



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente

Dinis Correia Gardete

Orientação:
Prof. Doutor Luís de Picado Santos

Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra,
como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Rodoviária

Coimbra, Fevereiro de 2006

A Memória de Meu Pai

RESUMO

Os pavimentos rodoviários representam um importante e valioso património, a sua gestão e manutenção exige a implementação de estratégias mais exigentes e criteriosas. Uma patologia que contribui para a degradação dos pavimentos rodoviários é a formação de rodeiras devido à deformação permanente das camadas betuminosas.

As causas de formação de rodeiras devido à deformação permanente em misturas betuminosas têm vindo a agravar-se, esperando-se que os insucessos relacionados com esta patologia venham a aumentar. A introdução de novos métodos de formulação e avaliação do desempenho de misturas betuminosas, nomeadamente à deformação permanente apresenta-se como um imperativo.

As normas europeias já incluem ensaios laboratoriais com esse objectivo, como sejam, os ensaios de simulador de tráfego em laboratório (wheel tracking), o de compressão uniaxial cíclico e o triaxial cíclico. Neste trabalho, faz-se a comparação dos resultados obtidos utilizando os ensaios referidos e o ensaio de corte a altura constante.

Foi utilizada uma mistura betuminosa de uso corrente em Portugal ensaiando-se provetes produzidos em laboratório e recolhidos em obra. São analisadas as condições e procedimentos de ensaio e determinados os diferentes parâmetros, que para cada ensaio, permitem caracterizar as misturas betuminosas à deformação permanente. Os resultados obtidos mostram que os ensaios utilizados apresentam potencial para a caracterização à deformação permanente. Foi possível caracterizar de forma eficaz os provetes de laboratório e de obra.

Finalmente, decorreu duma análise comparativa que estes ensaios apresentam resultados de qualidade similar, evidenciando boa sensibilidade e potencial para serem usados em Portugal. Os resultados obtidos indicam ainda como vantajosa a utilização de ensaios de caracterização mais simples, como o de simulador de tráfego em laboratório (wheel tracking) e o de compressão uniaxial cíclico. Estes permitem obter, como sublinhado, resultados de qualidade análoga mas de forma menos onerosa.

ABSTRACT

The management and maintenance of road pavements demands the implementation of more and more accurate and efficient strategies. Permanent deformation of the bituminous mixtures is one of the most common pathologies that can contribute to the degradation of road pavements.

The factors that contribute to the permanent deformation of bituminous mixtures have increased, and it's expected that the failures due to this pathology will increase in a near future. New formulation and performance characterization methods, in particular to permanent deformation, should be used.

The new European standards include some test with that particular objective. These tests are the wheel tracking, the uniaxial cyclic compression test (dynamic creep) and the cyclic triaxial test. In this work the results of these tests and the repeated shear at constant height test are compared.

A typical Portuguese bituminous mixture was used; laboratory made samples and samples cored from a pavement were tested. The tests procedures and conditions are analyzed regarding the results obtained. The different parameters that can be obtained from the results of different tests are calculated. The results show that the tests can be used to characterize bituminous mixtures to permanent deformation. This was true for both laboratory and cored specimens.

Finally, similar results were obtained with the different tests. All tests have shown good sensibility and potential to be used for permanent deformation characterization in Portugal. It can also be stressed that the use of simpler tests, like the wheel tracking and the uniaxial cyclic compression tests, is more interesting they are less time consuming and expensive.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor Luís de Picado Santos pelo seu apoio sem o qual este trabalho não teria sido possível.

A todos os membros do GIV e em particular à Prof. Rosa Luzia, Prof. Silvino Capitão e Prof. António Baptista pela sua ajuda e sabedoria com a qual foi possível ultrapassar muitas encruzilhadas.

À LUSOS CUT, Rosas Construtores e em especial ao Eng.º Luís Trabulo pela disponibilização dos materiais indispensáveis a este trabalho.

Ao Celestino Marques por todo o trabalho e dedicação.

À Universidade do Minho e em especial ao Prof. Doutor Paulo Pereira, Prof. Doutor Jorge Pais e ao Carlos Palha pela sua disponibilidade e cooperação na realização deste trabalho.

Ao Eng.º Mestre Fernando Martinho e Eng.º Luís Casaleiro pela sua amizade e incentivo.

Aos familiares e amigos por acreditarem.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Âmbito e Objectivos.....	1
1.2 Organização do Trabalho.....	3
2 COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS À DEFORMAÇÃO PERMANENTE	5
2.1 Formação de Rodeiras em Pavimentos Rodoviários Flexíveis	5
2.2 Descrição da Formação de Rodeiras	8
2.3 A Deformação Permanente em Misturas Betuminosas	9
2.4 Reologia das Misturas Betuminosas.....	14
2.5 Modelos Reológicos	16
2.6 Factores que Afectam a Deformação Permanente.....	24
2.6.1 Tráfego	24
2.6.2 Temperatura.....	28
2.6.3 Quantidade e Características do Betume	29
2.6.4 Agregados.....	32
2.6.5 Compactação	33
2.7 Considerações Finais	37
2.8 Referências Bibliográficas.....	40
3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS À DEFORMAÇÃO PERMANENTE	45
3.1 Introdução.....	45
3.2 Ensaio Empíricos	47
3.2.1 Ensaio de Marshall	47
3.2.2 Ensaio de Hveem.....	48
3.3 Ensaio Fundamentais	49
3.3.1 Ensaio de Compressão Uniaxial	49
3.3.2 Ensaio de Compressão Triaxial	52
3.3.3 Ensaio de Compressão Diametral	53
3.3.4 Ensaio de Corte	55
3.3.5 Ensaio de Cilindro Oco	57
3.3.6 Ensaio de Simulação	59
3.4 Considerações Finais	65

3.5 Referências Bibliográficas	67
4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	71
4.1 Misturas Betuminosas Adoptadas no Trabalho	71
4.1.1 Agregados e Granulometria	72
4.2 Produção em Laboratório.....	76
4.3 Produção em Obra.....	77
4.4 Caracterização da Mistura Pelo Ensaio de Marshall.....	78
4.4.1 Fabrico dos Provetes	79
4.4.2 Resultados Obtidos no Ensaio Marshall	80
4.5 Ensaio de Wheel Tracking	81
4.5.1 Realização dos Provetes em Laboratório	81
4.5.2 Realização dos Provetes em Obra.....	83
4.5.3 Procedimentos de Ensaio	84
4.6 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico.....	86
4.6.1 Realização dos Provetes em Laboratório	86
4.6.2 Realização dos Provetes em Obra.....	88
4.6.3 Procedimentos de Ensaio	90
4.7 Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico	93
4.7.1 Realização dos Provetes em Laboratório	93
4.7.2 Realização dos Provetes em Obra.....	94
4.7.3 Procedimentos de Ensaio	95
4.8 Ensaio de Corte a Altura Constante (RSCH).....	100
4.8.1 Realização dos Provetes em Laboratório	101
4.8.2 Realização dos Provetes em Obra.....	105
4.8.3 Procedimentos de Ensaio	106
4.9 Referências Bibliográficas	109
5 ANÁLISE DE RESULTADOS	111
5.1 Wheel Traking.....	111
5.2 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico.....	116
5.3 Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico	124
5.4 Ensaio de Corte a Altura Constante	137
5.5 Comparação de Resultados	147
5.5.1 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico.....	148
5.5.2 Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico.....	149
5.5.3 Ensaio de Corte a Altura Constante	150
5.6 Considerações Finais.....	151
5.7 Referências Bibliográficas	156
6 CONCLUSÕES	157
6.1 Perspectivas Futuras.....	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquematização das diferentes causas de formação de rodeiras e a forma como afectam o pavimento (adaptado de NCHRP, 2002)	6
Figura 2.2 - Diferentes perfis transversais de rodeira associados à deformação permanente com origem em diferentes camadas (Fang <i>et al.</i> , 2004).....	7
Figura 2.3 - Representação esquemática das rodeiras causadas por deformações permanentes nas camadas granulares do pavimento (Santucci, 2001)	8
Figura 2.4 - Representação esquemática das rodeiras causadas por deformações permanentes nas camadas betuminosas do pavimento (Santucci, 2001).....	9
Figura 2.5 - Rodeiras por deformação permanente das misturas betuminosas no IC2	10
Figura 2.6 - Pavimento flexível com deformação ocorrida à superfície devido à deformação permanente das misturas betuminosas (NCHRP, 2002).....	11
Figura 2.7 - Aumento da deformação permanente com o número de carregamentos (Houben <i>et al.</i> , 1999).....	12
Figura 2.8 - Fases da evolução da deformação permanente em misturas betuminosas (Feire, 2002).....	13
Figura 2.9 - Resposta tensão-extensão de uma mistura betuminosa	15
Figura 2.10 - Acumulação de extensões permanentes de origem viscosa com a sucessiva aplicação de carregamentos	16
Figura 2.11 - Mola com comportamento elástico linear.....	17
Figura 2.12 - Amortecedor com comportamento viscoso de acordo com a lei de Newton.....	18
Figura 2.13 - Modelo de Maxwell para representação de um comportamento visco-elástico .	19
Figura 2.14 - Modelo de Kelvin para representação de um comportamento visco-elástico	19
Figura 2.15 - Modelo de Burgers para representação de um comportamento visco-elástico...	20
Figura 2.16 - Resposta do modelo de Burgers quando sujeito a um carregamento com tensão constante durante um determinado período de tempo	21
Figura 2.17 - Representação das diferentes componentes da deformação de misturas betuminosas e a sua tradução no modelo de Burgers	22
Figura 2.18 - Contribuição das diferentes componentes do modelo de Burgers para a extensão total (Antes <i>et al.</i> , 2003)	23
Figura 2.19 - Evolução da repartição modal do transporte de mercadorias na UE, previsão até 2030 (DG TREN, 2003)	25

Figura 2.20 - Repartição modal do transporte de mercadorias em diversos países da UE em 2002 (excepto transporte marítimo) (DG TREN, 2004).....	25
Figura 2.21 - Efeito do excesso de peso por eixo nos pavimentos, contribuição das diversas camadas para a profundidade de rodeira (Chen <i>et al.</i> , 2004).....	26
Figura 2.22 - Efeito na deformação permanente dos rodados simples de base larga e dos rodados duplos (Houben <i>et al.</i> , 1999).....	27
Figura 2.23 - Efeito da temperatura na deformação permanente em misturas betuminosas em ensaios triaxiais realizados a 40°C e 60°C (Sargand e Kim, 2003).....	28
Figura 2.24 - Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa com uma mesma granulometria (Erkens, 2002)	29
Figura 2.25 - Efeito da viscosidade do betume na profundidade de rodeira obtida no ensaio de wheel tracking (Barreno <i>et al.</i> , 2004)	30
Figura 2.26 - Evolução do endurecimento do betume com as diferentes fases da vida da mistura betuminosa (Shell, 2003)	31
Figura 2.27 - Correlação entre a textura do agregado determinada por análise de imagem e a deformação obtida no GLWT (Masad <i>et al.</i> , 2004).....	33
Figura 2.28 - Relação entre a tensão para uma extensão de 2% e a baridade da mistura (Santucci, 2001)	34
Figura 2.29 - Relação esquemática entre o volume de vazios e a velocidade de deformação da mistura (Austroads, 1999).....	34
Figura 2.30 - Relação entre o volume de vazios e a profundidade de rodeira, dados de campo (SHRP, 1994b).....	35
Figura 2.31 - Efeito do processo de compactação no comportamento de misturas betuminosas à deformação permanente (Khan <i>et al.</i> , 1998).....	36
Figura 3.1 - Equipamento para o ensaio de Marshall existente no Laboratório de pavimentos do DEC-FCTUC	47
Figura 3.2 - Ensaio de compressão uniaxial cíclico realizado no Laboratório de Pavimentos do DEC-FCTUC.	50
Figura 3.3 - Curva típica de deformação obtida em ensaios de compressão uniaxial cíclicos (CEN, 2001).....	51
Figura 3.4 - Equipamento para a realização de ensaios de compressão triaxial existente no Laboratório de Pavimentos do DEC-FCTUC	53
Figura 3.5 - Equipamento para realização de ensaios de tracção indirecta em misturas betuminosas (fabricante Instron Corporation)	54
Figura 3.6 - Esquema da instrumentação de um provete para o ensaio de corte a altura constante (Santucci, 2001)	56
Figura 3.7 - Evolução da extensão de corte permanente com o número de carregamentos no ensaio de corte a altura constante.....	57

Figura 3.8 - Rotação das tensões principais no pavimento quando da passagem de um rodado (Blajezowski <i>et al.</i> , 1996).....	58
Figura 3.9 - Exemplo de um provete para o ensaio do cilindro oco e dimensões utilizadas (TRB, 2004).....	58
Figura 3.10 - Curva obtida em ensaio com o equipamento de simulação de Hamburg (Yildirim e Kennedy, 2001).....	61
Figura 3.11 - Equipamento para a realização de ensaios de wheel tracking existente no Laboratório de Pavimentos do DEC-FCTUC.....	61
Figura 3.12 - Evolução do número de simuladores em escala real (ALT) na Europa (COST 347, 2002).....	65
Figura 3.13 - Exemplo de simuladores de pista (pode observar-se o Lintrack T. U. Delft, o Nordic-HVS e a pista de ensaios do LCPC).....	65
Figura 4.1 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico da mistura betuminosa e limites impostos pelo CE da JAE, actual E.P. E.P.E.....	74
Figura 4.2 - Realização dos troços experimentais nos estaleiros da Rosas Construtores.....	77
Figura 4.3 - Diferentes fases do ensaio Marshall	80
Figura 4.4 - Compactação dos provetes laje em laboratório para o ensaio de wheel tracking.	82
Figura 4.5 - Provette fabricado em laboratório em forma de laje com 305*305*80 mm para o ensaio de wheel tracking.....	82
Figura 4.6 - Rectificação das faces dos provetes laje de obra para o ensaio de wheel tracking	83
Figura 4.7 - Provette laje após realização do ensaio de wheel tracking	86
Figura 4.8 - Compactação em laboratório dos provetes para o ensaio de compressão uniaxial cíclico utilizando um equipamento de vibro-compactação tipo Kango	87
Figura 4.9 - Rectificação dos provetes para o ensaio de compressão uniaxial cíclico	87
Figura 4.10 - Carotagem dos provetes de obra para o ensaio de compressão uniaxial cíclico.	88
Figura 4.11- Provetes de obra do troço A-1 (Pb = 3,7%) para o ensaio de compressão uniaxial cíclico antes do corte e rectificação	89
Figura 4.12 - Provetes de obra do troço A-3 (Pb = 4,7%) para o ensaio de compressão uniaxial cíclico antes do corte e rectificação	89
Figura 4.13 - Corte da face inferior dos provetes para o ensaio de compressão uniaxial cíclico	90
Figura 4.14 - Representação de um ciclo de carregamento e resposta obtida em termos de deformação vertical no provete	92
Figura 4.15 - Equipamento para a realização do ensaio de compressão uniaxial cíclico.....	93
Figura 4.16 - Representação do carregamento cíclico sinusoidal (CEN, 2001).....	95
Figura 4.17 - Representação do carregamento cíclico rectangular com repouso (CEN, 2001)	96

Figura 4.18 - Diferentes configurações para os equipamentos de ensaios de compressão triaxial cíclicos(CEN, 2001)	97
Figura 4.19 - Colocação de uma resistência eléctrica envolvendo a câmara triaxial para controlo da temperatura de ensaio	98
Figura 4.20 - Diferentes fases da preparação do ensaio triaxial.	99
Figura 4.21 - Provete da série LC para o ensaio de corte a altura constante	101
Figura 4.22 - Compactação de provetes da série PC para o ensaio de corte a altura constante	102
Figura 4.23 - Compactação e aspecto dos provetes da série VA para o ensaio de corte a altura constante.....	103
Figura 4.24 - Provete recolhido em obra para o ensaio de corte a altura constante.....	105
Figura 4.25 - Colagem do provete às placas de aplicação da carga.....	107
Figura 4.26 - Colocação dos LVDT's para o ensaio de corte a altura constante	107
Figura 4.27 - Equipamento para a realização do ensaio de corte a altura constante do Laboratório de Engenharia Civil da UM.....	108
Figura 5.1 - Relação entre o tempo de ensaio e a deformação vertical média obtida para as séries de provetes de laboratório.....	112
Figura 5.2 - Relação entre o tempo de ensaio e a deformação vertical média obtida para as séries de provetes de obra	112
Figura 5.3 - Relação entre a deformação R_{Dm} e a percentagem em betume	114
Figura 5.4 - Relação entre a velocidade de deformação TR_m e a percentagem em betume .	115
Figura 5.5 - Exemplo de segregação num provete de obra.....	116
Figura 5.6 - Curvas de deformação médias obtidas no ensaio de compressão uniaxial cíclico para as séries de provetes de laboratório.....	117
Figura 5.7 - Curvas de deformação médias obtidas no ensaio de compressão uniaxial cíclico para as séries de provetes de obra	117
Figura 5.8 - Valores da extensão permanente acumulada, ϵ_{3600} , obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico	121
Figura 5.9 - Valores da velocidade de deformação, f , obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico	121
Figura 5.10 - Valores do módulo de fluência, S_N , obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico.....	121
Figura 5.11 - Valores do módulo resiliente, E_r , obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico.....	122
Figura 5.12 - Representação esquemática da evolução da deformação num ensaio de compressão uniaxial cíclico	123
Figura 5.13 - Evolução da tensão e extensão num ciclo de carregamento.....	124
Figura 5.14 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de laboratório para o nível de tensão $\sigma_1=150$ kPa e $\sigma_3=50$ kPa	125

Figura 5.15 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de laboratório para o nível de tensão $\sigma_1=300$ kPa e $\sigma_3=100$ kPa.....	125
Figura 5.16 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de laboratório para o nível de tensão $\sigma_1=600$ kPa e $\sigma_3=200$ kPa.....	125
Figura 5.17 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de obra para o nível de tensão $\sigma_1=150$ kPa e $\sigma_3=50$ kPa	126
Figura 5.18 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de obra para o nível de tensão $\sigma_1=300$ kPa e $\sigma_3=100$ kPa	126
Figura 5.19 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de obra para o nível de tensão $\sigma_1=600$ kPa e $\sigma_3=200$ kPa	126
Figura 5.20 - Extensões axiais permanentes, ϵ_{3600} , obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico	133
Figura 5.21 - Velocidades de deformação, f , obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico	133
Figura 5.22 - Módulos de fluência, S_N , obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclico.....	134
Figura 5.23 - Módulos resilientes, E_r , obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclico	134
Figura 5.24 - Valor do parâmetro B obtido no ensaio de compressão triaxial cíclico	135
Figura 5.25 - Valor do parâmetro $\epsilon_{1000,calc}$ obtido no ensaio de compressão triaxial cíclico ..	136
Figura 5.26 - Curvas de deformação médias obtidas no ensaio de corte a altura constante para as séries de provetes de laboratório	137
Figura 5.27 - Curvas de deformação médias obtidas no ensaio de corte a altura constante para os provetes de obra	138
Figura 5.28 - Diagramas que permitem avaliar a profundidade de rodeira com base nos resultados do ensaio de corte a altura constante (SHRP, 1994)	139
Figura 5.29 - Relação entre a resistência à deformação permanente, a percentagem em betume e o volume de vazios (SHRP, 1994).....	141
Figura 5.30 - Extensões de corte permanentes obtidas no ensaio de corte a altura constante	144
Figura 5.31 - Módulos de corte resilientes obtidos no ensaio de corte a altura constante	145
Figura 5.32 - N.º de ciclos até se obter uma extensão de corte de 4,545% e n.º de eixos padrão até se verificar uma profundidade de rodeira de 12,7 mm	145
Figura 5.33 - Velocidades de deformação obtidas no ensaio de corte a altura constante	146
Figura 5.34 - Relação entre a deformação total do ensaio de wheel tracking R_{DM} e a extensão axial permanente acumulada do ensaio de compressão uniaxial cíclico ϵ_{3600}	148
Figura 5.35 - Relação entre a velocidade de deformação do ensaio de wheel tracking TR_m , e a velocidade de deformação do ensaio de compressão uniaxial cíclico f	148
Figura 5.36 - Relação entre a deformação total do ensaio de wheel tracking, R_{DM} e extensão axial permanente acumulada do ensaio de compressão triaxial cíclico, ϵ_{3600}	149
Figura 5.37 - Relação entre a velocidade de deformação do ensaio de wheel tracking, TR_m e a velocidade de deformação do ensaio de compressão triaxial cíclico, f	150

