB (%)	VMA(%)
4,50%	4	2078,92	2446,7	15,03	9,00	24,03
	5	2100,06	2446,7	14,17	9,09	23,25
	6	2118,68	2446,7	13,41	9,17	22,57
	8	2148,37	2446,7	12,19	9,30	21,49
	10	2172,02	2446,7	11,23	9,40	20,62
	12	2191,14	2446,7	10,45	9,48	19,93
	16	2221,33	2446,7	9,21	9,61	18,82
	20	2245,49	2446,7	8,22	9,72	17,94
	25	2268,13	2446,7	7,30	9,81	17,11
	32	2293,29	2446,7	6,27	9,92	16,19
	40	2315,43	2446,7	5,37	10,02	15,38
	50	2337,57	2446,7	4,46	10,11	14,57
	64	2359,71	2446,7	3,56	10,21	13,77
	75	2369,27	2446,7	3,16	10,25	13,42
	80	2378,83	2446,7	2,77	10,29	13,07
	100	2396,95	2446,7	2,03	10,37	12,40

Tabela IV 8 Propriedades volumétricas em cada ciclo – Pb=5,0%

Pb (%)	Nº ciclo	Baridade (kg/cm3)	Baridade Máx. Teo. (kg/cm3)	Porosidade (%)	TVB (%)	VMA(%)
5,00%	4	2088,44	2447,8	14,68	10,04	24,72
	5	2110,42	2447,8	13,78	10,15	23,93
	6	2128,91	2447,8	13,03	10,24	23,26
	8	2159,89	2447,8	11,76	10,38	22,15
	10	2183,87	2447,8	10,78	10,50	21,28
	12	2203,86	2447,8	9,97	10,60	20,56
	16	2236,33	2447,8	8,64	10,75	19,39
	20	2260,82	2447,8	7,64	10,87	18,51
	25	2284,80	2447,8	6,66	10,98	17,64
	32	2311,28	2447,8	5,58	11,11	16,69
	40	2334,27	2447,8	4,64	11,22	15,86
	50	2355,76	2447,8	4,12	11,33	15,45
	64	2359,47	2447,8	3,61	11,34	14,95
	75	2363,19	2447,8	3,46	11,36	14,82
	80	2397,24	2447,8	2,07	11,53	13,59
	100	2412,24	2447,8	1,45	11,60	13,05

Tabela IV 9 Propriedades volumétricas em cada ciclo – Pb=5,5%

Pb (%)	Nº ciclo	Baridade (kg/cm3)	Baridade Máx.Teo. (kg/cm3)	Porosidade (%)	TVB (%)	VMA(%)
5,50%	4	2114,94	2356,5	10,25	11,18	21,44
	5	2137,08	2356,5	9,31	11,30	20,61
	6	2153,55	2356,5	8,61	11,39	20,00
	8	2188,60	2356,5	7,13	11,57	18,70
	10	2213,69	2356,5	6,06	11,71	17,77
	12	2233,84	2356,5	5,21	11,81	17,02
	16	2266,53	2356,5	3,82	11,99	15,80
	20	2290,32	2356,5	2,81	12,11	14,92
	25	2313,78	2356,5	1,81	12,24	14,05
	32	2337,25	2356,5	0,82	12,36	13,18
	40	2354,77	2356,5	0,07	12,45	12,53
	50	2370,33	2356,5	-0,59	12,54	11,95
	64	2383,27	2356,5	-1,14	12,60	11,47
	75	2388,58	2356,5	-1,36	12,63	11,27
	80	2393,89	2356,5	-1,59	12,66	11,07
	100	2398,87	2356,5	-1,80	12,69	10,89

Tabela IV 10 Propriedades volumétricas em cada ciclo – Pb=6,0%

Pb (%)	Nº ciclo	Baridade (kg/cm3)	Baridade Máx.Teo. (kg/cm3)	Porosidade (%)	TVB (%)	VMA(%)
6,00%	4	2119,64	2397,7	11,60	12,23	23,83
	5	2142,93	2397,7	10,63	12,36	22,99
	6	2162,17	2397,7	9,82	12,47	22,30
	8	2193,57	2397,7	8,51	12,66	21,17
	10	2218,54	2397,7	7,47	12,80	20,27
	12	2238,79	2397,7	6,63	12,92	19,54
	16	2271,20	2397,7	5,28	13,10	18,38
	20	2295,84	2397,7	4,25	13,25	17,49
	25	2321,16	2397,7	3,19	13,39	16,58
	32	2346,82	2397,7	2,12	13,54	15,66
	40	2369,11	2397,7	1,19	13,67	14,86
	50	2387,02	2397,7	0,45	13,77	14,22
	64	2401,24	2397,7	-0,15	13,85	13,71
	75	2405,48	2397,7	-0,32	13,88	13,55
	80	2409,72	2397,7	-0,50	13,90	13,40
	100	2415,13	2397,7	-0,73	13,93	13,21

APÊNDICE V. Método Volumétrico – Resultados Gráficos

V.1 Grupo 1 – Pb=4,5%

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 30.06.2014 FROM FILE 1.1.txt

30.06.2014	SAMPLE WEIGHT	4878	g
14:45	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 2	GYRATORY ANGLE	20.30	mrad
SAMPLE CODE 1.1	GYRATORY SPEED	29.9	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m3	SHEAR kN/m2
4	133,4		2069
5	132,1		2090
6	130,9		2109
8	129,2		2137
10	127,8		2160
12	126,7		2179
16	125,0		2208
20	123,8		2231
25	122,5		2253
32	121,2		2278
40	120,1		2298
50	119,1		2319
64	118,0		2340
80	117,0		2359
100	116,2		2376