Figura 5.38 - Relação entre a deformação total do ensaio de wheel tracking, R_{DM} e a extensão de corte permanente acumulada do ensaio de corte a altura constante, γ_{5000} 151

Figura 5.39 - Relação entre a velocidade de deformação do ensaio de wheel tracking, TR_m e a velocidade de deformação do ensaio de corte a altura constante..... 151

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Principais factores que afectam a deformação permanente em misturas betuminosas.....	36
Quadro 3.1 - Características dos ensaios mais utilizados para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente.....	66
Quadro 4.1 - Fuso granulométrico do macadame betuminoso fuso A conforme definido no Caderno de Encargos da JAE, actual E.P. E.P.E. (JAE, 1998).....	72
Quadro 4.2 - Granulometria dos agregados utilizados no fabrico da mistura betuminosa (percentagem de passados nos peneiros da série ASTM).....	73
Quadro 4.3 - Propriedades caracterizadas laboratorialmente para as diversas fracções granulométricas.....	74
Quadro 4.4 - Percentagem relativamente ao peso de cada fracção granulométrica na mistura de agregados.....	74
Quadro 4.5 - Percentagens de betume observadas nos troços experimentais e em obra.....	78
Quadro 4.6 - Propriedades dos provetes de laboratório para o ensaio de Marshall.....	79
Quadro 4.7 - Propriedades do provetes de obra para o ensaio de Marshall.....	79
Quadro 4.8 - Resultados obtidos no ensaio Marshall e resistência conservada.....	80
Quadro 4.9 - Características dos provetes realizados em laboratório para o ensaio de wheel tracking.....	83
Quadro 4.10 - Características dos provetes de wheel tracking de obra.....	84
Quadro 4.11 - Características dos provetes realizados em laboratório para o ensaio de compressão uniaxial cíclico.....	88
Quadro 4.12 - Características dos provetes de obra para o ensaio de compressão uniaxial cíclico.....	90
Quadro 4.13 - Propriedades dos provetes realizados em laboratório para o ensaio de compressão triaxial cíclico.....	94
Quadro 4.14 - Propriedades dos provetes de obra para o ensaio de compressão triaxial cíclico.....	95
Quadro 4.15 - Níveis de tensão utilizados no ensaio de compressão triaxial cíclico.....	98
Quadro 4.16 - Níveis de tensão de pré-carregamento utilizados no ensaio de compressão triaxial cíclico.....	100
Quadro 4.17 - Características dos provetes da série LC para o ensaio de corte a altura constante.....	102

Quadro 4.18 - Características dos provetes da série PC para o ensaio de corte a altura constante.....	103
Quadro 4.19 - Características dos provetes da série VA para o ensaio de corte a altura constante.....	104
Quadro 4.20 - Características dos provetes da série VB para o ensaio de corte a altura constante.....	104
Quadro 4.21 - Características dos provetes de obra (série A) para o ensaio de corte a altura constante.....	106
Quadro 5.1- Resultados obtidos no ensaio de wheel tracking para os provetes fabricados em laboratório.....	114
Quadro 5.2 - Resultados obtidos no ensaio de wheel tracking para os provetes recolhidos em obra.....	114
Quadro 5.3 - Resultados obtidos para os provetes realizados no laboratório.....	119
Quadro 5.4 - Resultados obtidos para os provetes realizados em obra.....	120
Quadro 5.5 - Resultados médios obtidos nas séries de laboratório no ensaio de compressão uniaxial cíclico.....	120
Quadro 5.6 - Resultados médios obtidos nas séries de obra no ensaio de compressão uniaxial cíclico.....	120
Quadro 5.7 - Resultados para os provetes realizados em laboratório.....	130
Quadro 5.8 - Resultados para os provetes realizados em obra.....	131
Quadro 5.9 - Resultados obtidos em cada série de provetes realizados em laboratório no ensaio de compressão triaxial cíclico.....	131
Quadro 5.10 - Resultados obtidos em cada série de provetes realizados em obra no ensaio de compressão triaxial cíclico.....	132
Quadro 5.11 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série LC.....	142
Quadro 5.12 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série PC.....	142
Quadro 5.13 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série VA.....	142
Quadro 5.14 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série VB.....	143
Quadro 5.15 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série de obra.....	143
Quadro 5.16 - Resultados médios obtidos por série e por percentagem em betume.....	143

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a – constante

A – parâmetro obtido por regressão potência para o ensaio de compressão triaxial cíclico

A₁ – parâmetro obtido por regressão linear para o ensaio de compressão triaxial cíclico

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AFNOR – Association Française de Normalisation

AI – Asphalt Institute

ALF – Accelerated Loading Facility

ALT - Accelerated Load Testing

APA – Asphalt Pavement Analyser

APT - Accelerated Pavement Testing

ASTM – American Society For Testing and Materials

b – constante

B – parâmetro obtido por regressão potência no ensaio de compressão triaxial cíclico

B₁ – parâmetro obtido por regressão linear para o ensaio de compressão triaxial cíclico

BS – British Standard

CBR – California Bearing Ratio

CE – Caderno de Encargos

CEN – Comité Europeu de Normalização

DEC – Departamento de Engenharia Civil

d_i – dimensão da malha do peneiro i

D_{max} – dimensão máxima do agregado

DART – Danish Asphalt Rut Tester

E – módulo de elasticidade ou deformabilidade (símbolo genérico)

E_r – módulo de deformabilidade resiliente

EAPA – European Asphalt Pavement Association

E.P. E.P.E. – Estradas de Portugal, Entidade Pública Empresarial

ESAL – eixo padrão de 80 kN (nomenclatura EUA)

EUA – Estados Unidos da América

F – força (símbolo genérico)

f – velocidade de deformação ou taxa de fluência

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FHWA – Federal Highway Administration

Gr – módulo de corte resiliente
GWLТ – Georgia Loaded Wheel Tester
h – altura (símbolo genérico)
h₀ – altura inicial do provete
h_N – altura do provete no ciclo N
HWTD – Hamburg Wheel Tracking Device
HVS – Heavy Vehicle Simulator
IEP – Instituto das Estradas de Portugal
JAE – Junta Autónoma de Estradas
LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEC E – Especificação do LNEC
LVDT – Linear Variable Differential Transducer
K – módulo de riqueza em betume
N – número de aplicações de carga
NAT – Nottingham Asphalt Tester
NCAT – National Centre for Asphalt Technology
NCHRP – National Cooperative Highway Research Program
NF – Norme Française
NP – Norma Portuguesa
MACOPAV – Manual de Dimensionamento de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional
p – pressão de contacto
PAV – Pressure Aging Vessel
Pb – percentagem de betume
pen₂₅ – penetração de um betume, determinada a 25°C
pen_{25r} – penetração de um betume recuperado, determinada a 25°C
PG – Performance Grade
PGC – Prensa Giratória de Corte
P_i – percentagem de material que passa no peneiro de malha di
prEN – pré-Norma Europeia
PURWheel – Purdue University Laboratory Wheel Tracking Device
R_D – deformação de rodeira no ensaio de wheel tracking
R_{Dm} – deformação de rodeira média no ensaio de wheel tracking
RLWT – Rotary Loaded Wheel Tester
RSCH – repetitive simple shear test at constant height
S_N – módulo de fluência
SHRP – Strategic Highway Research Program
SST – Superpave Shear Tester
SUPERPAVE – Superior Performance Pavement

T – temperatura (símbolo genérico)
t – tempo (símbolo genérico)
TAB – temperatura de amolecimento anel e bola de um betume
TABr – temperatura de amolecimento anel e bola de um betume recuperado
tb – teor em betume
tc – tempo de carregamento
TMD – tráfego médio diário anual
TR – Velocidade de deformação dos provetes no ensaio de wheel tracking
TR_m – Velocidade de deformação média dos provetes no ensaio de wheel tracking
UC – Universidade de Coimbra
UE – União Europeia
UM – Universidade do Minho
VMA – vazios na mistura de agregado no estado compactado
Vv – volume de vazios
WTR – velocidade de wheel tracking média (Mean Wheel Tracking Rate)

SÍMBOLOS GREGOS

γ – extensão de corte (símbolo genérico)

γ_p – extensão de corte permanente

γ_i – extensão de corte permanente acumulada no ciclo de carga i

δ – deslocamento ou deformação (símbolo genérico)

ε – extensão normal (símbolo genérico)

ε_i – deformação permanente ao fim de i ciclos de carga

$\varepsilon_{i,calc}$ – deformação permanente calculada ao fim de i ciclos de carga

ε_p – extensão vertical permanente

ε_N – extensão permanente acumulada do provete no final do ensaio.

η – coeficiente de viscosidade (símbolo genérico)

ρ – massa volúmica (símbolo genérico)

ρ_a – massa volúmica da mistura de agregados

σ – tensão normal

σ_1 – tensão normal axial

σ_3 – tensão normal lateral, referido à tensão de confinamento

σ_d – tensão desviante

σ_{PC} – tensão de pré-carregamento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Âmbito e Objectivos

Desde o século XIX que as misturas betuminosas são utilizadas como materiais de pavimentação. No início do século XX apareceram métodos empíricos para a sua formulação, como sejam, o ensaio de Hubbard-Field e o de Hveem. No início da II Guerra Mundial o Engenheiro Bruce Marshall desenvolveu o método mais divulgado para a formulação de misturas betuminosas e que tem o seu nome. Em Portugal, como em muitos outros países, este é ainda o método utilizado para a formulação de misturas betuminosas.

A melhor compreensão do comportamento das misturas betuminosas evidenciou as limitações destes métodos. Estes métodos, ao não permitirem simular o estado de tensão-deformação a que as misturas betuminosas estão sujeitas em serviço, não permitem avaliar correctamente o desempenho destas. Surgiu assim a necessidade de criar ensaios que avaliassem o desempenho de misturas betuminosas, nomeadamente, o seu desempenho à fadiga e à deformação permanente.

As causas de ruína dos pavimentos rodoviários consideradas geralmente em projecto são a fadiga e a deformação permanente. No entanto, a deformação permanente considerada é a total de todas as camadas do pavimento ligadas e não ligadas. Os métodos de dimensionamento utilizam para a sua previsão as características resistentes do solo de fundação. Deste modo não é considerada de forma explícita a deformação permanente das misturas betuminosas.

A deformação permanente em misturas betuminosas é uma degradação frequente de pavimentos rodoviários flexíveis mas para a qual ainda hoje não existem aplicadas metodologias que de uma forma cabal possam prevenir o seu aparecimento. Em Portugal, as temperaturas altas registadas no Verão, o aumento das cargas dos veículos pesados e da pressão de enchimento dos pneus constituem factores favoráveis ao aparecimento desta anomalia, prevendo-se que os insucessos relacionados com a deformação permanente das misturas betuminosas tenderão a agravar-se.

É fundamental conseguir avaliar a susceptibilidade das misturas betuminosas à deformação permanente. Nesta linha de pensamento foram aparecendo vários ensaios para esse fim, como sejam, o ensaio de compressão uniaxial cíclico, o ensaio de compressão triaxial cíclico, o ensaio de corte a altura constante e os ensaios de simulação de tráfego em laboratório.

Em diversos países a utilização destes ensaios para a caracterização à deformação permanente é cada vez mais corrente. Apesar da necessidade da introdução destes ensaios, em Portugal ainda não existe nenhum que seja utilizado correntemente na prática. As novas normas europeias incluem alguns destes ensaios pelo que se prevê que em breve estes possam ser utilizados em Portugal.

Para a utilização corrente destes ensaios em Portugal existem ainda obstáculos que devem ser ultrapassados, como sejam, a definição de procedimentos e condições de ensaio precisas e a definição de valores-limite para os resultados. Acresce o facto de não ser interessante do ponto de vista da uniformidade de procedimentos e inferências, usar na prática corrente ensaios diferentes cujo objectivo é único. Assim, torna-se importante estudar os ensaios e os seus resultados tendo em vista factores como a facilidade de realização, de aquisição do equipamento, de adequação à prática corrente no país, se os ensaios cumprem com os fins a que se destinam e verificar se podem ser utilizados como meios de análise da composição da mistura e de controlo da qualidade da colocação da mistura em obra.

Neste trabalho uma mistura tradicional e de utilização corrente foi submetida aos ensaios mais comuns destinados à caracterização da deformação permanente de misturas betuminosas. Os ensaios utilizados foram o de simulação em laboratório (wheel tracking), o de compressão uniaxial cíclico, o de compressão triaxial cíclico e o ensaio de corte a altura constante. Os três primeiros estão incluídos nas normas europeias, o último é utilizado essencialmente nos EUA, existindo já alguma experiência na sua utilização.

A mistura betuminosa utilizada foi um macadame betuminoso com a máxima dimensão de agregado de 25 mm. Esta é uma mistura de utilização muito comum em Portugal e que apresenta uma boa resistência à deformação permanente. Esta mistura é utilizada em camada de base e de regularização. As camadas de desgaste estão mais sujeitas às elevadas temperaturas e à acção do tráfego, sendo por isso importantes em termos da deformação permanente das misturas betuminosas no pavimento apesar da pequena espessura e portanto duma pequena potencial contribuição. Verifica-se também que as camadas subjacentes à camada de desgaste interessam ao fenómeno, podendo contribuir de forma apreciável para a deformação total do pavimento.

O objectivo deste trabalho é conhecer melhor os ensaios e avaliar as suas capacidades. Assim, foi escolhida uma mistura que fosse mais exigente em termos de ensaio. A escolha assentou em dois motivos: a caracterização deste tipo de mistura é importante pois é usada em camadas que estão imediatamente abaixo da camada de desgaste; a sua composição tem um esqueleto pétreo mais rígido, e portanto, mais exigente numa caracterização à deformação permanente. Assim, a utilização deste tipo de misturas permite analisar melhor as potencialidades e limitações dos ensaios utilizados.

Utilizaram-se três percentagens de betume, mantendo a mesma granulometria, pelo que foi possível obter misturas betuminosas com diferentes resistências à deformação permanente. Foram utilizados valores correntes de percentagem em betume, variando estes entre si apenas 0,5%. Do conhecimento existente sobre o comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas semelhantes, considerou-se o pressuposto de que misturas com maior percentagem em betume apresentariam um pior comportamento à deformação permanente.

Os provetes foram ensaiados utilizando as condições previstas nas normas. Para as normas que não apresentavam uma definição precisa dos procedimentos de ensaio, adoptaram-se, dentro dos intervalos aceitáveis, os parâmetros de ensaio que melhor representam as condições portuguesas.

Com base nos resultados obtidos é realizada uma análise sobre os ensaios, individualmente e comparativamente, permitindo avaliar a sua capacidade para caracterizar as misturas à deformação permanente. A adequação das condições de ensaio à prática portuguesa, a sensibilidade na distinção do comportamento de misturas, a facilidade e limitações na sua utilização, os parâmetros mais adequados para a caracterização à deformação permanente e potencialidade para introdução no mercado são outras questões analisadas neste trabalho com base nos resultados obtidos.

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho desenvolve-se para além deste em mais 5 capítulos que organizam a informação recolhida e as diferentes fases que foram necessárias para conclusão deste trabalho.

No Capítulo 2 faz-se uma revisão dos conhecimentos existentes sobre a deformação permanente em misturas betuminosas. Enquadra-se esta patologia nas degradações de pavimentos flexíveis e analisam-se as suas causas e consequências. Aborda-se o comportamento das misturas betuminosas e os diferentes factores que influenciam o seu comportamento e a forma como o fazem.

No Capítulo 3 apresentam-se os principais ensaios utilizados para a caracterização à deformação permanente de misturas betuminosas. Os ensaios são descritos sucintamente, analisando as suas origens e aplicação actual. Referem-se algumas vantagens e desvantagens dos diferentes ensaios usualmente utilizados para a caracterização à deformação permanente.

No Capítulo 4 são descritos com mais pormenor os ensaios utilizados neste trabalho. São descritos para cada ensaio o processo de fabrico de provetes em laboratório e em obra, as características do ensaio e os procedimentos adoptados para a sua realização.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos em cada ensaio, estes são analisados e comentados individualmente. Os resultados dos diferentes ensaios são depois comparados entre si observando-se a coerência dos valores obtidos. São discutidas ainda questões relacionadas com o fabrico dos provetes e complexidade da execução dos ensaios procurando apresentar as vantagens e desvantagens de cada um.

No Capítulo 6 resumem-se as principais conclusões que o trabalho permitiu obter e as suas implicações, perspectivando-se ainda as possibilidades e necessidades de futuros desenvolvimentos.

2 COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

2.1 Formação de Rodeiras em Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Os pavimentos flexíveis representam mais de 95% da rede rodoviária nacional. Pode assim inferir-se a importância que advém de se conhecer melhor o seu comportamento e quais as patologias que podem apresentar de forma a poder maximizar a sua vida útil e minimizar os insucessos.

Os pavimentos flexíveis podem apresentar uma variedade de degradações, as mais importantes podem agrupar-se da seguinte forma (Pereira e Miranda,1999):

- Deformações;
- Fendilhamento;
- Desagregação da camada de desgaste;
- Movimento de materiais.

Nas deformações que podem ocorrer num pavimento flexível podem distinguir-se, conforme a sua origem, as seguintes (Pereira e Miranda,1999):

- Abatimento (longitudinal, transversal);
- Ondulação;
- Deformações localizadas;
- Rodeiras.

As rodeiras formam-se devido às deformações permanentes que ocorrem nas diferentes camadas que constituem o pavimento, solo de fundação, camadas granulares e camadas betuminosas, podendo em países frios incluir-se o desgaste da superfície do pavimento ao longo da zona de passagem devido a veículos equipados com pneus de Inverno com pregos ou correntes de neve que são bastante agressivos para o pavimento (NCHRP, 2002).

Na Figura 2.1 pode observar-se uma esquematização das rodeiras conforme as suas causas.

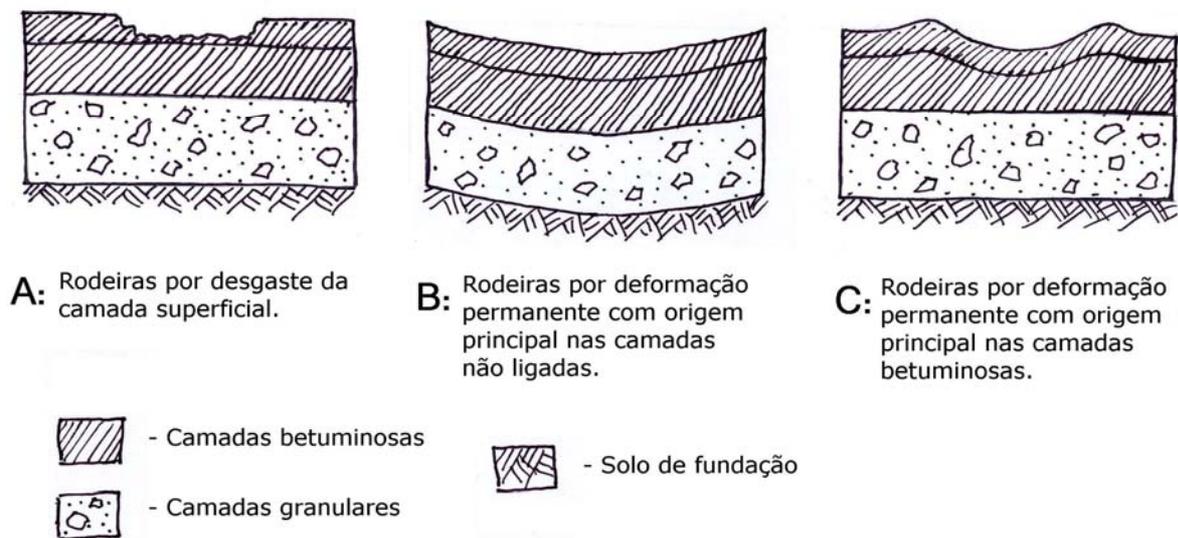


Figura 2.1 - Esquemática das diferentes causas de formação de rodeiras e a forma como afectam o pavimento (adaptado de NCHRP, 2002)

É igualmente possível ver na Figura 2.1 as camadas do pavimento que contribuem para as rodeiras.

No caso A: as rodeiras ocorrem devido à degradação da camada superficial do pavimento, contribuindo apenas esta camada para a formação das rodeiras. Este desgaste é originado principalmente pela utilização de correntes de neve ou pneus de gelo com pregos, pelo que, a sua ocorrência se restringe a países com clima mais frio. Em Portugal a formação deste tipo de rodeira é improvável, pelo que não será referida ao longo deste trabalho. A génese deste tipo de rodeiras também difere consideravelmente dos restantes pois não resulta de deformações das camadas mas do desgaste e desagregação da camada de desgaste na zona de passagem dos rodados.

No caso B: as rodeiras são causadas pela deformação do solo de fundação (podendo existir a contribuição de outras camadas granulares). Apesar da deformação do pavimento se poder dever essencialmente ao solo de fundação, mantendo as restantes camadas a sua espessura, estas vão-se deformar para acompanhar o movimento da fundação. Estas rodeiras são caracterizadas por terem grande raio.

No caso C: as rodeiras são causadas por deformação nas camadas betuminosas. Para esta deformação contribui essencialmente a camada superficial (Freire, 2002), podendo ainda existir deformação nas camadas betuminosas que se encontram sob esta. No entanto, a deformação nas camadas betuminosas acontece geralmente na parte superior do pavimento,

que é a zona mais sujeita às cargas circulantes e acções climatéricas desfavoráveis, nomeadamente, temperaturas elevadas. A formação deste tipo de rodeiras é mais preocupante em países quentes como Portugal. Estas rodeiras são caracterizadas por terem pequeno raio e pela formação de umas pequenas elevações laterais que a acompanham.

As diferentes origens da deformação permanente resultam em perfis de rodeira diferentes. Têm-se estudado métodos para com base no perfil superficial transversal do pavimento se determinar qual a origem da deformação permanente, isto é, quais as camadas do pavimento que mais terão contribuído para a deformação verificada (NCHRP, 2002).



Figura 2.2 - Diferentes perfis transversais de rodeira associados à deformação permanente com origem em diferentes camadas (Fang *et al.*, 2004)

Na realidade, num pavimento todas as camadas podem contribuir em maior ou menor grau para a deformação total (Chen *et al.*, 2004). Assim, o perfil do pavimento poderá não coincidir com os perfis tipificados na Figura 2.2. No caso de insucessos graves, em que existam camadas cuja contribuição seja muito superior às restantes o perfil do pavimento estará mais próximo dos representados na Figura 2.2.

A formação de rodeiras por deformação permanente tem várias consequências, como seja a diminuição da segurança em tempo de chuva, pois dificulta a drenagem transversal. A acumulação de água nas rodeiras agrava os fenómenos de hidroplanagem. Esta questão é ainda mais agravada em países com climas frios onde no Inverno ocorra a formação de gelo. Além disso, mesmo em tempo seco a existência de rodeiras no pavimento torna a condução mais difícil e imprecisa aumentando as dificuldades dos condutores e diminuindo a sua comodidade e segurança.

Este trabalho irá centrar-se na deformação permanente das misturas betuminosas pelo que embora relevantes não serão desenvolvidas as outras causas de formação de rodeiras. A razão principal é porque não existem ainda metodologias implementadas que permitam obviar este fenómeno, esperando-se que em estradas com tráfego médio a elevado as misturas betuminosas serão responsáveis por uma percentagem significativa do cavado de rodeira (COST 333, 1999).

2.2 Descrição da Formação de Rodeiras

A deformação permanente total que ocorre num pavimento é a soma das deformações nas diferentes camadas que o constituem, ligadas ou não ligadas. Nas camadas não ligadas, a deformação permanente é produzida essencialmente pela ocorrência de tensões superiores às aconselháveis. Este facto pode dever-se a um dimensionamento inadequado do pavimento para o tráfego que o solicita ou a uma má avaliação da resistência dos materiais que constituem as camadas não ligadas do pavimento.

Problemas com a drenagem do pavimento e a infiltração de água nas camadas não ligadas reduzem a sua resistência, tornando-as mais vulneráveis às acções aplicadas. Este género de deformação encontra-se esquematizado na Figura 2.3.

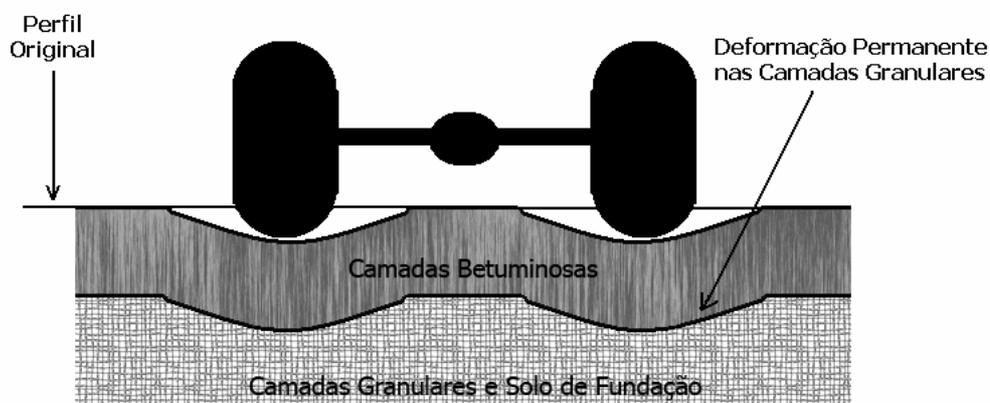


Figura 2.3 - Representação esquemática das rodeiras causadas por deformações permanentes nas camadas granulares do pavimento (Santucci, 2001)

Nas camadas ligadas, a deformação resulta de outros factores, como sejam, misturas betuminosas instáveis devido a uma deficiente composição, materiais inadequados, má execução ou camadas sujeitas a cargas de tráfego e temperaturas demasiado elevadas.

Outros factores contribuem ainda para a deformação destas camadas, como por exemplo, a velocidade do tráfego. Assim, em intersecções, subidas de grande inclinação e outros locais

com velocidades de circulação inferiores, é maior a probabilidade de ocorrência deste tipo de deformações.

A deformação permanente das misturas betuminosas provoca o aparecimento de deformações longitudinais na zona de passagem dos rodados dos veículos com elevações laterais. Na Figura 2.4 está representada a tipologia destas rodeiras.

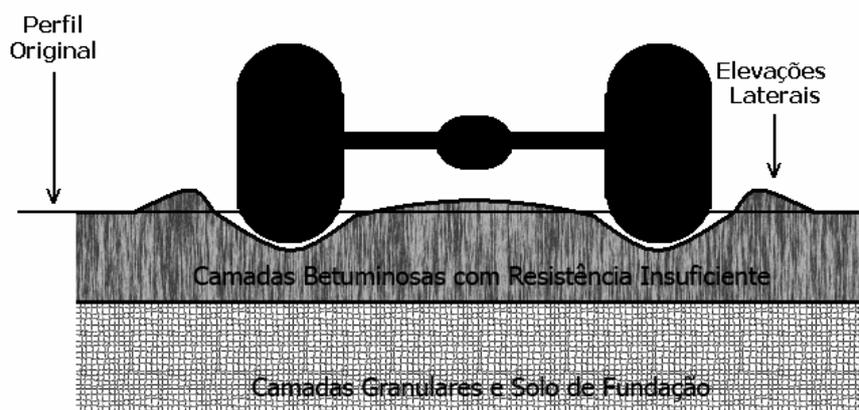


Figura 2.4 - Representação esquemática das rodeiras causadas por deformações permanentes nas camadas betuminosas do pavimento (Santucci, 2001)

As rodeiras formadas devido à deformação permanente das misturas betuminosas são actualmente objecto de alguma preocupação, pois os factores que levam à sua formação têm vindo a agravar-se. A espessura das camadas betuminosas tem vindo a aumentar nos pavimentos, nomeadamente na rede principal, devido ao aumento do tráfego de pesados. Na realidade a patologia de pavimentos mais preocupante no médio prazo na rede principal é a formação de rodeiras devido a deformação permanente nas camadas betuminosas (COST 333, 1999).

2.3 A Deformação Permanente em Misturas Betuminosas

Este trabalho elegeu como objectivo a deformação permanente das misturas betuminosas, focando especificamente esta causa de formação de rodeiras. Em Portugal existem alguns insucessos relacionados com a formação de rodeiras por deformações permanentes excessivas ocorridas nas misturas betuminosas. A Figura 2.24 mostra um exemplo ocorrido no IC2 em Condeixa.

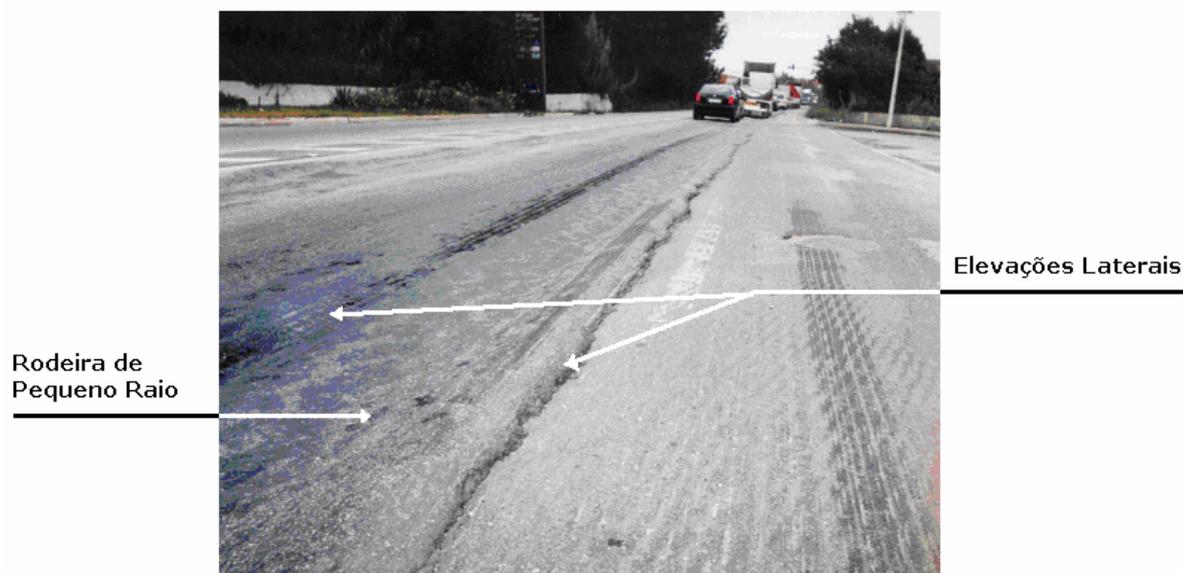


Figura 2.5 - Rodeiras por deformação permanente das misturas betuminosas no IC2

Na Figura 2.5 é visível a rodeira de pequeno raio e as elevações laterais à rodeira que indicam que a sua origem está relacionada com a deformação permanente nas camadas betuminosas. Este troço de pavimento é muito solicitado pelo tráfego, uma vez que a circulação é bastante canalizada, faz-se a velocidades reduzidas e tem um considerável número de veículos pesados. Estes factores têm um peso crucial para a formação deste tipo de rodeiras.

A Figura 2.6 mostra uma vala realizada num pavimento em que a deformação permanente ocorrida nas camadas betuminosas superiores é nítida. Pode observar-se que nas camadas betuminosas inferiores e solo de fundação as deformações são praticamente insignificantes quando comparadas com as ocorridas no topo do pavimento.

O comportamento de uma mistura betuminosa depende das proporções relativas dos seus componentes e das propriedades destes. Assim, o comportamento das misturas betuminosas relativamente à deformação permanente depende dos seguintes factores (Pereira e Picado Santos, 2002):

- propriedades dos seus constituintes (agregado, betume e possíveis aditivos);
- composição da mistura betuminosa, isto é, das proporções de cada componente na mistura, bem como da compactação e processo de compactação;
- condições de serviço, como sejam, a temperatura (que afecta a viscosidade do betume), e as acções do tráfego (pressão dos pneus, tipo de rodado, distribuição lateral, etc).



Figura 2.6 - Pavimento flexível com deformação ocorrida à superfície devido à deformação permanente das misturas betuminosas (NCHRP, 2002)

A deformação permanente verificada numa camada betuminosa é o somatório de duas componentes. Por um lado a sobrecompactação (densificação) da camada, que provoca uma diminuição de vazios e um correspondente assentamento à superfície. Por outro lado, as deformações ocorridas por tensões de corte na camada betuminosa, devido aos efeitos das cargas do tráfego, que provocam essencialmente deformações a volume constante.

A contribuição de cada uma destas componentes depende de diversos factores, no entanto, o aparecimento de rodeiras por deformação permanente de misturas betuminosas resulta principalmente de deformações por corte (SHRP, 1994a). A contribuição relativa da deformação por corte é normalmente superior, especialmente em camadas betuminosas que apresentam valores elevados de deformação permanente. A densificação apenas apresenta uma contribuição relativa superior em pavimentos cuja compactação tenha sido insuficiente ou em pavimentos que apresentem valores de deformação permanente baixos (SHRP, 1994b).

Devido a estes factores, a deformação permanente ocorre na zona do pavimento onde se verificam as maiores temperaturas e as maiores tensões de compressão e de corte, ou seja na parte superior dos pavimentos. Alguns autores referem que as deformações permanentes nas misturas betuminosas devido às cargas de tráfego ocorrem essencialmente nos 10 cm superiores do pavimento (SHRP, 1994b).

Existe uma diferença temporal entre a ocorrência da contribuição por deformação por corte e por densificação. A densificação ocorre durante a fase inicial de serviço do pavimento, em que o abaixamento que ocorre na zona de passagem dos rodados é superior às elevações que ocorrem dos lados. Após esta fase inicial, são as deformações por corte que contribuem para a

deformação permanente. Nesta fase verifica-se que a um abaixamento na zona dos rodados corresponde um crescimento nas elevações laterais com praticamente o mesmo volume. Pode considerar-se que esta fase se prolonga durante toda a vida do pavimento, no entanto a formação de rodeiras devido a deformações permanentes em misturas betuminosas ocorre mais rapidamente no início da vida útil do pavimento, quando o betume ainda é jovem e em condições climatéricas de temperaturas elevadas.

Outra questão importante é a deformação permanente ir aumentando com o número de carregamentos, isto é, a deformação permanente aumenta com a quantidade de rodados que solicitam o pavimento (SHRP, 1994a). No entanto, a evolução da deformação permanente com o número de carregamentos é não linear, como se pode observar na Figura 2.7.

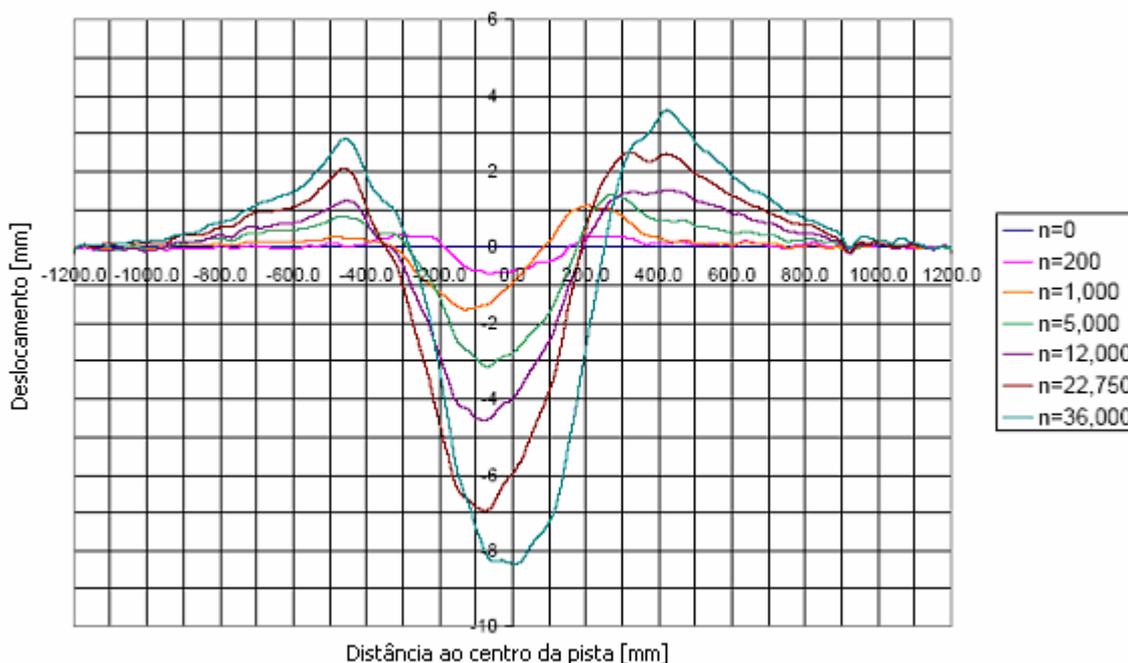


Figura 2.7 - Aumento da deformação permanente com o número de carregamentos (Houben *et al.*, 1999)

A evolução da deformação permanente em camadas betuminosas apresenta três fases características (Zhou *et al.*, 2004). Uma primeira fase em que o acréscimo de deformação por carregamento é elevado. Este comportamento deve-se à deformação verificada não ser só devido a deformação por tensões de corte mas também existir densificação na camada betuminosa. Esta densificação da mistura betuminosa aumenta a resistência à deformação permanente pois melhora os contactos entre os agregados. Esta densificação processa-se até a mistura ter resistência suficiente para suportar as cargas sem sofrer mais redução de volume, passando as deformações a ocorrer a volume constante.

Uma segunda fase em que o acréscimo de deformação permanente por carregamento é inferior ao da fase anterior e toma um valor quase constante. Nesta fase as deformações ocorrem a volume constante devido a tensões de corte. A deformação evolui de uma forma quase linear com o número de carregamentos durante esta fase.

Na terceira fase ocorre a designada rotura, em que o acréscimo de deformação por carregamento aumenta drasticamente entrando-se no domínio das grandes deformações por corte. Na Figura 2.8 representa-se a evolução típica da deformação permanente com a identificação das diferentes fases. Na prática é possível sob diversas condições que não ocorram uma ou mais fases.

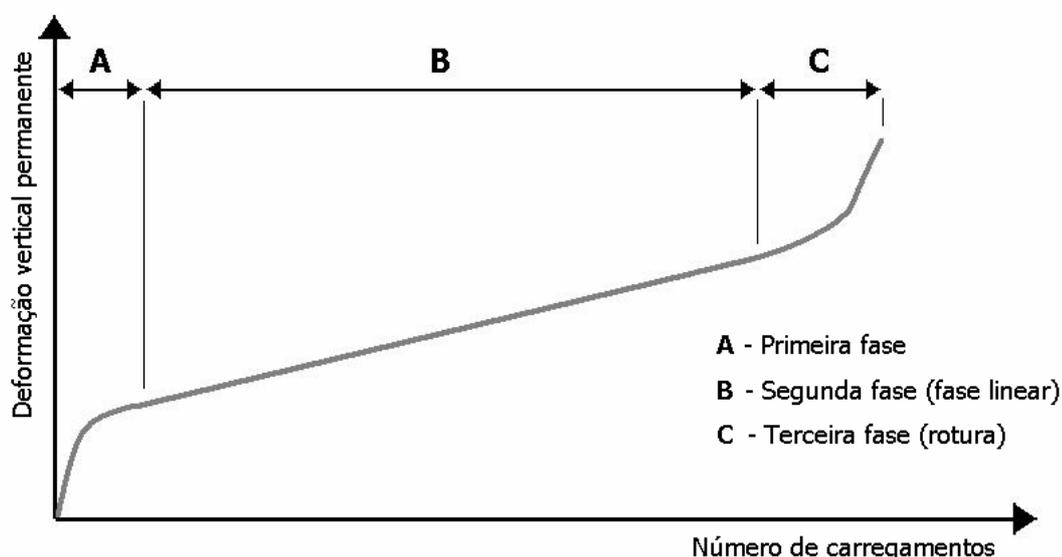


Figura 2.8 - Fases da evolução da deformação permanente em misturas betuminosas (Feire, 2002)

Este comportamento das misturas betuminosas é passível de ser observado em pavimentos e em ensaios laboratoriais. Assim, as curvas de deformação de misturas betuminosas obtidas em ensaios laboratoriais apresentam um andamento semelhante ao representado na Figura 2.8.