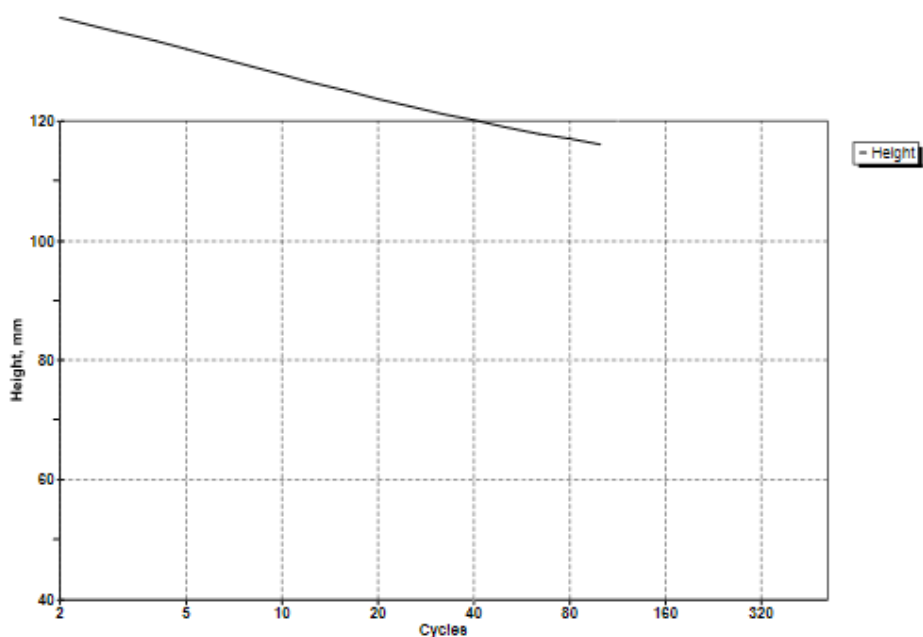


Figura V 1 Método Volumétrico – Provete 1.1

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 30.06.2014 FROM FILE 1.2.txt

30.06.2014	SAMPLE WEIGHT	4878	g
14:20	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 1	GYRATORY ANGLE	20,30	mrad
SAMPLE CODE 1.2	GYRATORY SPEED	30,1	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m ³	SHEAR kN/m ²
4	133,9	2062	
5	132,5	2083	
6	131,3	2102	
8	129,5	2132	
10	128,1	2156	
12	126,9	2175	
16	125,2	2206	
20	123,8	2231	
25	122,5	2254	
32	121,1	2279	
40	119,9	2303	
50	118,7	2326	
64	117,5	2349	
80	116,6	2368	
100	115,7	2387	

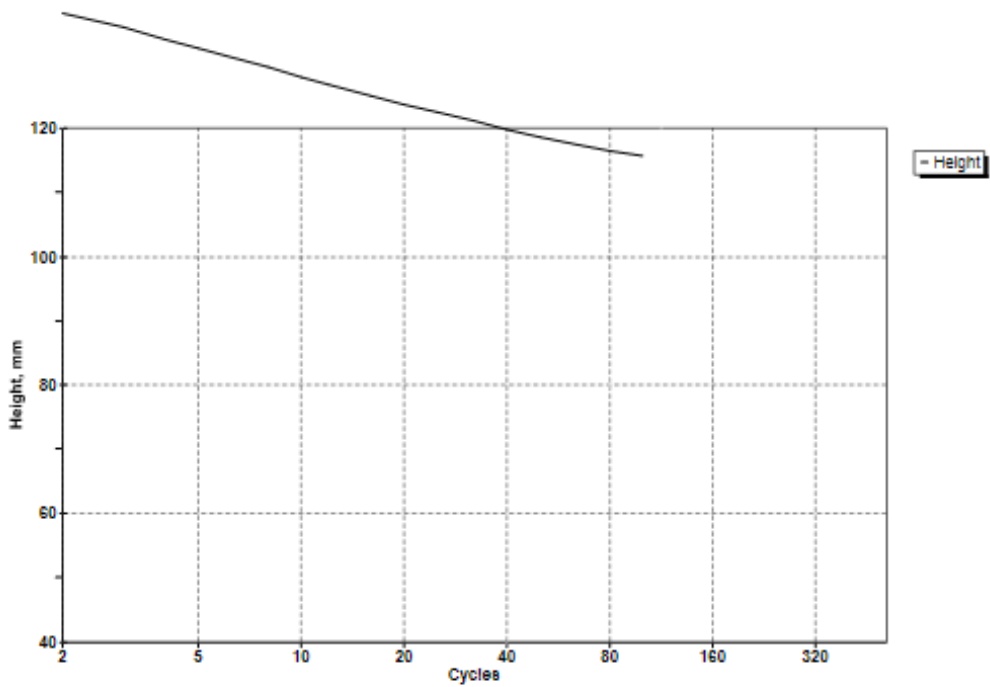


Figura V 2 Método Volumétrico – Provete 1.2

V.2 Grupo 2 – Pb=5,0%

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 01.07.2014 FROM FILE 2.1.txt

01.07.2014	SAMPLE WEIGHT	4890	g
11:10	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 1	GYRATORY ANGLE	20,30	mrad
SAMPLE CODE2.1	GYRATORY SPEED	30,4	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m3	SHEAR kN/m2
4	129,3	2141	
5	127,9	2164	
6	126,8	2182	
8	125,0	2214	
10	123,7	2238	
12	122,6	2258	
16	120,8	2291	
20	119,5	2316	
25	118,3	2340	
32	116,9	2367	
40	115,9	2389	
50	114,9	2409	
64	113,9	2431	
80	113,2	2445	
100	112,7	2455	