Pode dizer-se que são diversos os factores que influenciam a deformação permanente em camadas betuminosas:

- Excesso de ligante - tende a funcionar como um lubrificante facilitando o movimento relativo entre as partículas;
- Granulometria dos agregados - as misturas com agregados de maior dimensão e granulometria contínua apresentam melhor resistência à deformação permanente devido

a se conseguir um melhor contacto entre as partículas do agregado, oferecendo assim uma maior resistência.

- Agregados britados - as misturas com agregados britados são mais resistentes à deformação permanente do que as que utilizam agregados rolados, pois os agregados britados fornecem melhor resistência por atrito.
- Compactação insuficiente - se a camada apresentar uma porosidade muito superior à que se irá verificar a longo prazo as cargas do tráfego irão produzir assentamentos indesejáveis. Um maior esforço de compactação leva a um maior contacto entre as partículas do agregado ficando estas orientadas de forma a resistirem mais.
- Viscosidade do betume - o uso de betumes mais duros ou modificados aumenta a resistência à deformação permanente das misturas betuminosas.

Quando ocorre uma excessiva deformação permanente nas camadas betuminosas do pavimento é normal que isso aconteça nos primeiros anos de vida do pavimento, enquanto o betume é jovem, sendo por isso menos viscoso. Após o endurecimento do betume, devido à exposição a factores ambientais e por oxidação este apresenta maior viscosidade, tornando-se mais resistente à deformação permanente.

Para além das consequências óbvias que advêm do aparecimento de rodeiras por deformação permanente nas camadas betuminosas e que pode levar à saída de serviço do pavimento, acresce o facto deste fenómeno acontecer no princípio da vida útil deste. Assim, a percepção negativa dos utentes e as consequências para a administração poderão ser mais nefastas que as ocorridas devido a outro tipo de degradações que se manifestam passados mais anos de serviço. A caracterização das misturas betuminosa relativamente à sua resistência à deformação permanente assume-se assim de fundamental importância.

2.4 Reologia das Misturas Betuminosas

As misturas betuminosas apresentam uma natureza viscosa, pelo que, o seu comportamento depende de factores como sejam o tempo de carregamento e a temperatura. Na caracterização à deformação permanente interessam as gamas mais elevadas de temperaturas que ocorrem no pavimento, a estas temperaturas a componente viscosa do comportamento das misturas betuminosas assume maior relevo.

Para melhor compreender o comportamento das misturas betuminosas e o fenómeno da deformação permanente é fundamental observar como estas reagem quando solicitadas. Aplicando uma tensão constante, σ_0 , a uma mistura betuminosa durante um intervalo de tempo, Δt , esta irá apresentar uma deformação cujo andamento se encontra esquematizado na Figura 2.9.

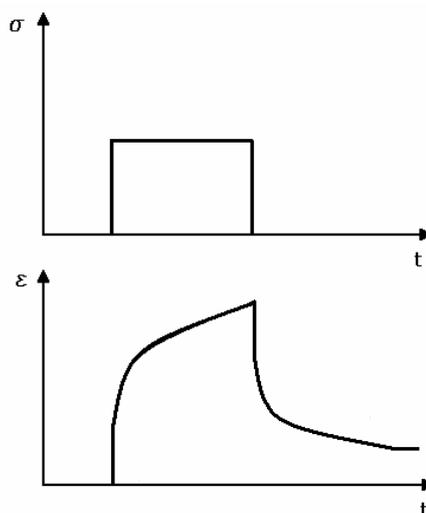


Figura 2.9 - Resposta tensão-extensão de uma mistura betuminosa

Quando uma tensão de compressão constante é aplicada ocorre uma deformação elástica instantaneamente, verifica-se que com o tempo a deformação aumenta, esta componente da deformação designa-se por componente viscosa da deformação. Quando a tensão é retirada, fase de descarga, a deformação elástica instantânea é logo recuperada, diminuindo depois a deformação gradualmente com o tempo. No entanto, nem toda a deformação é recuperável, existindo uma parcela de deformação que é recuperável, designada por deformação elástica retardada e outra que é permanente, designada por deformação permanente.

Assim, por cada carregamento efectuado existe uma pequena deformação permanente que fica no pavimento. Ao longo da sua vida útil um pavimento está sujeito à acção dos rodados dos veículos, correspondendo cada passagem a um carregamento, ou seja, uma mistura betuminosa estará sujeita a muitos milhares de carregamentos durante a sua vida útil. A soma destas pequenas deformações permanentes que ficam após cada carregamento dá origem a uma deformação permanente acumulada que pode ser significativa, originando rodeiras no pavimento.

Na Figura 2.10 representa-se de forma esquemática o fenómeno da deformação permanente e a forma como as pequenas deformações permanentes remanescentes de cada carregamento se vão acumulando.

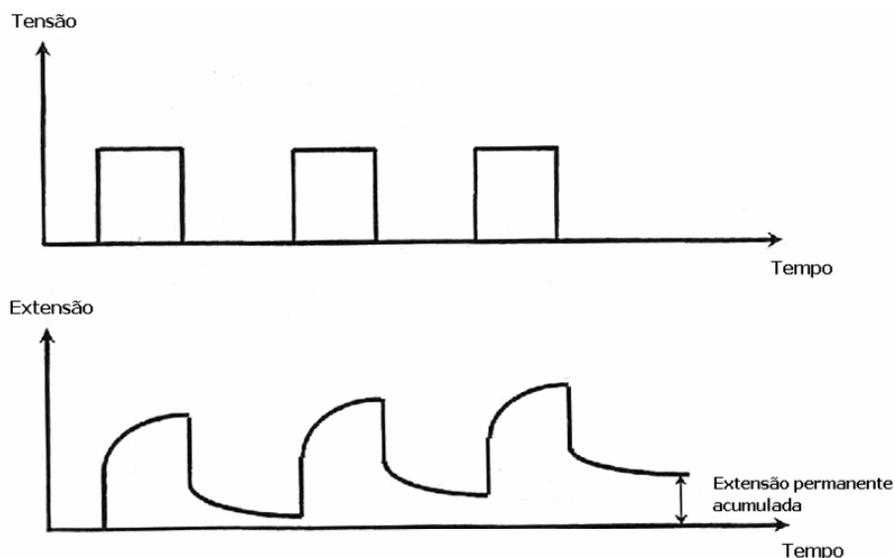


Figura 2.10 - Acumulação de extensões permanentes de origem viscosa com a sucessiva aplicação de carregamentos

2.5 Modelos Reológicos

As misturas betuminosas são materiais compósitos, constituídos por elementos discretos. No entanto, é comum estudar a mistura betuminosa como se fosse um meio contínuo e assim utilizar princípios da mecânica dos corpos deformáveis, como sejam os conceitos de tensão e extensão, para a análise do seu comportamento. Para relacionar as tensões com as extensões são utilizados modelos reológicos.

Para estudar o comportamento dos diferentes materiais têm sido propostos vários modelos reológicos. Estes permitem simular o comportamento de determinado material quando solicitado, isto é, a relação tensão-extensão. Neste capítulo far-se-á uma breve revisão dos modelos usualmente utilizados para a modelação de misturas betuminosas. Esta análise permite ajudar a melhor compreender o comportamento das misturas betuminosas e as deformações sofridas quando solicitadas.

Em casos em que o comportamento do material é mais complexo, como no caso das misturas betuminosas, associam-se vários modelos físicos simples que permitem simular esse comportamento.

Um comportamento elástico pode ser representado por uma mola, isto é, aplicando uma força à mola ela irá sofrer uma determinada deformação. Quando se retira a força aplicada, esta volta à sua forma original, recuperando a deformação, que se diz elástica. Este comportamento encontra-se representado na Figura 2.11.

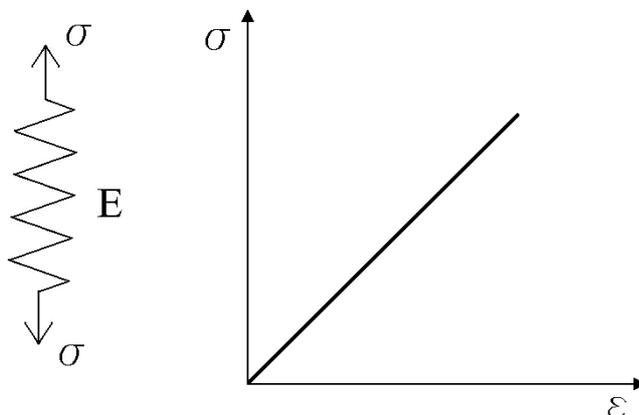


Figura 2.11 - Mola com comportamento elástico linear

Apesar de as molas poderem apresentar comportamentos não lineares, considera-se habitualmente que a mola apresenta uma extensão proporcional à tensão, ou seja, um comportamento elástico-linear. Assim, a expressão que relaciona as tensões e deformações é a lei de Hooke, que é traduzida pela equação (1):

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (1)$$

Em que E é o modulo de elasticidade, que traduz a proporcionalidade entre a tensão e a extensão.

Para modelar um comportamento viscoso é usualmente utilizado um amortecedor. Este é constituído por um cilindro que contém um líquido, dentro do qual move-se um êmbolo com um orifício. Quando se aplica uma força no êmbolo o líquido passa através do orifício com um caudal que depende da pressão no líquido, que está relacionada com a força aplicada. Assim, o êmbolo irá mover-se com uma velocidade que depende da pressão no líquido, isto é, quanto maior a pressão maior será a velocidade do êmbolo.

A velocidade de deslocamento do êmbolo no tempo, $\delta\epsilon/\delta t$, é directamente proporcional à tensão exercida, sendo a constante que as relaciona a viscosidade do líquido, η . Este comportamento encontra-se representado na Figura 2.12.

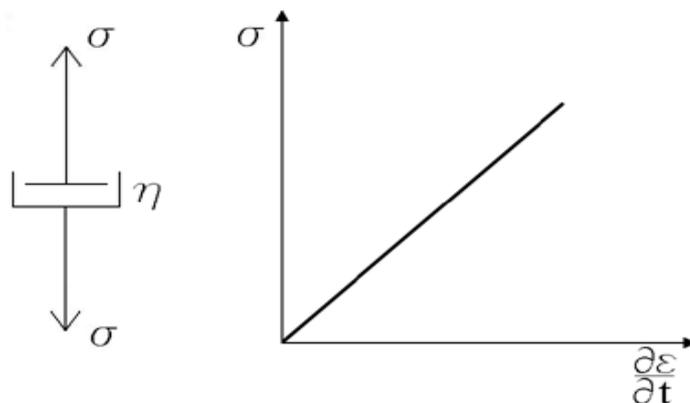


Figura 2.12 - Amortecedor com comportamento viscoso de acordo com a lei de Newton

O amortecedor segue assim a lei de Newton, existindo uma proporcionalidade entre a tensão e a variação de extensão no tempo, caracterizada pela viscosidade do líquido. A lei de Newton pode assim ser traduzida pela equação (2):

$$\sigma = \eta \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (2)$$

Sendo η a viscosidade do fluido e as restantes variáveis têm o significado já exposto.

No entanto, como foi referido, para caracterizar comportamentos mais complexos não são suficientes estes modelos físicos simples. É assim necessário recorrer a modelos mais complexos, que podem ser associações de modelos simples. Para caracterizar comportamentos visco-elásticos, os quais traduzem melhor o comportamento das misturas betuminosas para determinadas situações, são utilizados modelos que resultam da associação de molas e amortecedores.

Um dos modelos utilizados para representar um comportamento visco-elástico é o modelo de Maxwell (Huang, 1993), que corresponde à associação em série de uma mola com um amortecedor (Figura 2.13).

Quando submetido a uma tensão constante a extensão total, que é a soma das extensões da mola e do amortecedor, é dada pela equação (3):

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} (t_1 - t_0) \quad (3)$$

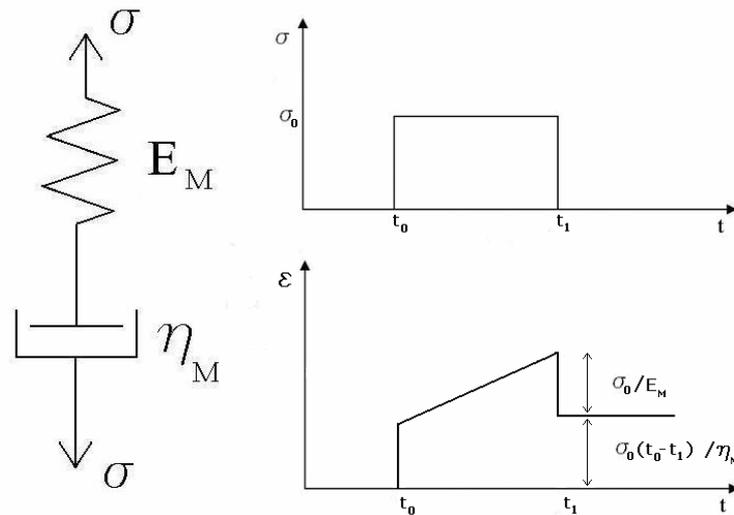


Figura 2.13 - Modelo de Maxwell para representação de um comportamento visco-elástico

Quando uma tensão σ_0 é aplicada ao sistema de forma instantânea, a mola sofre uma extensão também instantânea de σ_0/E_M . Se a extensão se mantiver constante, a tensão vai diminuir devido ao amortecedor, até atingir o valor zero após um determinado período de tempo. Se a tensão se mantiver constante, como é o caso, a extensão vai aumentando com o tempo devido ao amortecedor.

Um outro modelo que também é utilizado para caracterizar comportamentos visco-elásticos é o de Kelvin. Este modelo consiste na associação em paralelo de uma mola e um amortecedor (Figura 2.14).

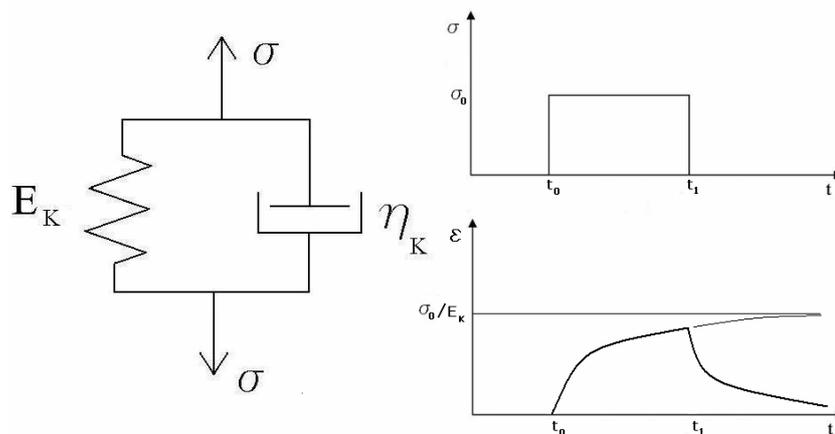


Figura 2.14 - Modelo de Kelvin para representação de um comportamento visco-elástico

Neste modelo, ao ser aplicada uma tensão, a mola e o amortecedor apresentam a mesma extensão, sendo a tensão aplicada igual à soma das tensões da mola e do amortecedor, ou seja:

$$\sigma = E_K \times \varepsilon + \eta_k \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (4)$$

Para uma tensão constante, pode determinar-se a extensão com base na equação (4), obtendo-se:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_K} \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T_K}\right)} \right] \quad (5)$$

Em que $T_K = \eta_k / E_K$, é o tempo de atraso. Se na expressão anterior se substituir $t = T_K$, obtém-se $\varepsilon = 0,362 \cdot \sigma / E_K$. O tempo de atraso pode assim ser definido como o tempo necessário para que a extensão seja 63,2 % da extensão que se obtém quando $t = \infty$ (Freire, 2002).

Outro modelo utilizado para caracterizar o comportamento visco-elástico é o modelo de Burgers (Huang, 1993). Este modelo encontra-se representado na Figura 2.15. Este modelo é ainda mais complexo pois resulta na associação em série dos modelos de Maxwell e de Kelvin. Como este é o modelo mais utilizado para a modelação de misturas betuminosas será analisado com mais pormenor.

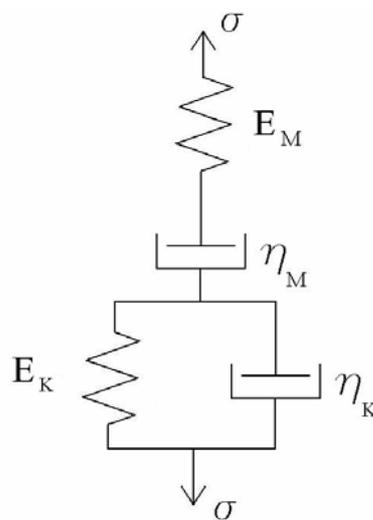


Figura 2.15 - Modelo de Burgers para representação de um comportamento visco-elástico

A Figura 2.16 mostra a resposta do modelo de Burgers quando solicitado por um carregamento com tensão constante durante um determinado período de tempo. No digrama são indicadas as diferentes componentes da extensão.

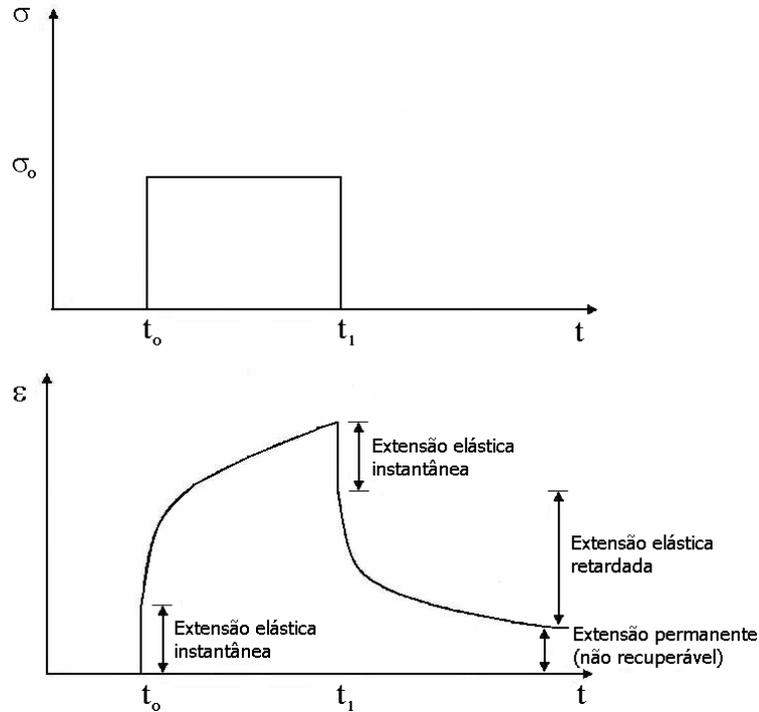


Figura 2.16 - Resposta do modelo de Burgers quando sujeito a um carregamento com tensão constante durante um determinado período de tempo

Quando submetido a uma tensão constante (σ_0), e durante o carregamento ($t_0 \leq t \leq t_1$) a extensão do modelo de Burgers pode ser traduzida pela equação (6), que resulta da soma das equações (3) e (5).

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M}(t - t_0) + \frac{\sigma_0}{E_K} \left[1 - e^{\left(-\frac{E_K}{\eta_K}(t - t_0) \right)} \right] \quad (6)$$

A extensão total é assim composta por três parcelas, uma extensão elástica instantânea (caracterizada por E_M), uma extensão viscosa (caracterizada por η_M) e uma extensão elástica com atraso (caracterizada por E_K e η_K).

Após ser retirada a carga ($t > t_1$) verifica-se uma recuperação da extensão pela mistura betuminosa. No modelo de Burgers a extensão na descarga é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_M}(t_1 - t_0) + \frac{\sigma_0}{E_K} e^{-\frac{E_K}{\eta_K}(t-t_1)} \left[1 - e^{\frac{E_K}{\eta_K}(t_1-t_0)} \right] \quad (7)$$

Assim, quando $t \rightarrow \infty$ verifica-se da equação (7) que a extensão tende para:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_0}{\eta_M}(t_1 - t_0) \quad (8)$$

Esta expressão representa a extensão não recuperável ou extensão permanente. Por cada carregamento existirá uma parcela de extensão irrecuperável, é precisamente o acumular destas extensões viscosas que origina a deformação permanente nas misturas betuminosas.

Traduzindo estas extensões de forma gráfica obtém-se a curva da Figura 2.17, onde se representa a relação entre as equações e a extensão do modelo de Burgers.

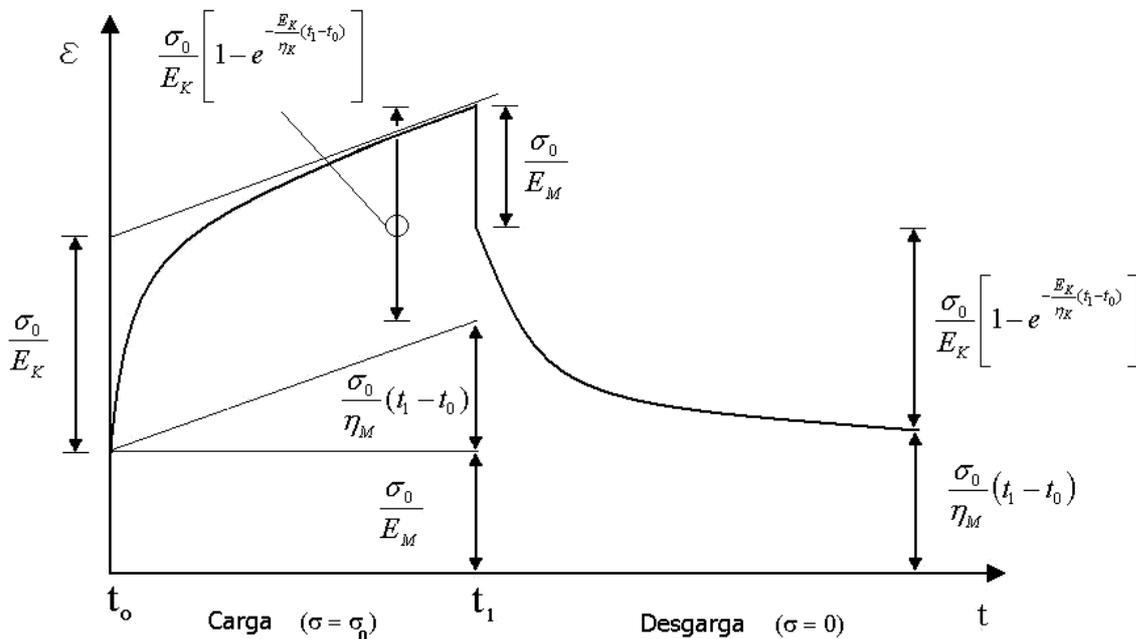


Figura 2.17 - Representação das diferentes componentes da deformação de misturas betuminosas e a sua tradução no modelo de Burgers

Da análise da equação (8) resulta que pelo Modelo de Burgers o parâmetro que mais influencia a deformação permanente é o η_M . Este parâmetro é responsável pelo valor das extensões viscosas irreversíveis, tendo os outros parâmetros uma influência muito inferior neste fenómeno (Freire, 2002). A Figura 2.18 mostra a contribuição dos diferentes

componentes do modelo de Burgers para a extensão total, é possível observar que a extensão permanente é provocada pelo amortecedor caracterizado por η_M .

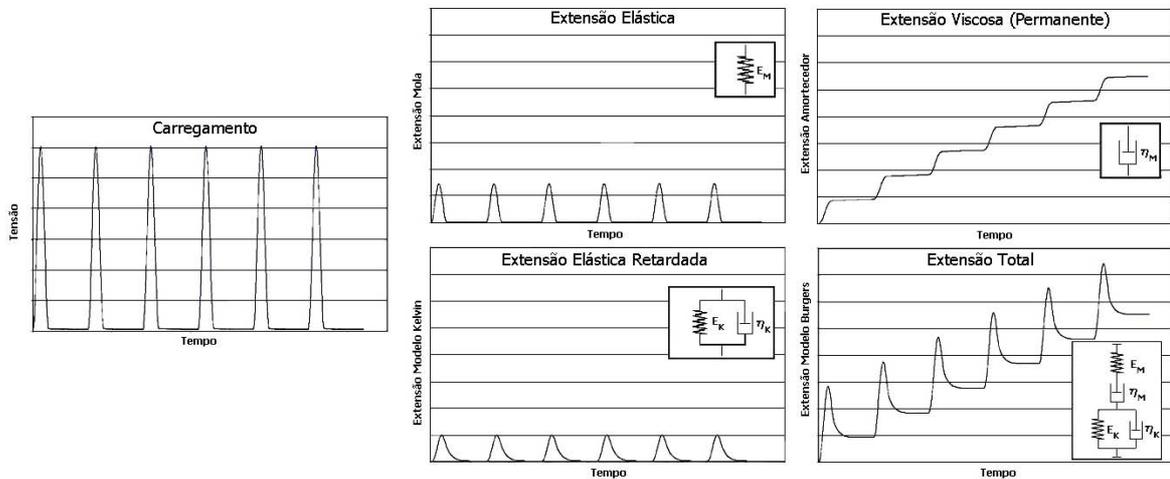


Figura 2.18 - Contribuição das diferentes componentes do modelo de Burgers para a extensão total (Antes *et al.*, 2003)

O Modelo de Burgers consegue representar de forma satisfatória o comportamento das misturas betuminosas quando sujeitas a carregamentos de curta duração. No entanto, um modelo de Kelvin pode não ser suficiente para caracterizar a extensão elástica com atraso para carregamentos com duração superior.

Assim, é comum recorrer-se ao denominado Modelo de Burgers Generalizado, que consiste na associação em série de vários modelos de Kelvin e um de Maxwell. Desta forma, para uma associação com n modelos de Kelvin, a equação (6) toma a forma.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_M} \left(1 + \frac{E_M \times t}{\eta_M} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_K} \left[1 - e^{-\left(\frac{E_K \times t}{\eta_K} \right)} \right] \quad (9)$$

Para além do modelo de Burgers, modelos reológicos como o de Huet, Huet-Sayegh ou o de Maxwell generalizado podem ser utilizados para a modelação do comportamento de misturas betuminosas. No entanto o modelo de Burgers é o mais utilizado para esse fim (COST 333, 1999).

A utilização de modelos reológicos mais complexos no cálculo analítico da resposta dos pavimentos esteve num passado recente limitada devido à complexidade em termos de cálculo necessária. O esforço de cálculo necessário para simular a passagem de milhares de

rodados utilizando para definir o comportamento do material modelos reológicos complexos que possibilitem simular de forma muito aproximada o comportamento dependente de factores como a temperatura e velocidade de carregamento era incomportável para os meios disponíveis.

Hoje os computadores já permitem realizar de forma rápida estes cálculos, embora ainda de forma limitada se se quiser levar em linha de conta, por exemplo, a variabilidade horária das condições climatéricas. É exequível que modelos reológicos com um comportamento complexo como o de Burgers, mas que melhor simulam o comportamento da mistura betuminosa possam ser aplicados para a modelação numérica, utilizando métodos como, por exemplo, o método dos elementos finitos (FEM), método dos elemento fronteira (BEM) ou o método dos elementos distintos (DEM) (COST 333, 1999 e Erkens, 2002).

A obtenção dos valores em laboratório que permitam caracterizar o comportamento das misturas betuminosas também está actualmente facilitada devido ao desenvolvimento de melhores e mais precisos equipamentos de ensaio. É possível assim utilizar ensaios mais complexos, para determinar com um maior grau de aproximação as características da mistura necessárias para a modelação do seu comportamento.

2.6 Factores que Afectam a Deformação Permanente

Embora já se tenham referido ao longo deste trabalho os factores que influenciam o comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente estes apresentam-se em seguida com mais pormenor.

Como já dito, diversos factores estão envolvidos no fenómeno da deformação permanente das misturas betuminosas, como sejam, as características das misturas e acções exteriores. As características das misturas dependem das propriedades dos seus elementos constituintes bem como da proporção destes na mistura. Nas acções exteriores incluem-se acções climatéricas, em especial a temperatura, e as características do tráfego, como sejam, o número de veículos pesados, as cargas por eixo, o tipo e a pressão dos pneus e a velocidade de circulação. De forma isolada pode analisar-se como cada factor influi no comportamento da mistura.

2.6.1 Tráfego

O aumento do tráfego (especialmente o tráfego pesado), o aumento das cargas transportadas por eixo, a crescente substituição dos rodados duplos por rodados simples de base larga e o aumento da pressão de enchimento dos pneus estão na base duma mais acelerada formação de patologias em pavimentos rodoviários, nomeadamente os cavados de rodeira devido à deformação permanente em misturas betuminosas (COST 334, 1999).

As previsões indicam que nos países da UE existirá entre 2000 e 2030 um crescimento anual no sector de transporte de cargas de 2,1%. Na Figura 2.19 apresenta-se a distribuição prevista do transporte de cargas por diferentes modos de transporte, exceptuando transporte marítimo e pipelines, para os estados membros da UE desde 1990 até 2030. Observa-se que o transporte de mercadorias por estrada terá uma importância crescente, prevendo-se que em 2030 represente 77,4% do transporte de mercadorias (DG TREN, 2003).

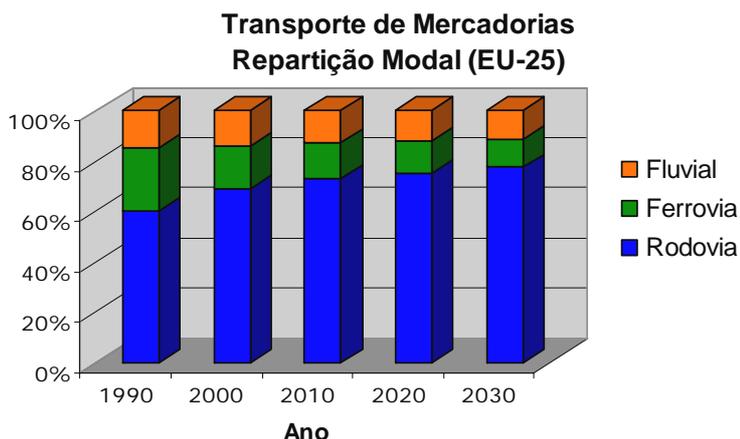


Figura 2.19 - Evolução da repartição modal do transporte de mercadorias na UE, previsão até 2030 (DG TREN, 2003)

Na Figura 2.20 apresenta-se a repartição modal do transporte de bens para diversos países da Europa em 2002 (exceptuando o transporte marítimo). Observa-se que em Portugal o transporte rodoviário de mercadorias é claramente superior ao dos outros meios de transporte à semelhança do que ocorre na grande maioria dos países europeus.

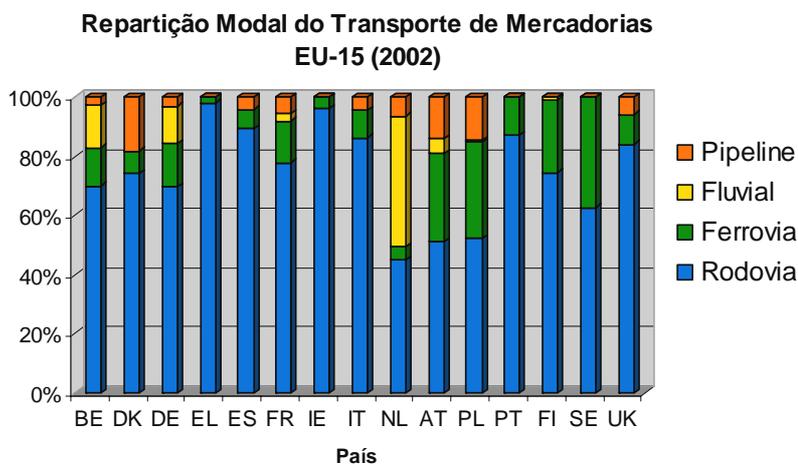


Figura 2.20 - Repartição modal do transporte de mercadorias em diversos países da UE em 2002 (excepto transporte marítimo) (DG TREN, 2004)

Este aumento de tráfego leva a que se realizem pavimentos com espessuras superiores de misturas betuminosas, pelo qual, cada vez devem ser mais acuteladas questões relacionadas com a composição e execução das misturas betuminosas, bem como fenómenos relacionados com estas, como seja, a deformação permanente.

Devido à grande importância que o transporte rodoviário tem na economia e como o estado das estradas pode afectar os custos operacionais é de suma importância avaliar quais as consequências que estas alterações no transporte rodoviário têm no estado do pavimento das estradas. É fundamental procurar soluções, em termos de projecto, construção e conservação, que permitam mitigar estes problemas.

Na Figura 2.21 observa-se o efeito do aumento das cargas nos eixos dos veículos pesados no pavimento, nomeadamente na contribuição das diversas camadas constituintes do pavimento para a deformação permanente. Quando se compara o dano provocado pelas passagens de um eixo com 100 kN com o mesmo número de passagens de um eixo de 80 kN observa-se uma maior profundidade de rodeira, com um acréscimo da contribuição das camadas betuminosas. As camadas superiores são aquelas onde se regista um maior acréscimo da contribuição para a deformação permanente (Chen *et al.*, 2004).

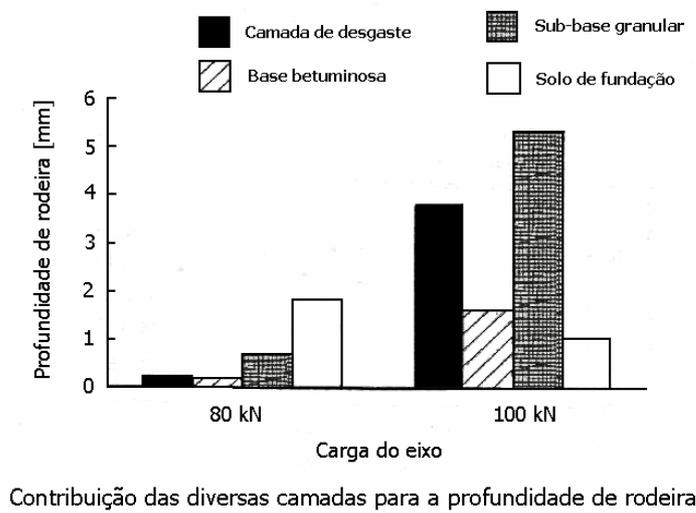


Figura 2.21 - Efeito do excesso de peso por eixo nos pavimentos, contribuição das diversas camadas para a profundidade de rodeira (Chen *et al.*, 2004)

A tendência que se verifica em substituir os rodados duplos por rodados simples de base larga é outro factor que agrava a formação de cavados de rodeiras, pois a área de pavimento afectada é menor e a pressão de enchimento do pneu é maior, logo as tensões no pavimento

serão superiores. Este agravamento verifica-se principalmente para as camadas superiores, betuminosas, pois para as camadas inferiores a forma como a carga é aplicada deixa de ser tão relevante, passando a interessar apenas a carga total aplicada (COST 334, 2000).

A Figura 2.22 mostra os resultados de ensaios realizados na pista de ensaios Lintrack, no âmbito do projecto COST 334. É possível observar a maior deformação do pavimento resultante da utilização de rodados simples com pneus de base larga quando comparada com a deformação obtida com rodados duplos. Esta deformação obtida com os rodados simples provém essencialmente da maior deformação permanente das misturas betuminosas.

Desta forma, na acção COST 334 são propostas cargas limites nos eixos dos veículos pesados, tendo em conta as características do eixo e dos pneus, como sejam, o diâmetro, a largura e a pressão de enchimento. O objectivo é assim limitar as cargas aplicadas em pneus com características mais agressivas para o pavimento, evitando um aumento da velocidade de degradação deste. É de realçar que nesta limitação de cargas a degradação considerada mais condicionante para pavimentos com camadas betuminosas mais espessas foi a deformação permanente destas.

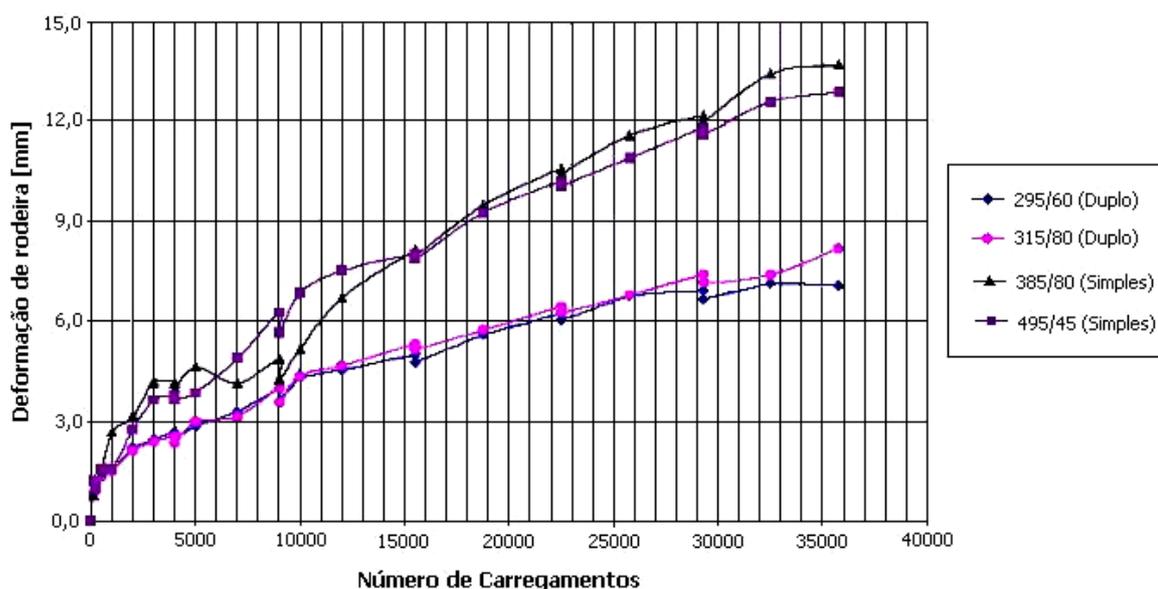


Figura 2.22 - Efeito na deformação permanente dos rodados simples de base larga e dos rodados duplos (Houben *et al.*, 1999)

A velocidade de tráfego também influencia a deformação permanente. Para velocidades de tráfego baixas a resposta do pavimento é menos rígida. Isto corresponde a ter a carga sobre uma determinada zona do pavimento durante mais tempo, ou seja, um tempo superior de carregamento. Desta forma as deformações obtidas são superiores, existindo uma parcela de

deformação irreversível também superior. Alguns investigadores referem que a extensão vertical máxima nas camadas betuminosas provocada por um veículo pesado a 20 km/h é cerca do dobro da provocada pelo mesmo veículo a 80 km/h (Chen *et al.*, 2004).

A distribuição lateral dos veículos também se apresenta como factor importante. Em locais onde o tráfego é mais canalizado, com uma menor distribuição lateral, os rodados solicitam sempre a mesma zona do pavimento observando-se assim um crescimento mais rápido das rodeiras com o número de eixos. Quando a distribuição lateral dos veículos é maior a formação de rodeiras por deformação das misturas betuminosas é menor com o número de rodados.

2.6.2 Temperatura

A temperatura afecta de forma substancial o comportamento das misturas betuminosas pois influencia a viscosidade do betume. Quando a temperatura aumenta o betume torna-se mais fluido e a resistência à deformação das misturas betuminosas diminui. Assim, para um determinado carregamento a deformação ocorrida é superior. As deformações de origem viscosa, nomeadamente as irreversíveis serão superiores, o que piora o comportamento da mistura à deformação permanente.

Verifica-se que a temperatura afecta as duas componentes da deformação permanente em misturas betuminosas, contribuindo para que ocorra uma maior deformação por corte na mistura, mas também para que ocorra uma maior densificação. Na Figura 2.23 pode observar-se o efeito da temperatura na deformação permanente de misturas betuminosas.