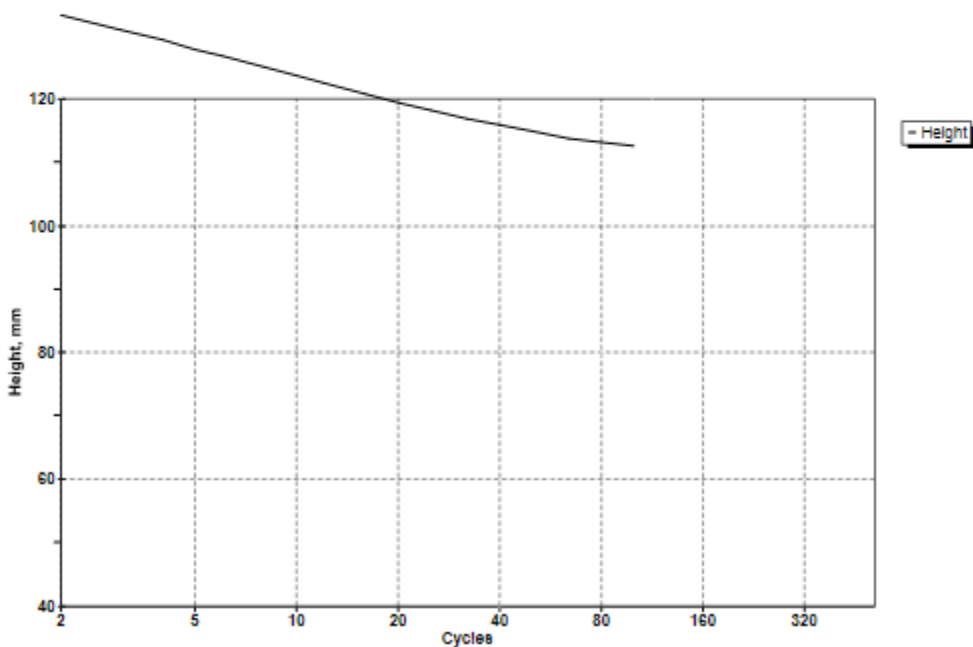


Figura V 3 Método Volumétrico – Provete 2.1

V.3 Grupo 3 – Pb=5,5%

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 02.07.2014 FROM FILE 3.1.txt

02.07.2014	SAMPLE WEIGHT	4870	g
11:37	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 1	GYRATORY ANGLE	20,30	mrاد
SAMPLE CODE3.1	GYRATORY SPEED	30,4	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m3	SHEAR kN/m2
4	126,6		2178
5	125,3		2199
6	124,2		2220
8	122,4		2252
10	121,0		2278
12	119,9		2298
16	118,2		2332
20	117,0		2356
25	115,9		2379
32	114,7		2403
40	113,8		2422
50	113,1		2437
64	112,6		2447
80	112,3		2454
100	112,2		2456

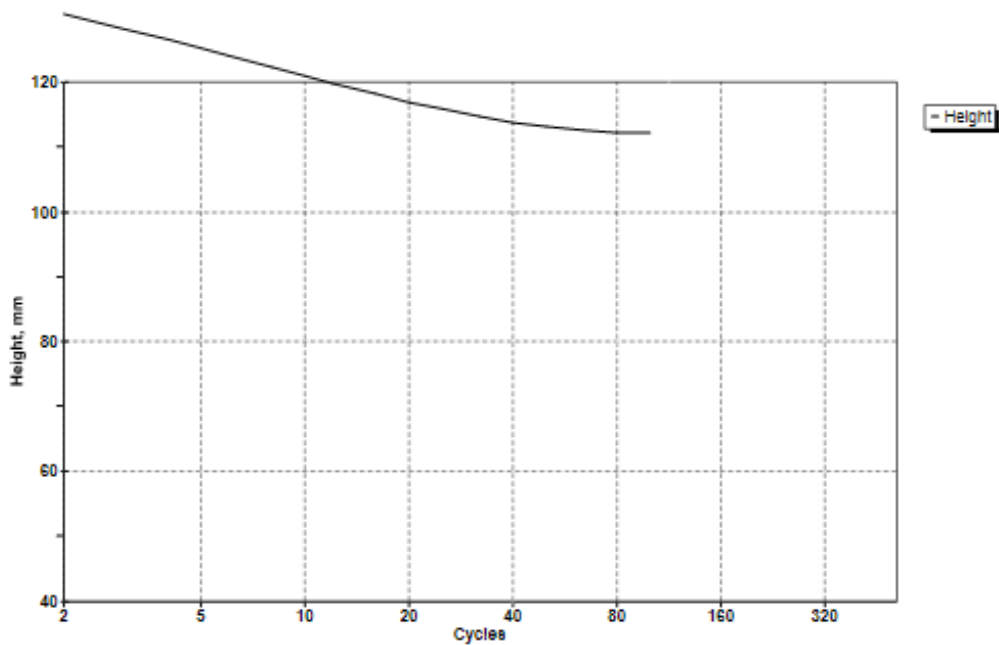


Figura V 4 Método Volumétrico – Provet 3.1

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 02.07.2014 FROM FILE 3.2.txt

02.07.2014	SAMPLE WEIGHT	4865	g
11:45	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 2	GYRATORY ANGLE	20,30	mrad
SAMPLE CODE3.2	GYRATORY SPEED	29,9	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m3	SHEAR kN/m2
4	125,1	2202	
5	123,8	2225	
6	122,7	2245	
8	120,9	2277	
10	119,6	2303	
12	118,5	2323	
16	116,9	2356	
20	115,7	2379	
25	114,7	2401	
32	113,7	2421	
40	113,2	2433	
50	112,8	2441	
64	112,6	2446	
80	112,4	2449	
100	112,3	2453	

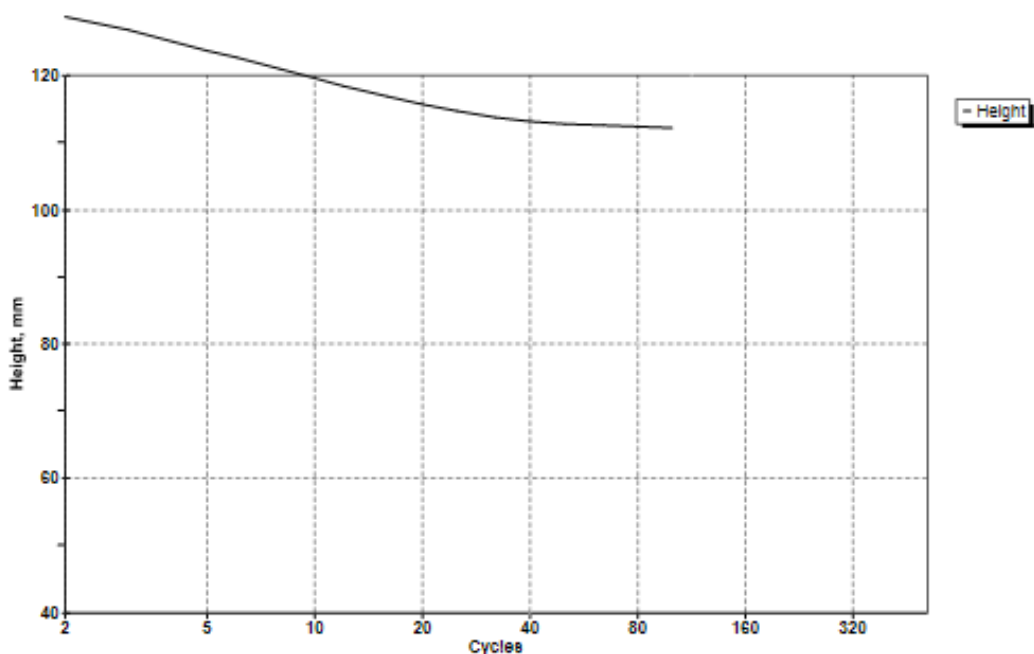


Figura V 5 Método Volumétrico – Provete 3.2

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 02.07.2014 FROM FILE 3.3.txt

02.07.2014	SAMPLE WEIGHT	4775	g
12:00	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 3	GYRATORY ANGLE	20,30	mrad
SAMPLE CODE 3.3	GYRATORY SPEED	29,6	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m3	SHEAR kN/m2
4	133,5	2025	
5	132,0	2048	
6	130,7	2067	
8	128,8	2099	
10	127,3	2123	
12	126,1	2144	
16	124,2	2176	
20	122,8	2201	
25	121,4	2227	
32	119,9	2254	
40	118,7	2276	
50	117,5	2300	
64	116,3	2324	
80	115,2	2346	
100	114,3	2365	

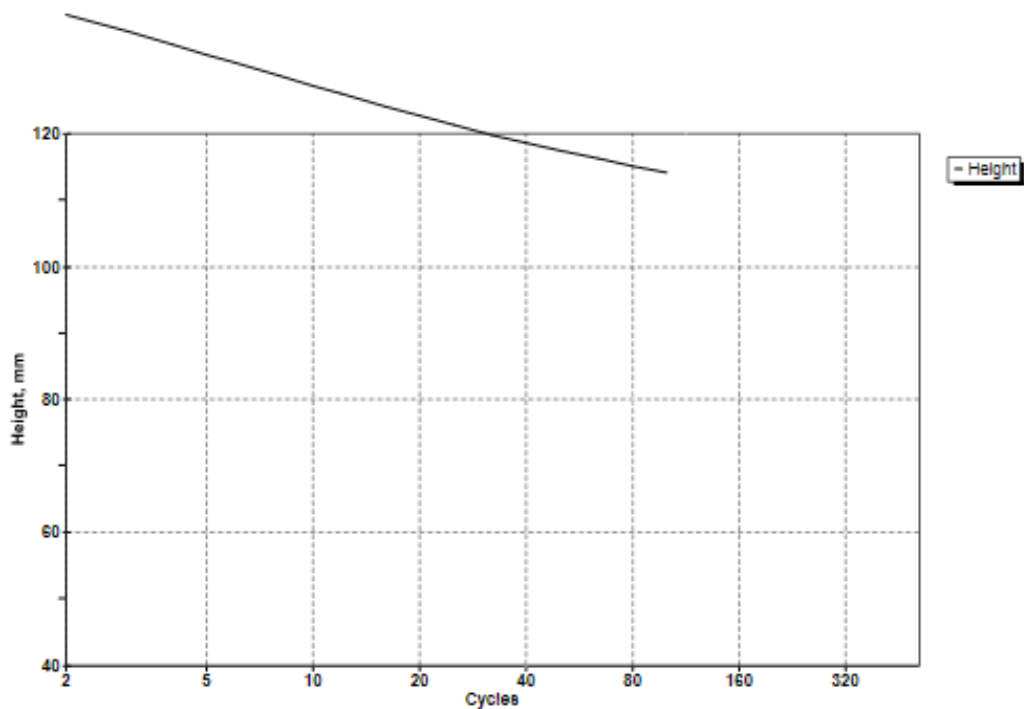


Figura V 6 Método Volumétrico – Proverte 3.3

V.4 Grupo 4 – Pb=6,0%

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 02.07.2014 FROM FILE 4.1.txt

02.07.2014	SAMPLE WEIGHT	4880	g
15:55	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 4	GYRATORY ANGLE	20,30	mrاد
SAMPLE CODE 4.1	GYRATORY SPEED	30,0	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m ³	SHEAR kN/m ²
4	130,8	2112	
5	129,4	2134	
6	128,3	2153	
8	126,5	2184	
10	125,0	2209	
12	123,9	2230	
16	122,1	2262	
20	120,8	2287	
25	119,5	2312	
32	118,1	2338	
40	117,0	2361	
50	116,0	2381	
64	115,4	2394	
80	115,2	2397	
100	115,1	2400	