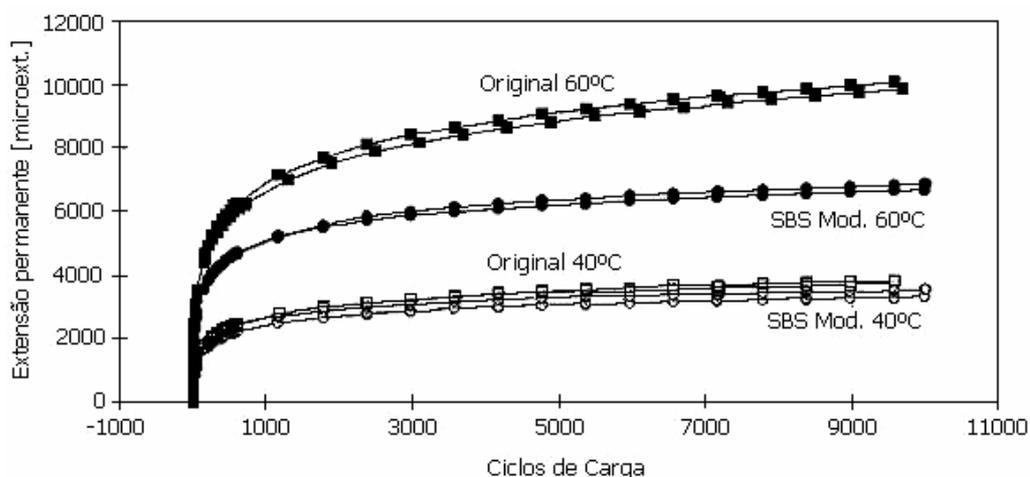


Figura 2.23 - Efeito da temperatura na deformação permanente em misturas betuminosas em ensaios triaxiais realizados a 40°C e 60°C (Sargand e Kim, 2003)

É muito importante para avaliar o comportamento da mistura, nos ensaios laboratoriais, utilizar temperaturas representativas das condições a que a mistura estará sujeita em serviço. Como a acumulação de deformações ocorre essencialmente e mais rapidamente com temperaturas elevadas, as temperaturas de ensaio devem ser representativas destas condições. Devem ser utilizadas temperaturas de ensaio na gama dos valores mais elevados que se esperam verificar *in situ*. É comum a utilização de temperaturas entre 40°C e 60°C.

2.6.3 Quantidade e Características do Betume

Para uma mistura que apresente uma determinada granulometria é possível, de forma simples, inferir que se esta não tiver ligante suficiente pode desagregar-se quando solicitada. No entanto, se a quantidade de ligante for excessiva a mistura pode deformar-se em excesso quando solicitada, esta torna-se uma mistura com baixa resistência à deformação permanente (Figura 2.24). Para as misturas correntemente utilizadas pode dizer-se que um aumento da percentagem em betume torna a mistura betuminosa mais susceptível à deformação permanente.

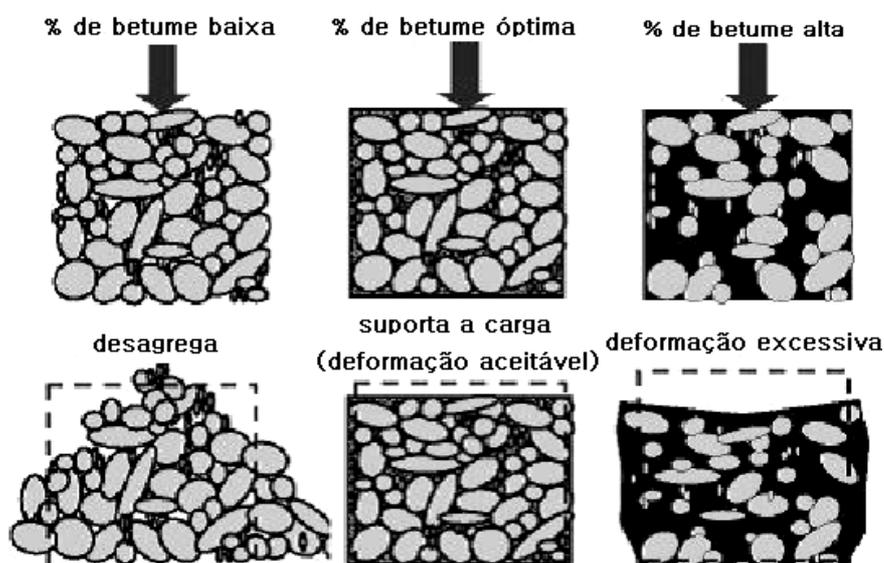


Figura 2.24 - Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa com uma mesma granulometria (Erkens, 2002)

De uma forma geral, para uma dada mistura quanto mais duro for o betume, isto é, quanto maior for a sua viscosidade a uma determinada temperatura, melhor será o seu comportamento à deformação permanente (Prowell, 1999 e Barreno *et al.*, 2004). Se o betume se apresentar menos fluido, quando solicitado, sofrerá deformações mais baixas, tendo também uma menor componente de deformação viscosa responsável pelas deformações

permanentes. Este efeito pode ser observado na Figura 2.25 que apresenta resultados laboratoriais obtidos, com diferentes betumes, em ensaios de simulação de tráfego em laboratório.

O betume vai envelhecendo com a passagem do tempo, por volatilização e oxidação dos seus componentes. O betume apresenta assim uma maior viscosidade para a mesma temperatura. Apesar de este envelhecimento prejudicar algumas características das misturas betuminosas torna-as menos susceptíveis à deformação permanente. As misturas betuminosas são mais susceptíveis à deformação permanente no início da vida útil do pavimento, com o envelhecimento do betume estas tornam-se mais resistentes a este fenómeno.

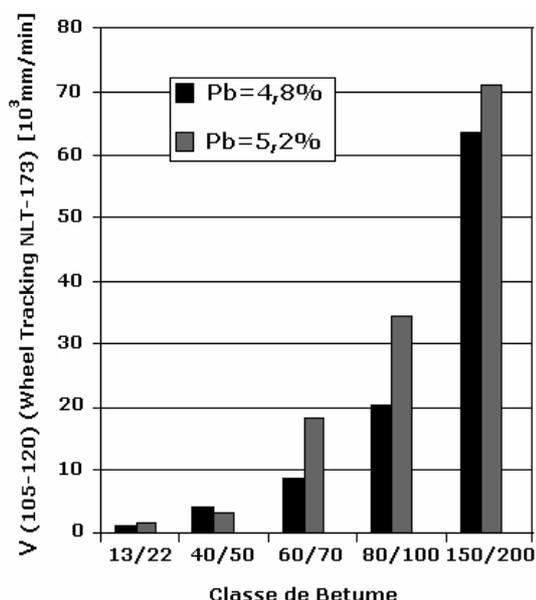


Figura 2.25 - Efeito da viscosidade do betume na profundidade de rodeira obtida no ensaio de wheel tracking (Barreno *et al.*, 2004)

São diversos os factores que contribuem para o endurecimento do betume. No entanto os mais importantes são (Shell, 2003):

- a oxidação, devido ao contacto com o oxigénio existente na atmosfera;
- a volatilização, nos betumes existem elementos voláteis que evaporam, este fenómeno depende do grau de exposição do betume e do tipo de betume;
- endurecimento físico, este endurecimento ocorre devido à reorientação das moléculas de betume e à cristalização das ceras. Este endurecimento é reversível se o betume for reaquecido;
- a exsudação de óleos do betume para o agregado. Este fenómeno depende das propriedades do betume e da porosidade do agregado.

O endurecimento do betume ocorre desde logo nas fases de fabrico e colocação da mistura prolongando-se depois durante a vida útil do pavimento. Apresenta-se na Figura 2.26 uma curva tipo da evolução do endurecimento do betume, que relaciona o índice de endurecimento (definido pela razão entre a viscosidade após um determinado período de tempo e a viscosidade inicial) e as diferentes fases a que o betume está submetido.

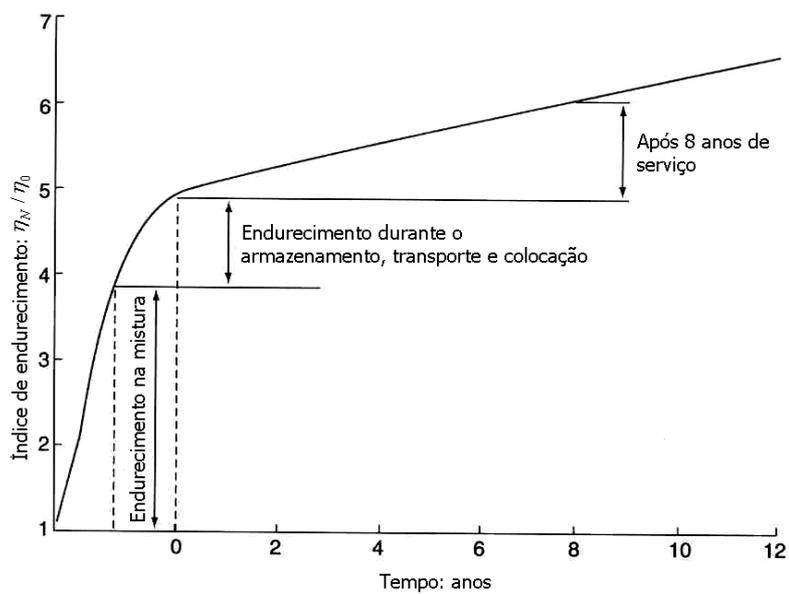


Figura 2.26 - Evolução do endurecimento do betume com as diferentes fases da vida da mistura betuminosa (Shell, 2003)

É possível misturar com o betume aditivos que modifiquem o seu comportamento. Entre os aditivos mais utilizados estão os polímeros (SBS, EVA, SBR, etc), borracha vulcanizada, fibras de diversas origens (vidro, carbono, celulose, têxteis, etc). Dos inúmeros aditivos existentes no mercado alguns melhoram o comportamento à deformação permanente pois aumentam para uma dada temperatura a viscosidade do betume o que aumenta a rigidez da mistura.

Entre os aditivos mais comuns e que são referidos por alguns autores como passíveis de melhorar o comportamento à deformação permanente encontram-se o polímero SBS (Kim e Sargand, 2003 e Grabowski e Slowik, 2004, ver Figura 2.23) e a borracha vulcanizada (Souza *et al.*, 2005 e Putman *et al.*, 2005). A adição ao betume de diversos tipos de fibras, como sejam, as de carbono (Williams *et al.*, 2005), de celulose (Vlad e Andrei, 2004) ou poliméricas como, por exemplo, as de poliéster (Hernandez e Fernandes, 2004), também melhoram o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas.

2.6.4 Agregados

A resistência das misturas betuminosas deve-se à contribuição de duas componentes fundamentais, a coesão fornecida pelo betume e a fricção interna fornecida pelo agregado (Pereira e Picado Santos, 2002).

Uma boa granulometria dos agregados, expressa na curva granulométrica da mistura, é fundamental para se obter após compactação uma mistura coesa com um elevado grau de imbricamento entre as partículas do agregado. Misturas de agregados com granulometria contínua permitem obter mais contactos entre as partículas, aumentando a resistência da mistura ao corte e melhorando o seu comportamento à deformação permanente. Desta forma, misturas com granulometria contínua oferecem melhores resultados à deformação permanente que misturas abertas.

Uma outra propriedade granulométrica que influí no comportamento à deformação permanente das misturas é a máxima dimensão do agregado. Misturas com dimensão máxima do agregado superior apresentam (relativamente a misturas semelhantes) valores de resistência à deformação permanente superior. O uso de agregado de maiores dimensões resulta num esqueleto sólido mais resistente formado por estas partículas o que beneficia a resistência à deformação permanente das misturas.

A forma dos agregados é uma das propriedades que mais afecta o desempenho das misturas betuminosas (Sargand e Kim, 2001 e Masad *et al.*, 2004). O uso de agregados rolados diminui de forma acentuada a resistência à deformação permanente, enquanto que as misturas realizadas com inertes britados apresentam valores de resistência superiores. É assim comum os cadernos de encargos exigirem o uso de agregados britados numa percentagem elevada para o fabrico de misturas betuminosas (JAE, 1998).

Outra questão relativa à forma dos agregados relaciona-se com a existência de partículas lamelares e alongadas, a existência nas misturas betuminosas de uma elevada percentagem destas partículas pode ter efeitos indesejados na resistência das misturas betuminosas. Estas partículas quando sujeitas a esforços mostram-se mais frágeis. Assim também a quantidade de partículas lamelares e alongadas nas misturas betuminosas deve ser controlada, o que é geralmente proposto em todas as especificações técnicas (por exemplo JAE, 1998).

A textura dos agregados também influi na resistência das misturas betuminosas à deformação permanente. Agregados com textura superficial mais rugosa (ex. agregados graníticos) apresentam melhores resultados que agregados com a textura superficial lisa (ex. agregados calcários). Com o uso de agregados mais rugosos consegue-se uma maior resistência nos

contactos das partículas, aumentando a fricção interna e portanto a resistência à deformação permanente (Figura 2.27).

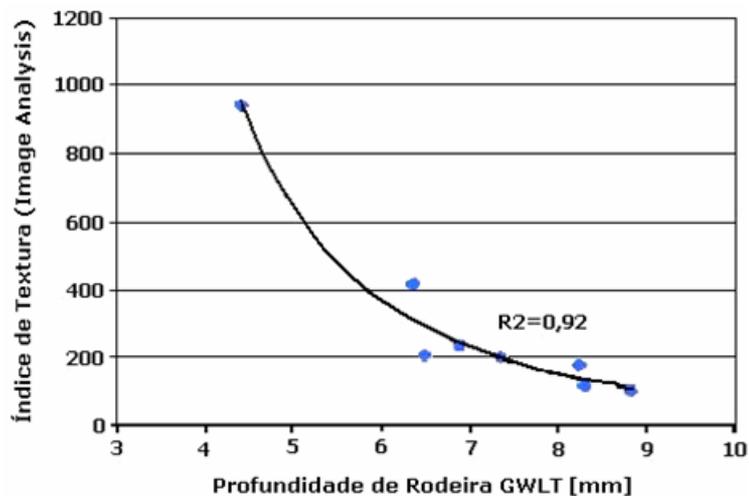


Figura 2.27 - Correlação entre a textura do agregado determinada por análise de imagem e a deformação obtida no GLWT (Masad *et al.*, 2004)

2.6.5 Compactação

Efectuando-se uma boa compactação diminui-se o volume de vazios na mistura, assim esta deforma-se menos quando sujeita à passagem do tráfego, pois caso o volume de vazios seja muito elevado, quando solicitada pelo tráfego a mistura irá densificar-se, originando deformações. Isto ocorre devido à falta de contacto entre partículas do agregado em misturas com compactação deficiente, deste modo quando carregada a camada as partículas mudam de posição dentro da mistura (rodando), provocando deformações à superfície.

No entanto, o volume de vazios da mistura após compactação também não deve ser muito baixo pois a mistura pode tornar-se instável piorando muito o seu comportamento. O volume de vazios para o qual este fenómeno se verifica é designado por “volume de vazios crítico” e é de aproximadamente 3%, dependendo das misturas (Capitão, 2003).

Na Figura 2.28 pode observar-se esse fenómeno, representa-se a relação entre a tensão necessária para se obter uma extensão na mistura de 2% e a densidade da mistura. Para diferentes misturas para as quais se variou a percentagem em betume é visível que quando esta tem um volume de vazios inferior ao limite de 3% o seu comportamento piora. As misturas tornam-se menos resistentes e mais susceptíveis à deformação permanente.

Este fenómeno advém do facto que para volumes de vazios com valores inferiores a 2-3% o betume preenche todo o espaço entre as partículas. Isto origina que para temperaturas

elevadas o betume funcione como lubrificante entre as partículas de agregado, potenciando a deformação da mistura (SHRP, 1994b). De forma esquemática obtém-se uma relação entre o grau de compactação, medido pelo volume de vazios, e a velocidade de deformação com a forma representada na Figura 2.29.

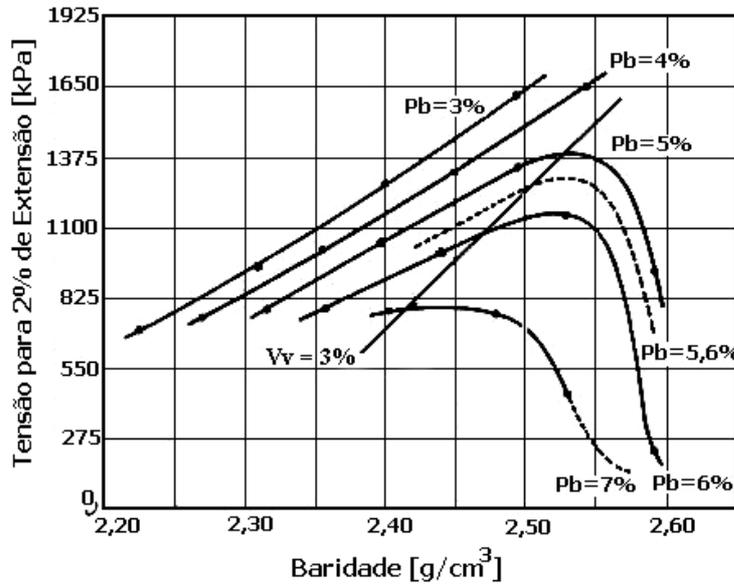


Figura 2.28 - Relação entre a tensão para uma extensão de 2% e a baridade da mistura (Santucci, 2001)

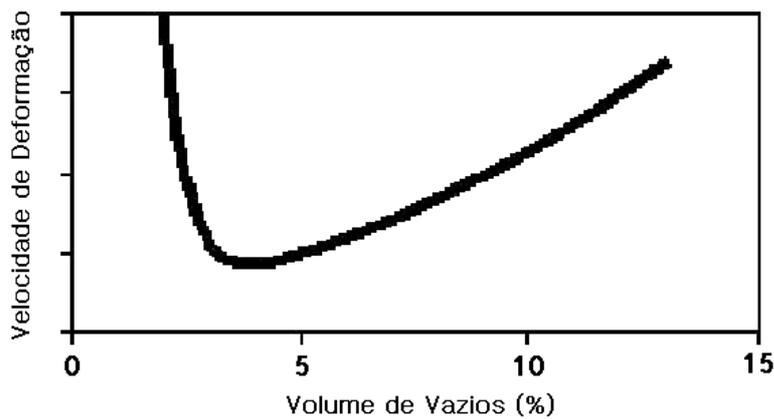


Figura 2.29 - Relação esquemática entre o volume de vazios e a velocidade de deformação da mistura (Austroads, 1999)

Valores recolhidos em campo também apontam na mesma direcção, Sousa refere que nos casos mais graves de deformação permanente de misturas betuminosas registaram-se volumes de vazios abaixo dos 3% (SHRP, 1994b).

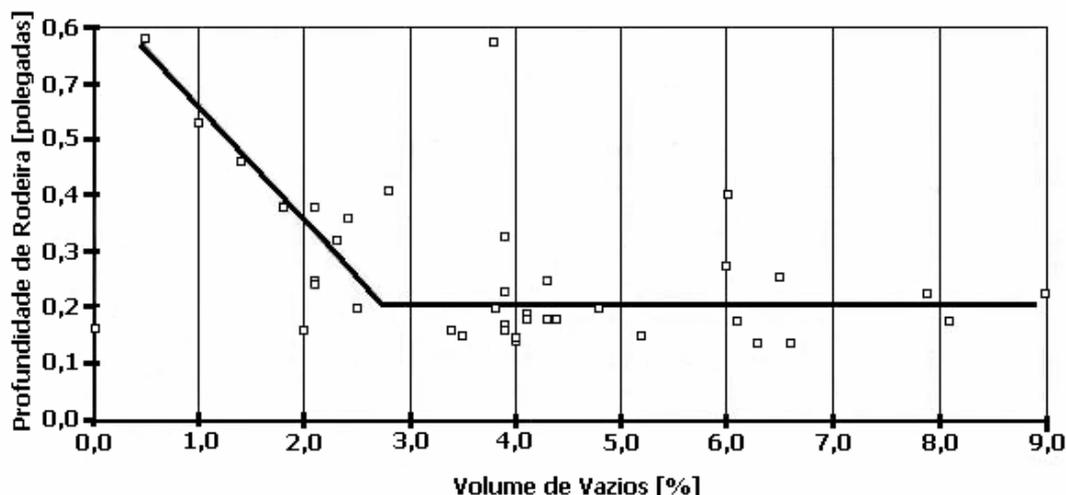


Figura 2.30 - Relação entre o volume de vazios e a profundidade de rodeira, dados de campo (SHRP, 1994b)

Esta relação deve-se ao facto de quando solicitada a mistura inicialmente se densificar. Esta densificação faz aumentar a resistência da mistura devido ao aumento dos contactos no esqueleto sólido da mistura. Se a mistura criar resistência suficiente para suportar as cargas, acabará a densificação passando as deformações a ocorrer a volume constante. Se a mistura não adquirir resistência suficiente o volume de vazios diminuirá sucessivamente até a mistura instabilizar e ocorrerem grandes deformações.