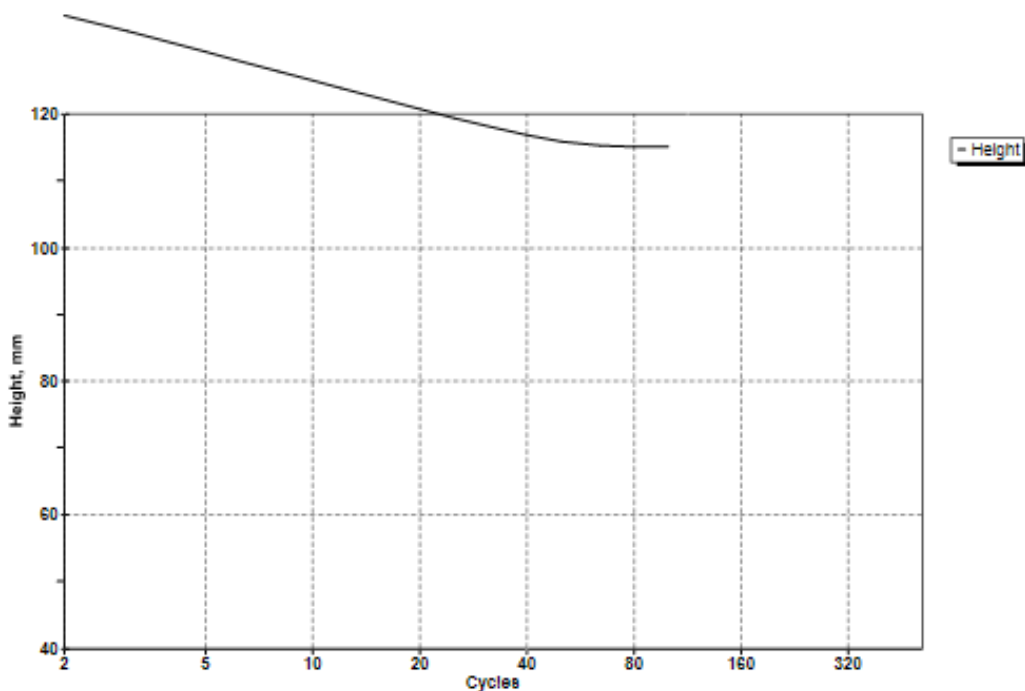


Figura V 7 Método Volumétrico – Provete 4.1

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 02.07.2014 FROM FILE 4.2.txt

02.07.2014	SAMPLE WEIGHT	4885	g
16:08	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 5	GYRATORY ANGLE	20,30	mrad
SAMPLE CODE4.2	GYRATORY SPEED	29,9	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m ³	SHEAR kN/m ²
4	129,5	2135	
5	128,0	2160	
6	126,9	2178	
8	125,2	2209	
10	123,8	2234	
12	122,7	2254	
16	120,9	2286	
20	119,7	2310	
25	118,4	2335	
32	117,2	2360	
40	116,3	2378	
50	115,7	2389	
64	115,5	2394	
80	115,4	2396	
100	115,2	2400	

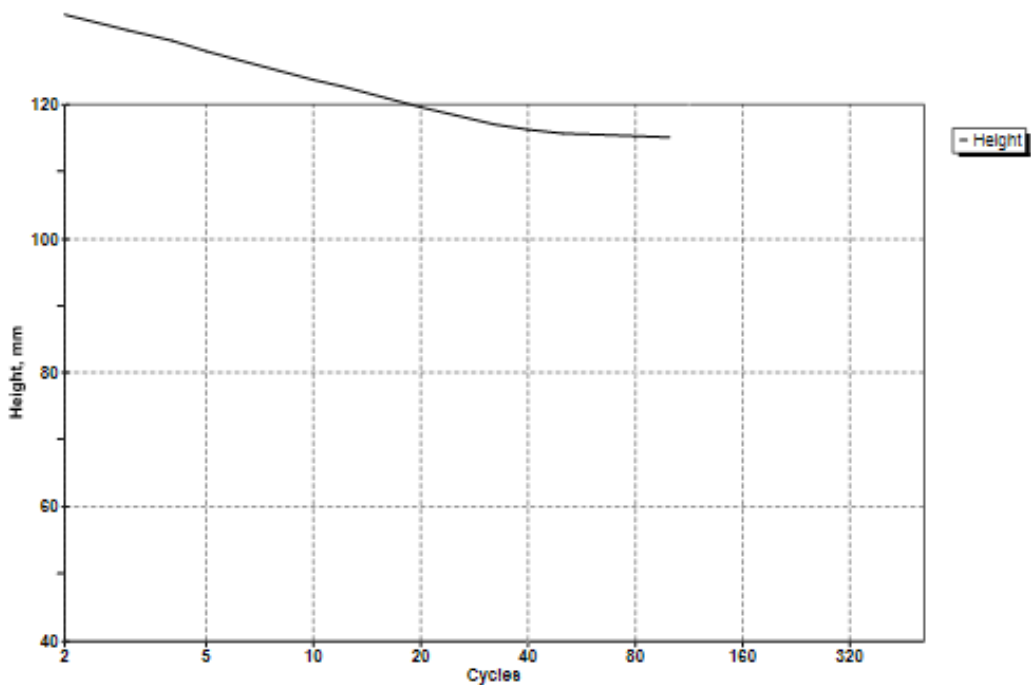


Figura V 8 Método Volumétrico – Provet 4.2

INTENSIVE COMPACTION TESTING / ICT-150
 PRINTED 02.07.2014 FROM FILE 4.3.txt

02.07.2014	SAMPLE WEIGHT	4865	g
16:17	PRESSURE IN SAMPLE	600	kPa
TEST-ID 6	GYRATORY ANGLE	20,30	mrad
SAMPLE CODE4.3	GYRATORY SPEED	29,4	rpm

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m3	SHEAR kN/m2
4	135,4	2033	
5	134,0	2055	
6	132,7	2075	
8	130,8	2106	
10	129,3	2130	
12	128,1	2149	
16	126,3	2181	
20	124,9	2205	
25	123,5	2230	
32	122,0	2257	
40	120,8	2280	
50	119,6	2302	
64	118,4	2326	
80	117,4	2346	
100	116,4	2365	

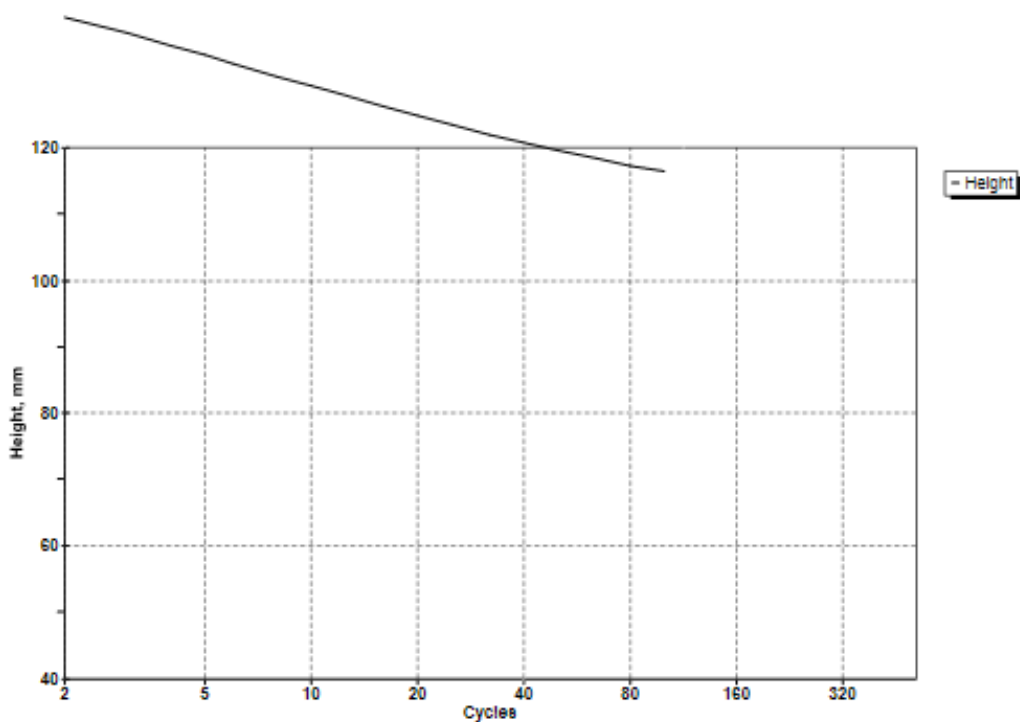




Figura V 9 Método Volumétrico – Provete 4.3

ANEXO I. Fichas De Produto

I.1 Pó 0/4

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

	1592 4 1592-CPD-1610	Designação Pó 0/4	Identificação do produto 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 ₂ 85	G _A 85 G _{Tc} 20	NA	G ₂ 85 GT _F 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 ₁₆
Equivalente de areia	SE ≥80%	NA	SE ≥80%	SE ≥80%
Azul de metileno	MB10	MB _F 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
Sulfatos 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	96% de calcário e 2% de calcite, com forma subprismático a subdiscoidal, muito anguloso a subarredondado de superfície rugosa/lisa.			

Observações:

* Ensaio realizado com o objectivo de caracterizar a rocha

** 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

Distribuição granulométrica

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



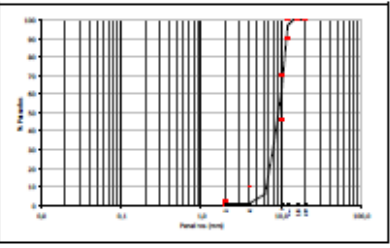
Utilização prevista	NP EN 12 620 - Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil
	NP EN 13 043 - Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas e outros trabalhos de engenharia civil
	NP EN 13 139 - Argamassas para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia 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	12-01-2011	Página	1/1
Filipa Gomes, Eng. ^a		Luis Lopes, Dr.					

Mod 161/2

Sede: Rua de Ansião, 3100-474 Pombal • Tel. 236 200 110 • Fax. 236 200 190
 www.grupojuliolopes.com • E-mail: iberobrita@grupojuliolopes.com
 Pedreira: Rua da 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 Póvoa do Varzim sob o nº 500 374 740 - Capital Social € 1.000.000 - Contribuinte nº 500 374 740