O método de compactação também influencia a resposta das misturas betuminosas. Em obra a compactação é sempre realizada recorrendo a cilindros, no entanto quando se pretende estudar as misturas em laboratório existem vários processos de compactação disponíveis para fabricar provetes. O processo de compactação utilizado condiciona assim os valores obtidos. Este facto torna-se relevante sempre que estão em causa valores obtidos com métodos de compactação diferentes (Khan *et al.*, 1998).

Na Figura 2.31 é mostrado um exemplo de como provetes de uma mesma mistura betuminosa apresentam diferentes resultados dependentes da forma como foram compactados. Estes resultados foram obtidos utilizando o ensaio de compressão uniaxial estático.

Apresenta-se no Quadro 2.1 um resumo dos factores que influenciam o comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente e como este varia com esses factores.

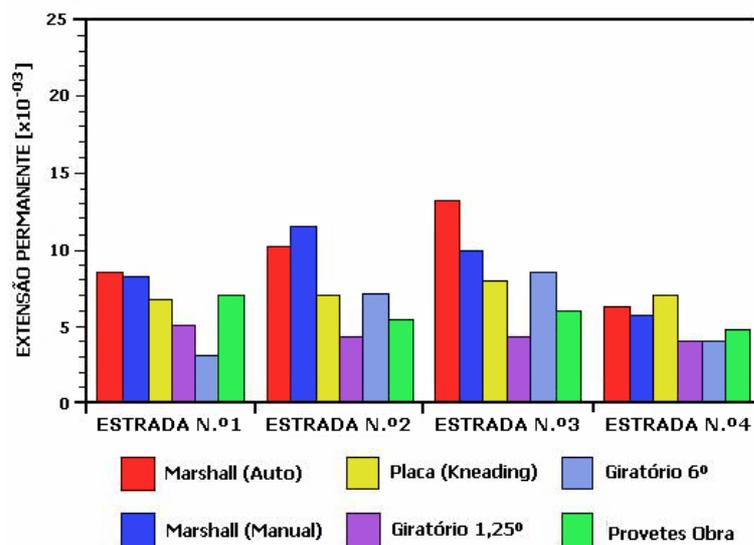


Figura 2.31 - Efeito do processo de compactação no comportamento de misturas betuminosas à deformação permanente (Khan *et al.*, 1998)

Quadro 2.1 - Principais factores que afectam a deformação permanente em misturas betuminosas

Factor	Varição da susceptibilidade à deformação permanente
Temperatura	Aumenta com o aumento de temperatura.
Compactação	Diminui com a redução do volume de vazios até se atingir o volume de vazios crítico, reduzindo-se a resistência da mistura abaixo deste.
Tráfego	Aumenta com o aumento do número de passagens de rodados, com o aumento da pressão dos pneus, com o aumento das cargas por eixo, com a redução da velocidade de circulação, com a utilização de rodados simples, pneus com maior pressão de enchimento e com a maior canalização de tráfego.
Agregado	Diminui com agregados de granulometria contínua que permitam boa compactação e interligação entre partículas, com o aumento da máxima dimensão do agregado, com a utilização de agregados britados, com partículas de forma cúbica e com agregados de textura rugosa.
Betume	Diminui com o aumento de viscosidade do betume, podendo utilizar-se aditivos no betume que melhorem a resistência das mistura betuminosas à deformação permanente. Aumenta com o aumento da percentagem de betume.

Importa referir que no caso dos componentes da mistura, betume e agregado, o seu peso no comportamento da mistura à deformação permanente depende determinantemente do tipo de mistura em estudo.

2.7 Considerações Finais

Em Portugal as elevadas temperaturas que se fazem sentir no Verão, que reduzem a viscosidade do betume, propiciam o aparecimento de deformações permanentes nas misturas betuminosas, pelo qual, além dos motivos já expostos, este fenómeno deve ser estudado com alguma preocupação. A temperatura é um dos factores que deve merecer mais atenção, pois a sua influência nas propriedades da mistura betuminosa é enorme, aumentando muito a sua susceptibilidade à deformação permanente com o aumento de temperatura.

Os actuais métodos de dimensionamento de divulgação mais generalizada, consideram na sua génese para o cálculo da deformação permanente nos pavimentos a tensão de compressão que ocorre no topo do solo de fundação. Apesar de posteriormente se ter incorporado a deformação permanente das misturas betuminosas nestes métodos é comum considerar que uma excessiva deformação permanente nas camadas betuminosas será evitada através de uma correcta escolha de materiais e formulação destas misturas.

As administrações rodoviárias nos seus “Cadernos de Encargos” indicam usualmente propriedades dos componentes das misturas betuminosas. É comum existirem especificações sobre as características dos agregados, nomeadamente quanto à quantidade de partículas britadas e fusos granulométricos do agregado a respeitar, de forma que o esqueleto do agregado tenha uma boa resistência ao corte e degrade correctamente as cargas.

O tipo de betume a utilizar na mistura betuminosa também é escolhido tendo em atenção os factores que possam contribuir para a deformação permanente. Os factores que usualmente são considerados são as temperaturas máximas a que o pavimento se encontra exposto (normalmente através da consideração de zonas climáticas), e o volume de tráfego que solicita o pavimento. Assim, tendo em atenção estes factores é escolhido um betume com determinada dureza.

Um exemplo desta forma de proceder é o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional da JAE, MACOPAV (JAE, 1995). Há administrações que aconselham que também se considere a velocidade de circulação, uma vez que quanto menor esta for, menos rígida é a resposta da mistura (Westrack Forensic Team, 2001). Para a mistura propriamente dita também se podem exigir valores mínimos de alguns parâmetros para obviar o problema da deformação permanente, como seja, a porosidade após compactação.

Estas recomendações têm-se, no entanto, revelado insuficientes para responder às necessidades existentes no que respeita ao desempenho e durabilidade dos pavimentos face às novas técnicas, misturas e componentes existentes bem como às exigências relativas à manutenção e conservação de redes rodoviárias. Assim, uma das conclusões da acção COST 333, é a de incorporar e tentar quantificar a contribuição da deformação permanente das camadas betuminosas na deformação total do pavimento.

As camadas de desgaste estão sujeitas a temperaturas superiores e a pressões mais elevadas, suportando directamente as cargas dos rodados dos veículos, estando assim, mais expostas ao fenómeno da deformação permanente. Além disso, verifica-se que pela própria composição das misturas betuminosas utilizadas nas camadas de desgaste estas também serão mais susceptíveis a este fenómeno. O comportamento destas camadas influencia assim de forma vital o comportamento do pavimento (Houben *et al.*, 2003).

No entanto, num pavimento a espessura da camada de desgaste é bastante inferior à espessura total de betuminoso existente. Assim, é conveniente estudar o comportamento das camadas betuminosas inferiores relativamente à deformação permanente, pois apesar de não serem tão solicitadas como a de desgaste, devido à sua maior espessura a sua contribuição pode ser significativa para a deformação permanente total registada. A avaliação da contribuição das camadas betuminosas inferiores é fundamental, não só devido à sua maior espessura, mas porque é comum a utilização de revestimentos superficiais (muito mais delgados que as camadas em betão betuminoso) em camadas de desgaste o que vai agravar as solicitações em termos de carga e temperatura nas camadas inferiores.

A zona do pavimento que contribui para a deformação permanente das misturas betuminosas pode ir a uma profundidade superior a 10 cm. A importância de uma correcta caracterização das camadas que ocupam esta zona é fundamental, não só da camada de desgaste, mas também das camadas subjacentes. A contribuição para a deformação permanente das camadas betuminosas subjacentes à camada de desgaste pode ser apreciável se não apresentarem resistência suficiente.

Como já foi referido, neste trabalho foi escolhida uma mistura betuminosa designada por macadame betuminoso obedecendo ao fuso A do Caderno de Encargos do IEP, actual E.P. E.P.E.. Esta mistura é de aplicação comum, tanto em construção nova como em reabilitação, pelo que, é fundamental conseguir caracterizar o comportamento destas misturas quanto à deformação permanente, e quais os ensaios laboratoriais que melhor podem ser utilizados para esse fim.

Devido às características da mistura esta adequa-se plenamente ao objectivo do trabalho. A utilização de uma mistura betuminosa mais rígida permite por em evidência as potencialidades e limitações dos ensaios para a caracterização à deformação permanente.

2.8 Referências Bibliográficas

Antes, P., Dommelen, A., Houben, L., Molenaar, A. and Parajuli, U. (2003). “Stress Dependent Behaviour of Asphalt Mixtures at High Temperatures”. *Association of Paving Technologists*, Lexington, CD edition, vol. 72.

Austrroads (1999). “Air voids in Asphalt”. *Pavement Work Tips N.º 17*, Austrroads, Sydney.

Barreno, I., Sáiz, A. and Dueñas A. (2004). “Relationships Between Bituminous Binder Rheological Properties and Wheel Tracking Rutting Resistance of Asphalt Mixtures”. *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobetume Congress*, Viena, Book II, pp. 1659-1668.

Capitão, S. (2003). “Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Chen, J., Lin, C., Stein, E. and Hothan, J. (2004). “Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements”. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 130, N.º 4, pp. 519-525.

COST 333 (1999). “COST 333 Development of New Bituminous Pavement Design Method, Final Report of the Action”. European Commission, Directorate General Transport, Office for official Publications of the European Communities, Luxembourg.

COST 334 (2000). “COST 334 Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres, Final Report of the Action”. European Commission, Directorate General Transport, Office for official Publications of the European Communities, Luxembourg.

DG TREN (2004). “European Union Energy and Transport in Figures: Statistical Pocketbook 2004”. European Commission, Directorate-General Energy and Transport, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

DG TREN (2003). “European Energy and Transport Trends to 2030”. European Commission, Directorate-General Energy and Transport, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Erkens, S. (2002). “Asphalt Concrete Response (ACRe) – Determination, Modeling and Prediction”. Delft University Press, Delft.

Fang, H., Haddock, J., White, T. and Hand, A. (2004). “On the Characterization of Flexible Pavement Rutting Using Creep Model-Based Finite Element Analysis”, *Finite Elements in Analysis and Design*, Elsevier Science, vol 41, pp. 49–73.

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.

Grabowski, W and Slowik, M. (2004). “Performance of Creep of the Polymer Modified Binders in the Laboratory Conditions”. *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobetume Congress*, Viena, Book II, pp. 1638-1644.

Hernandez, F. e Fernandes, E. (2004). “Influência do Uso de Fibras de Poliéster no Fabrico de Misturas Betuminosas”. *Comunicações do 3^o Congresso Rodoviário Português*, Centro Rodoviário Português, Lisboa, edição em CD.

Houben, L., Molenaar, A. and Miradi, A. (2003). “Research into Rutting on Asphalt Motorway Pavements”. *Proceedings Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV'03)*, Pereira & Branco (eds.), Guimarães, pp. 273-271.

Houben, L., Visser, A. and van Dommelen, A. (1999). “Summary of Lintrack Research into Rutting of Asphalt Concrete Test Pavement 1999/2000; *Report Summary for COST334*”. Delft University of Technology Road and Railroad Research Laboratory, Delft.

Huang, Y. H. (1993). “*Pavement Analysis and Design*”. University of Kentucky, Prentice-Hall Inc, New Jersey.

JAE (1998). “Caderno de Encargos da Junta Autónoma de Estradas”, Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.

JAE (1995). “Manual de Concepção de Pavimento para a Rede Rodoviária Nacional”, Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.

Khan, A., Wahab, A., Asi, I. and Ramadhan, R. (1998). “Comparative Study of Asphalt Concrete Laboratory Compaction Methods to Simulate Field Compaction”. *Construction and Building Materials*, Elsevier Science, vol. 12, pp. 373-384 .

Kim, S. S. and Sargand, M. S. (2003). “Performance Evaluation of Polymer Modified Superpave Mixes Using Laboratory Tests and Accelerated Pavement Load Facility”.

Presentation at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D. C., CD edition, paper 03-3855.

Masad, E., Little, D., Tashman, L., Saadeh, S., Al-Rousan, T. and Sukhwani, R. (2004). "Evaluation Of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance". *Report No. ICAR 203-1*, Texas Transportation Institute, Texas.

NCHRP (2002). "Contribution of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements". *NCHRP Report 468*, National Cooperative Highway Research Program, National Academy Press, Washington D. C..

Pereira, P. e Miranda, C. (1999). "*Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*". Universidade do Minho, Braga.

Pereira, P. e Picado Santos, L. (2002). "*Pavimentos Rodoviários*". Edição de autor (ISBN 972-8692-02-1), Braga.

Prowell, B. D. (1999). "Selection and Evaluation of Performance-Graded Asphalt Binders for Virginia - Final Report". *VTRC 99-R21*, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville.

Putman, B., Thompson, J., and Amir Khanian, S. (2005). "High Temperature Properties of Crumb Rubber Modified Binders". *Proceedings of the Fourth International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV'04)*, Belfast, CD edition, paper 174.

Sargand, S. and Kim, S. (2001). "Pavement Performance Testing". *FHWA/OH-2001/14*, ORITE, Department of Civil Engineering, Ohio University, Athens.

Santucci, L. (2002). "Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements ". *Technology Transfer Program and Pavement Specialists*, Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Santucci, L. (2001). "Rut Resistant Asphalt Pavements". *Technology Transfer Program and Pavement Specialists*, Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Shell (2003). "*The Shell Bitumen Handbook*". Fifth Edition, Thomas Telford Publishing, London.

SHRP (1994a). “Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes”. *SHRP-A-415*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C..

SHRP (1994b). “Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool”. *SHRP-A-698*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C..

Souza, R, Himeno, K. and Kobayashi, A. (2005). “Performance of Asphalt-Rubber Concrete Mixtures”. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV'04)*, Belfast, CD edition, paper 121.

Vlad, N and Andrei R. (2004). “Research Study Conducted on The Accelerated Circular Track, for Performance Evaluation and Validation of Technical Specifications for the Asphalt Mixes Stabilized With Indigenous and Imported Fibers, in Romania”. *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobetume Congress*, Viena, Book II, pp. 2198-2207.

Westrack Forensic Team (2001). “Superpave Mixture Design Guide”. *Westrack Forensic Team Consensus Report*, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D. C..

Williams, C., Bausano, J. and Wiljanen, B. (2005). “The Use Of Carbon Fibers On The Fatigue Performance Of Hot Mix Asphalt”. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV'04)*, Belfast, CD edition, paper 154.

Zhou, F., Scullion, T. and Sun, L. (2004). “Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes”. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 130, N.º 4, pp. 486-494

3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

3.1 Introdução

Nos métodos empírico-mecanicistas correntes para dimensionamento de pavimentos a deformação permanente no pavimento é controlada pela tensão de compressão gerada por um rodado de um veículo pesado no topo do solo de fundação. Assim, estes métodos traduzem indirectamente o fenómeno da deformação permanente em misturas betuminosas. Não existindo capacidade de incorporar esse comportamento em modelos de cálculo, por não existirem modelos de predição com aptidão suficiente, deve recorrer-se a ensaios laboratoriais que permitam caracterizar as misturas betuminosas à deformação permanente.

Os ensaios, em geral, não permitem a quantificação da deformação permanente (cavado de rodeira) que irá ocorrer no pavimento. No entanto, permitem ordenar as misturas em estudo relativamente à deformação permanente ou verificar se uma determinada mistura cumpre os requisitos relativamente a um parâmetro que representa esse fenómeno. A aceitação de uma mistura não implica conhecer o valor da rodeira causada pela deformação permanente das misturas betuminosas no pavimento. Apenas se assume que se a mistura cumprir determinados valores limites definidos para o ensaio, a deformação permanente que esta sofrer estará dentro de limites aceitáveis não colocando em causa a vida útil do pavimento.

Estão em desenvolvimento modelos capazes de prever o valor da rodeira causada pela deformação permanente das misturas betuminosas. Estes modelos utilizam como base as características das misturas betuminosas determinadas em ensaios laboratoriais de caracterização à deformação permanente.

O objectivo deste trabalho é avaliar os ensaios laboratoriais que podem ser utilizados para estudar e caracterizar o comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas tradicionalmente utilizadas em Portugal e quais os factores que podem afectar o desempenho destes ensaios.

Neste momento existem alguns ensaios laboratoriais aos quais são reconhecidas potencialidades para estudar o comportamento das misturas betuminosas à deformação

permanente. Apresenta-se seguidamente uma descrição sucinta dos ensaios adoptados neste trabalho e de outros que se julgue conveniente referir, não sendo no entanto objectivo desta apresentação ser exaustiva. Os ensaios utilizados na realização deste trabalho serão posteriormente referidos com mais detalhe.

Existem também ensaios que são realizados apenas no betume, como o DSR (*Dynamic Shear Rheometer*). No entanto, devido a estes ensaios caracterizarem apenas um dos componentes da mistura betuminosa os seus resultados dificilmente poderão ser utilizados para a caracterização do comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente (Carswell, 2004).

É comum agrupar os ensaios existentes aos quais é reconhecida alguma capacidade ou potencialidade para avaliar o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas nas seguintes categorias (Freire, 2002 e Brown *et al.*, 2001):

- **Ensaio empíricos**
 - Ensaio de Marshall
 - Ensaio de Hveem

- **Ensaio fundamentais**
 - Ensaio de compressão uniaxial estático (ensaio de fluência) ou cíclico;
 - Ensaio de compressão triaxial, geralmente com cargas cíclicas;
 - Ensaio de corte, com aplicação de cargas estáticas ou cíclicas;
 - Ensaio de compressão diametral. Apesar de também serem ensaios com cargas de compressão a carga é aplicada segundo o diâmetro do provete;
 - Ensaio em cilindro oco, este ensaio permite aplicar simultaneamente tensões axiais e de corte no provete.

- **Ensaio de simulação**
 - Ensaio de simulação de tráfego em laboratório (wheel tracking);
 - Ensaio de simulação de tráfego em pista à escala real.

Apresenta-se, em seguida, a descrição resumida dos ensaios mais divulgados para caracterização à deformação permanente e que se enquadram nos diferentes tipos atrás referidos. Não será feita uma descrição pormenorizada de cada ensaio e apenas serão referidos e sucintamente descritos os ensaios mais divulgados, pois na realidade existe um grande número de ensaios. Associados à breve descrição dos ensaios serão referidos os seus princípios base bem como as vantagens e limitações que possam apresentar.

3.2 Ensaio Empíricos

3.2.1 Ensaio de Marshall

Este é o ensaio que é utilizado na formulação de misturas a quente em Portugal. O método de Marshall, no qual se insere este ensaio, é o mais utilizado em todo o mundo para a formulação de misturas betuminosas.



Figura 3.1 - Equipamento para o ensaio de Marshall existente no Laboratório de pavimentos do DEC-FCTUC

Neste ensaio utilizam-se provetes cilíndricos com um diâmetro de 101,6 mm e 63,5 mm de altura compactados por apiloamento. O número de pancadas é função do tráfego que se estima solicitar o pavimento durante a sua vida útil. Devido às dimensões dos provetes o ensaio tem como limitação uma dimensão máxima do agregado de 25,4 mm.

O ensaio consiste em comprimir diametralmente os provetes de mistura betuminosa, que devem estar a uma temperatura de 60°C. Os provetes são colocados na vertical no estabilómetro e comprimidos segundo o seu diâmetro a uma velocidade constante de 50 mm/min, levando-os até à rotura. A força máxima medida no momento da rotura é designada por “estabilidade Marshall” e caracteriza a resistência mecânica da mistura, enquanto que a deformação máxima na rotura se designa por “deformação Marshall”.

O ensaio de Marshall é um ensaio empírico, isto é, não mede nenhuma propriedade da mistura, apenas a resistência mecânica dos provetes quando submetidos às condições de ensaio especificadas. No entanto, existe uma experiência de utilização deste ensaio 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.