1.2 Agregado 4/12

		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) Granulometria		4/12 G _c 90-15 G ₁ 15	4/12 G _c 90-15 G _{20/15}	4/12 G _c 85-15 GT _c 20/15	
Forma das partículas Índice de achatamento Índice de forma		FI ₁₅ SI ₁₅	FI ₁₅ SI ₁₅	FI ₂₀ SI ₂₀	
Massa volúmica das partículas Material impermeável Partículas secas em estufa Partículas saturadas		2,62 ^{±0,05} Mg/m ³ 2,59 ^{±0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{±0,05} Mg/m ³	2,62 ^{±0,05} Mg/m ³ 2,59 ^{±0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{±0,05} Mg/m ³	2,62 ^{±0,05} Mg/m ³ 2,59 ^{±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 Equivalente de areia Azul de metileno		F _{1,5} NA NA	f ₁ NA NA	f ₁ NA NA	
Percentagem de partículas britadas		NA	C _{100/0}	C _{90/0}	
Resistência à fragmentação *		LA ₂₀	LA ₂₀	LA ₂₀	
Resistência ao polimento/abrasão/degaste Coeficiente de polimento acelerado * Resistência ao desgaste do agregado grosso *		PSV ₃₀ M ₁₀ 10	PSV ₃₀ M ₁₀ 10	NA M ₁₀ 20	
Composição/teor Cloretos solúveis * Teor de húmus * ** Retracção por secagem * Contaminantes orgânicos leves * Sulfatos solúveis em ácido * Enxofre total *		0,009% Mais clara 0,027% NA AS _{0,2} <1 %	NA NA NA m _{1,25} 0,10% NA NA	NA NA NA NA AS _{0,2} S ₁	
Durabilidade face ao gelo-degelo *		MS ₂₈	MS ₂₈	MS ₂₈	
Descrição petrográfica *		Rocha metamórfica – Gnaiss. Estrutura bandada gnaissica com textura granoblástica. Sá a pouco alterada com superfície áspera e baixa porosidade.			
		DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA			
		Peneiras (mm)	Valores Típicos (% passados)	Límites Min./Max. (% passados)	Límites Min./Max. (% passados)
		20	100	100	100
		16	100	98 a 100	98 a 100
		12	97	90 a 100	85 a 100
		10	61	46 a 70	46 a 76
		4	1	0 a 15	0 a 15
		2	1	0 a 5	0 a 5
<small> DW5 – Desempenho não determinado NA – Característica não aplicável ao agregado ou à forma de aplicação NR – Propriedade não requerida * Ensayo efectuado no mesmo produto de mesma origem ** Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus </small>					

APROVADO:

Rui Régio

1.3 Agregado 8/20

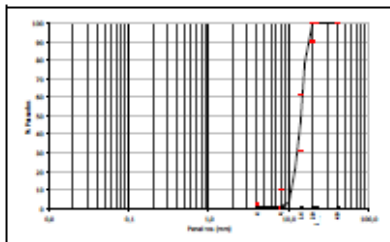
 IRMÃOS CAVACO, S.A.	Ficha Técnica do Produto	DQ.ES.004/6 09-02-2011 Página 1 de 1
---	---------------------------------	--

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: 8/20
--	----------------------

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)	8/20	8/20	8/20
Granulometria	G _c 90-15 G ₁₅	G _c 90-10 G _{25/15}	G _c 85-15 GT _c 20/15
Forma das partículas			
Índice de achatamento	F ₁₅	F ₁₅	F ₂₀
Índice de forma	S ₁₅	S ₁₅	S ₂₀
Massa volúmica das partículas			
Material impermeável	2,63 ^{+0,05} Mg/m ³	2,63 ^{+0,05} Mg/m ³	2,63 ^{+0,05} Mg/m ³
Partículas secas em estufa	2,61 ^{+0,05} Mg/m ³	2,61 ^{+0,05} Mg/m ³	2,61 ^{+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	0,5 ^{+0,1} %	0,5 ^{+0,1} %	0,5 ^{+0,1} %
Baridade	1,37 ^{+0,1} Mg/m ³	1,37 ^{+0,1} Mg/m ³	1,37 ^{+0,1} Mg/m ³
Limpeza			
Teor em finos	f _{2,5}	f ₂	f ₂
Equivalente de areia	NA	NA	NA
Azul de metileno	NA	NA	NA
Porcentagem de partículas britadas	NA	C _{100/0}	C _{90/0}
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 ₁₀₀ 10	M ₁₀₀ 10	M ₁₀₀ 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 *	<i>Rocha metamórfica – Gnaiss. Estrutura bandada gnaissica com textura granoblástica. Sá a pouco alterada com superfície áspera e baixa porosidade.</i>		



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA				
Peneiros	Valores Típicos	Limites	Limites	Limites
(mm)	(% passados)	Min./Max.	Min./Max.	Min./Max.
		(% passados)	(% passados)	(% passados)
40	100	100	100	100
22,4	100	98 a 100	100	98 a 100
20	100	90 a 100	90 a 100	85 a 100
14	46	31 a 61	31 a 61	31 a 61
8	1	0 a 15	0 a 10	0 a 15
4	1	0 a 5	0 a 2	0 a 5

DNV – Desempenho não determinado Nil – Característica não aplicável ao agregado ou à norma de aplicação NR – Propriedade não requerida
 * Fissão encucada sobre produto de mesma origem ** Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus

APROVADO: 
 Rui Régio

I.4 Filer



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
Sílica 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	%

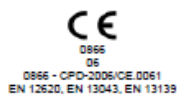
DADOS GERAIS DO PRODUTO

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

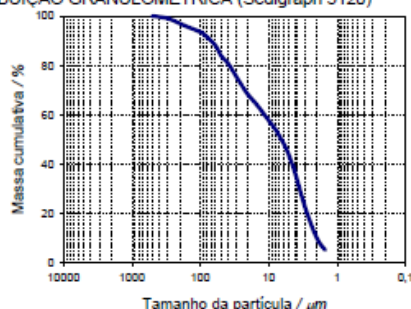
APLICAÇÕES

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

EMBALAGEM
 - GRANEL



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 à 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 à 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
 PRODINFO : PTOU
 I71710_01_PT
 versão : 002

I.5 Betume 35/50



Boletim de Análise

Fabricado em:	R. CORUÑA Betun BENS S/N 15008 CORUÑA (A) (Coruña (La))	Produto:	Betume 35/50 Granel
Cliente:	CONTEC-CONSTRUCAO E ENGENHARIA S.A. IC 8 - ABILUL 3100- POMBAL Portalegre(PT)	Data de fabrico:	01/09/2014
Código:		Data de validade:	01/09/2016
Referência cliente:	email 5.9.14	No do Certificado:	0000001807
		Tanque:	5312
		No da amostra:	201366518
		Especificação:	NES01

Encomenda:	000000170542424	Quantidade:	25780 KGS
Guia de remessa:	2014 - 1021918	No de Embalagens:	Granel
Registro de tanque:	R3678BCM	Peso Líquido por embalagem	N/A

Características	Unidade	Método	Resultado
CANTIDAD	-	UNE-EN_1425	LITRO
EMBALAJE	-	UNE-EN_1425	LATA
ETIQUETADO	-	UNE-EN_1425	CORRECTO
ASPECTO SUPERFICIE	-	UNE-EN_1425	BRILLANTE
SUSTANCIAS EXTRAÑAS	-	UNE-EN_1425	EXENTO
CONSISTENCIA	-	UNE-EN_1425	LIQUIDA
OLOR	-	UNE-EN_1425	CARACTERISTICO
PENETRACION A 25C	0,1mm	UNE-EN_1426	38
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	C	UNE-EN_1427	56.0
PUNTO DE INFLAMACION	C	UNE-EN_ISO_259	> 250
SOLUBILIDAD EN TOLUENO	%P	UNE-EN_12592	99.8
INDICE DE PENETRACION	-	UNE-EN_12591	-0.4
PUNTO DE FRAGILIDAD FRAAS	C	UNE-EN_12593	-11
VARIACION DE MASA	%P	UNE-EN_12607-1	-0.01
PENETRACION RETENIDA	%	UNE-EN_1426	66
AUMENTO PTO. REBLANDECIMI	C	UNE-EN_1427	8.2
DENSIDAD RELATIVA A 25C	-	UNE-EN_15326	1.040
VISCOSIDAD A 135C	mm ² /s	INTERNA	752.1

NOTAS

(*) Indica o valor é: PENTANOS para ISOBUTANE; SUPERIORES A C4 para PROPEL-45.
 (**) Indica o valor é: INSATURADOS para ISOBUTANE e PROPEL-45.

Requisitos especiais clientes

--

Observações

--

CORUÑA (A), segunda-feira, 8 de Setembro de 2014

Chefe do Laboratório





DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

DOP0001

Betume de pavimentação 35/50

1. Código de identificação do produto: 50011

2. Uso previsto de acordo com a norma EN 12591:2009:

Para a construção e manutenção de estradas, aeroportos e outras áreas pavimentadas.

3. Nome e endereço do fabricante:

*Repsol Lubricantes y Especialidades, S.A.
Calle Méndez Álvaro 44. CP 28045. Madrid. Espanha.*

4. Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho:

Sistema 2+

5. Organismo notificado:

Lloyd's Register Verification Limited, N°0038, realizou a avaliação e verificação da regularidade pelo Sistema 2+ e emitiu o Certificado de Conformidade do Controlo de Produção em Fábrica, N° 0038/CPR/MAD/20130014/C, sobre a base de:

- a inspeção inicial da unidade de produção e do controlo de produção em fábrica.
- a vigilância, avaliação e supervisão permanentes do controlo de produção em fábrica.

Confidencial

CONFIDENCIAL

Este documento é propriedade da Repsol Lubricantes y Especialidades S.A., o recetor do mesmo é responsável da custódia e uso adequado que se dê ao mesmo, já que seu conteúdo é CONFIDENCIAL. O documento não deverá ser reproduzido total o parcialmente e/ou revelado a pessoas não autorizadas ou enviado fora da Repsol Lubricantes y Especialidades S.A. sem a devida autorização por escrito dos seus representantes legais.

DOP0001 35/50
Ed.1 Julho 2013

Página 1 de 2



6. Desempenho declarado:

CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS	DESEMPENHO	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS HARMONIZADAS
Consistência a temperaturas de serviço intermédias <i>Penetração (0,1 mm)</i>	35-50	EN 12591:2009 EN 1426
Consistência a temperaturas de serviço elevadas <i>Temperatura de Amolecimento (°C)</i>	50-58	EN 12591:2009 EN 1427
Fragilidade a baixa temperatura de serviço <i>Ponto de Fragilidade Fraass (°C)</i>	≤-5	EN 12591:2009 EN 12593
Dependência da consistência com a temperatura <i>Índice Penetração</i>	-1,5 a +0,7	EN 12591:2009 Anexo A
Durabilidade da consistência a temperaturas de serviço intermédias - Resistência ao envelhecimento <i>Penetração retida (%)</i>	≥53	EN 12591:2009 EN 12607-1
Durabilidade da consistência a temperaturas de serviço elevadas - Resistência ao envelhecimento <i>Incremento Temperatura de Amolecimento (°C)</i>	≤8	EN 12591:2009 EN 12607-1
Viscosidade cinemática a 135°C (mm ² /s)	≥370	EN 12591:2009 EN 12595
Substâncias perigosas regulamentadas	NPD	EN 12591:2009

7. O desempenho do produto identificado no ponto 1 está conforme com o desempenho declarado no ponto 6.

A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 3.

Madrid, 01 de Julho de 2013

Assinado por e em nome do fabricante:

Pablo Sevillano Hidalgo.

Gerente de Segurança, Meio Ambiente e Qualidade.

Confidencial

CONFIDENCIAL

Página 2 de 2

Este documento é propriedade da Repsol Lubricantes y Especialidades S.A., o recetor do mesmo é responsável da custódia e uso adequado que se dê ao mesmo, já que seu conteúdo é CONFIDENCIAL. O documento não deverá ser reproduzido total o parcialmente e/ou revelado a pessoas não autorizadas ou enviado fora da Repsol Lubricantes y Especialidades S.A. sem a devida autorização por escrito dos seus representantes legais.

DOP0001 35/50
Ed.1 Julho 2013