Quando se verificou a necessidade de caracterizar laboratorialmente as misturas betuminosas à deformação permanente utilizou-se a designada “rigidez Marshall”, determinada com base nos seus resultados. A rigidez Marshall é o coeficiente entre os valores da estabilidade Marshall e da deformação Marshall. Assim, será expectável que misturas com um elevado valor de rigidez Marshall apresentem um bom comportamento à deformação permanente. Este conceito foi utilizado na Europa e nos EUA. Nos EUA existem procedimentos de instituições como a AASHTO e a ASTM para a sua determinação (AASHTO, 2001a e ASTM, 2001).

A determinação da rigidez Marshall é um conceito interessante, por exemplo, mesmo que uma mistura tenha um valor elevado de estabilidade Marshall, se apresentar uma deformação exagerada irá ter uma baixa rigidez Marshall.

A utilização do ensaio de Marshall para caracterizar misturas betuminosas quanto à deformação permanente apresenta limitações, pois é um ensaio empírico, que não traduz as acções que a mistura sofre no pavimento, nem determina nenhuma propriedade fundamental das misturas betuminosas. Encontram-se alguns autores que o consideram inadequado para caracterizar a resistência das misturas betuminosas à deformação permanente (Chen e Liao, 2002). Como vantagens, este ensaio, tem a sua simplicidade, o facto de o equipamento se encontrar disponível na maioria dos laboratórios e existir grande experiência na sua utilização.

Os ensaios empíricos têm a vantagem de terem décadas de utilização com uma larga experiência acumulada que valida os seus resultados. Contudo, ao não terem sido desenvolvidos para especificamente avaliarem a resistência à deformação permanente, ao não aplicarem solicitações que pretendam simular as ocorridas em serviço e ao não determinarem propriedades fundamentais das misturas os seus resultados podem ser pouco fiáveis e imprecisos não atingindo os objectivos pretendidos.

3.2.2 Ensaio de Hveem

Nem todas as administrações adoptaram o ensaio de Marshall para a formulação de misturas betuminosas, optando pelo ensaio de Hveem. Este foi introduzido na década de 20 do século XX e é um ensaio empírico cuja finalidade é a formulação de misturas betuminosas.

À semelhança do ocorrido com o ensaio Marshall, as administrações rodoviárias que utilizam o ensaio de Hveem, também aproveitaram os seus resultados para a caracterização à

deformação permanente. No entanto, este ensaio apresenta as mesmas limitações que o ensaio de Marshall quanto a esta caracterização. Como este não é um ensaio utilizado em Portugal, nem existindo motivos para que tal possa acontecer, não será mais pormenorizado no trabalho.

3.3 Ensaio Fundamentais

3.3.1 Ensaio de Compressão Uniaxial

São ensaios normalmente realizados em provetes cilíndricos em que a carga, de compressão é aplicada na direcção do eixo do provete. A carga aplicada pode ser estática ou cíclica.

O ensaio de compressão uniaxial estático consiste em submeter provetes cilíndricos de mistura betuminosa a uma carga axial de compressão durante um determinado intervalo de tempo. A carga é mantida constante durante a sua aplicação. Durante o ensaio é medida a deformação axial do provete, podendo também ser medida a deformação radial.

Estes incluem uma fase de descarga após a fase de aplicação de carga, em que se retira a carga, recuperando o provete alguma da deformação sofrida, deformação reversível. Este ensaio tem sido utilizado para determinar os parâmetros dos modelos físicos utilizados na modelação de misturas betuminosas, como por exemplo o modelo de Burgers.

O resultado é uma curva que representa a deformação axial sofrida pelo provete em função do tempo. Uma das propriedades da mistura determinada com este tipo de ensaios é o “módulo de rigidez da mistura”, que é o quociente entre a tensão aplicada ao provete e a deformação sofrida por este após um determinado tempo de ensaio.

Para a avaliação da resistência à deformação permanente da mistura betuminosa, a deformação utilizada para o cálculo do módulo de rigidez da mistura deveria corresponder à deformação irreversível. No entanto, apesar das elevadas temperaturas de realização do ensaio, a parcela da deformação viscosa (irreversível) é muito inferior à parcela da deformação elástica (reversível). Assim, para avaliar o comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas pode considerar-se adequado o módulo de rigidez calculado com a deformação total do provete.

Refira-se que quando se utiliza o módulo de rigidez da mistura obtido neste tipo de ensaios para efectuar previsões da deformação permanente, os valores obtidos são inferiores aos que se obtêm em pistas de ensaio ou em pavimentos em serviço. Este facto deve-se ao efeito

dinâmico das cargas aplicadas, quer em pistas de ensaio quer da passagem de veículos em pavimentos em serviço, que o ensaio de compressão uniaxial estático não simula.

Existe ainda a utilização deste ensaio repetindo o carregamento, normalmente realiza-se um número reduzido de carregamentos. Para a realização do ensaio devem ser definidas igualmente as condições de carregamento como sejam a tensão aplicada, duração do tempo de carregamento e de repouso, a forma do carregamento e o número de carregamentos. O tempo de carregamento nestes ensaios varia, sendo usualmente na ordem dos 10 segundos, após o qual se segue um tempo de repouso com uma duração superior, de forma que o provete recupere toda a extensão reversível.

O ensaio de compressão uniaxial estático apesar de útil, não simula a passagem do tráfego que é uma acção fundamentalmente dinâmica. Os progressos tecnológicos permitiram desenvolver, para melhor simular esse efeito dinâmico, ensaios de compressão uniaxial mas nos quais o provete é submetido a carregamentos repetidos com uma frequência elevada.

Estes ensaios têm uma configuração igual aos anteriores mas a aplicação de carga é cíclica. Os ciclos de carregamento são mais rápidos com frequências de 0,5 Hz a 2 Hz. Assim, os tempos de carga duram normalmente de 0,1 a 1 segundos, com tempos de repouso de 0,5 a 1 segundos. Durante um ensaio são assim aplicados milhares de carregamentos.

O carregamento pode ter uma forma rectangular ou sinusoidal. Este tipo de ensaio permite simular de forma mais eficiente as acções a que uma mistura betuminosa está sujeita num pavimento rodoviário devido ao tráfego. Apresenta-se na Figura 3.2 um equipamento para a realização de ensaios de compressão uniaxial cíclicos.



Figura 3.2 - Ensaio de compressão uniaxial cíclico realizado no Laboratório de Pavimentos do DEC-FCTUC.

Por cada carregamento existe uma parcela de deformação não recuperável do provete. Assim, o resultado deste ensaio é uma curva da evolução da deformação axial permanente acumulada com o número de carregamentos (ver Figura 3.3).

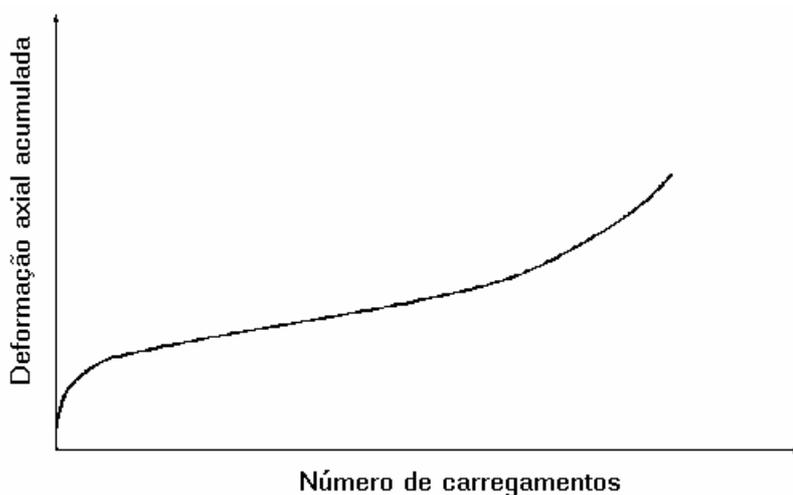


Figura 3.3 - Curva típica de deformação obtida em ensaios de compressão uniaxial cíclicos (CEN, 2001)

São visíveis na curva as três fases características:

- Fase 1: em que a inclinação da curva decresce rapidamente com a aplicação das cargas. Entre os factores que explicam esta fase da curva estão, uma densificação da mistura com alteração da microestrutura e reorientação das partículas do agregado, o que conduz a uma mistura mais resistente. Outro factor que pode influenciar esta primeira fase da curva de fluência é a irregularidade da superfície do provete que leva a que a força seja aplicada nos pontos elevados gerando concentrações de tensões nesses locais.
- Fase 2: em que a inclinação da curva é quase constante com as repetições de carga. A deformação permanente nesta fase é principalmente devida a deformações por corte. A inclinação da curva de fluência nesta fase pode ser utilizada para avaliar a susceptibilidade à deformação permanente das misturas betuminosas, conseguindo-se ordená-las por ordem preferencial.
- Fase 3: em que a inclinação da curva cresce rapidamente com a aplicação das cargas, esta fase corresponde à rotura do provete. A rotura pode dever-se a diferentes factores como sejam, a fadiga, não homogeneidade da mistura, etc. Nesta fase observam-se as grandes deformações no provete, assim como o seu fendilhamento.

Dependendo das condições de ensaio e da mistura pode não se verificar uma ou mais fases da curva de fluência.

Existem no entanto alguns autores (SHRP, 1994) que referem que a fase 3 da curva de deformação não simula o que sucede no pavimento. Apesar de nos pavimentos se verificar um andamento da deformação nas camadas betuminosas similar, no ensaio de compressão uniaxial cíclico o provete aumenta de volume durante o ensaio e a rotura do provete na fase final (fase 3) ocorre com fendilhamento no provete, o que pode dever-se a tensões de tracção. No pavimento a deformação ocorre essencialmente a volume constante (mesmo a diletância da mistura é obviada pela existência de material circundante), pelo que os fenómenos que regem a rotura do material no ensaio e no pavimento podem ser de diferente natureza.

Este ensaio está incluído nas recentes normas europeias sobre misturas betuminosas do CEN, através da prEN 12697-25 (CEN, 2001), que especifica as condições gerais do ensaio. Estes ensaios são realizados sem aplicar nenhum tipo de tensão de confinamento, apenas se submete o provete a tensões axiais, no entanto, na situação de serviço esse confinamento existe. Assim, a pré-norma prEN 12697-25 prevê que o provete tenha uma largura superior à da aplicação da carga, conseguindo-se desta forma um determinado grau de confinamento.

Os resultados deste ensaio permitem caracterizar as misturas betuminosas quanto à sua sensibilidade à deformação permanente, podendo com base nestes determinar-se alguns parâmetros para modelos matemáticos que permitam realizar modelações numéricas.

3.3.2 Ensaio de Compressão Triaxial

O ensaio de compressão triaxial permite aproximar as condições de tensão de ensaio às que a mistura betuminosa está sujeita na realidade. Neste tipo de ensaios é possível aplicar ao provete uma tensão de confinamento, à semelhança do que se verifica num pavimento e que o ensaio de compressão uniaxial não permite simular satisfatoriamente. Estes ensaios são semelhantes aos ensaios de compressão uniaxial, mas os provetes são submetidos a uma tensão de confinamento estática durante o ensaio. Desta forma é possível realizar ensaios triaxiais estáticos ou cíclicos. Como se considera que os ensaios cíclicos são aqueles que melhor simulam a realidade, a pré-norma prEN 12697-25 refere como se definem as condições gerais a utilizar para realização de ensaios triaxiais cíclicos.

O carregamento axial é usualmente de forma rectangular ou sinusoidal. A gama de temperaturas e de tensões que se podem utilizar neste ensaio é superior à do ensaio de compressão uniaxial. Assim, a existência da tensão de confinamento permite realizar o ensaio com temperaturas e tensões superiores, simulando melhor o que acontece num pavimento, sem que ocorra a rotura prematura do provete.

Segundo a pré-norma devem utilizar-se temperaturas de ensaio entre os 40 °C e os 60 °C. Podendo ser aplicadas tensões axiais entre 100 kPa e 600 kPa e tensões de confinamento com valores até 200 kPa. A pressão de confinamento pode ser aplicada por água ou através de uma membrana sujeita a vácuo. Este último método tem a desvantagem de apenas permitir aplicar tensões de confinamento até 100 kPa. Na Figura 3.4 pode apresenta-se um equipamento para ensaios de compressão triaxial cíclicos que aplica a tensão de confinamento com água, pode observar-se a câmara que envolve o provete e permite aplicar a tensão de confinamento.



Figura 3.4 - Equipamento para a realização de ensaios de compressão triaxial existente no Laboratório de Pavimentos do DEC-FCTUC

Para os ensaios triaxiais cíclicos o resultado é uma curva que relaciona a deformação vertical permanente com o número de carregamentos, semelhante à obtida nos ensaios uniaxiais cíclicos (ver Figura 3.3). O que foi referido relativamente à curva de deformação obtida nos ensaios uniaxiais cíclicos mantém-se válido para este tipo de ensaios.

3.3.3 Ensaio de Compressão Diametral

Nestes ensaios os provetes são cilíndricos e a carga é aplicada diametralmente e não perpendicularmente às faces do provete. Dentro deste género de equipamentos os mais divulgados são o *Nottingham Asphalt Tester* (NAT) e o *Universal Asphalt Tester* (MATTA), estando ainda disponíveis equipamentos de outros fabricantes (Figura 3.5). Estes ensaios também podem ser realizados de forma estática ou com aplicação de cargas cíclicas.



Figura 3.5 - Equipamento para realização de ensaios de tracção indirecta em misturas betuminosas (fabricante Instron Corporation)

Este ensaio difere dos anteriores na determinação das propriedades das misturas betuminosas pois o provete é sujeito durante o ensaio a uma força de compressão diametral, o que provoca estados de tensão não uniformes no provete e que não são conhecidos. No entanto no plano vertical de aplicação da carga o campo de tensões é quase uniforme.

Este ensaio é correntemente utilizado para medir as propriedades das misturas betuminosas a baixas e médias temperaturas, como seja, a fragilidade térmica e a resistência à tracção. É possível no entanto determinar o módulo de deformabilidade das misturas (CEN, 1999). O módulo de deformabilidade relaciona a extensão sofrida na mistura com a tensão aplicada permitindo inferir o comportamento das misturas à deformação permanente.

Neste ensaio o provete fica sujeito a tensões de tracção, o que faz com que as propriedades do betume assumam uma importância superior. Este é um ensaio em que o betume assume maior peso na caracterização da mistura podendo assim não apresentar resultados fiáveis na caracterização das misturas à deformação permanente pois a resistência fornecida pelo esqueleto do agregado pode não ser correctamente contabilizada.

A pré-norma prEN 12697-26 (CEN, 1999) indica temperaturas de realização do ensaio que têm como limite superior 40°C, valor que é muitas vezes ultrapassado na realidade. Esta limitação impede que se possa caracterizar da melhor forma as misturas betuminosas quanto à deformação permanente, pois o ensaio não é realizado na faixa de temperaturas máximas atingidas na realidade, que pode ultrapassar 50°C. Este ensaio é assim mais utilizado para a determinação das características das misturas betuminosas à tracção (resistência à fadiga) e módulos de deformabilidade a baixas e médias temperaturas.

3.3.4 Ensaios de Corte

Um rodado ao passar num pavimento não causa apenas tensões de compressão mas também tensões de corte, são estas aliás que estão mais intimamente relacionadas com a deformação permanente ocorrida nas misturas betuminosas. Assim, as administrações rodoviária dos EUA deram ênfase a que os ensaios para a caracterização das misturas betuminosas à deformação permanente tivessem como base a aplicação de tensões de corte aos provetes. É nesta filosofia que se inserem os ensaios de corte, entre os quais se encontra o ensaio de corte cíclico a altura constante. Os ensaios de corte a altura constante são realizados de forma a não ocorrer deformação volumétrica do provete.

Assim, neste ensaio o provete é sujeito a tensões de corte. Este tipo de ensaios está mais divulgado nos EUA estando incluídos no programa SHRP (metodologia SUPERPAVE) para avaliar a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas quando sujeitas a temperaturas elevadas. Na Europa não é comum a sua utilização, não estando prevista nenhuma norma para a sua realização.

O equipamento de ensaios de Corte, SST (*Superpave Shear Tester*), permite realizar diversos tipos de ensaios de corte. A norma AASHTO TP7-01 define os seguintes (AASHTO, 2001b):

- Ensaio de corte com varrimento de frequência com altura constante (*Shear Frequency Sweep Test at Constant Height*), em que é aplicada ao provete uma extensão de forma sinusoidal com uma amplitude de 0,0001 mm/mm, as frequências testadas são de 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1, 0,05, 0,02 e 0,01 Hz. Durante o ensaio a altura do provete é mantida constante.
- Ensaio de corte simples a altura constante (*Simple Shear Test at Constant Height*), onde se aplica uma tensão de corte que varia com a temperatura utilizada no ensaio variando entre 345 kPa (T = 4°C) e 35 kPa (T = 40°C). Esta tensão é mantida constante durante 10 segundos após o que se segue um período de repouso de igual duração. Durante o ensaio a altura do provete é mantida constante.
- Ensaio de corte cíclico a altura constante (*Repeated Shear at Constant Height*), este é um ensaio dinâmico em que o provete é sujeito a um carregamento sinusoidal com repouso. A tensão máxima de corte aplicada é de 69 kPa. O tempo de carregamento é de 0,1 segundos seguido de um repouso de 0,6 segundos. O ensaio tem a duração de 5000 ciclos. Durante o ensaio a altura do provete é mantida constante.

Para analisar o comportamento das misturas à deformação permanente o procedimento de ensaio mais utilizado é o ensaio de corte cíclico a altura constante. Este ensaio foi utilizado neste trabalho e será referido como ensaio de corte a altura constante.

Uma das bases deste ensaio é processar-se a volume constante. Assim, a deformação do provete ocorre por corte a volume constante. Estas deformações são as principais responsáveis pela formação de rodeiras em pavimentos. Este processo tem a desvantagem de fazer depender os resultados do volume de vazios inicial. Este ensaio também permite a rotação dos eixos principais, simulando o que ocorre quando um rodado solicita o pavimento.

Na Figura 3.6 seguinte mostra-se a instrumentação dos provetes para o ensaio de corte a altura constante (Santucci, 2001).

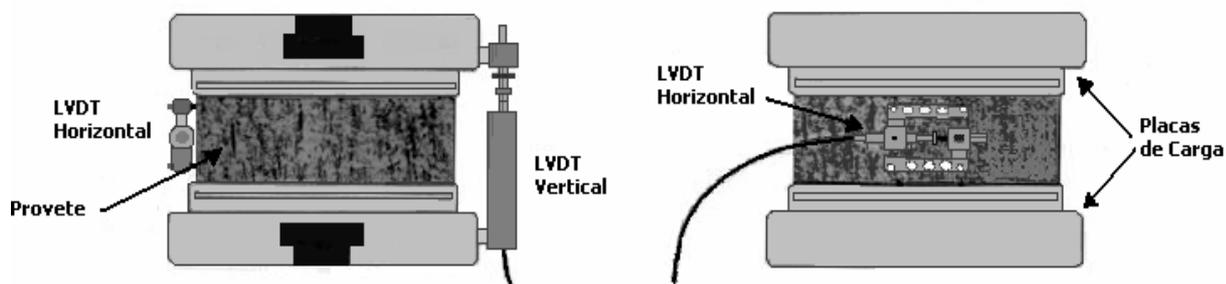


Figura 3.6 - Esquema da instrumentação de um provete para o ensaio de corte a altura constante (Santucci, 2001)

A curva de deformação do ensaio apresenta um andamento semelhante à obtida em outros ensaios já descritos. Para análise de resultados esta é modelada por uma equação do tipo potência. Este modelo é também utilizado para a análise de resultados de provetes que não alcancem os 5000 ciclos devido a rotura ou problemas no ensaio.

$$\gamma_p = a \times N^b \quad (10)$$

Com,

γ_p – extensão de corte permanente;

N – o número de ciclos;

a e b – constantes.

Na Figura 3.7 representa-se o resultado de um ensaio de corte a altura constante, estando também representada a modelação realizada. Esta modelação é sempre realizada e permite determinar alguns parâmetros para caracterização das misturas à deformação permanente.

Os parâmetros utilizados para avaliar o comportamento da mistura são a extensão de corte permanente acumulada medida no ensaio (após os 5000 ciclos de carregamento), o módulo de corte resiliente, o número de ciclos até se atingir 5,454% de extensão por corte e o número de

eixos padrão necessários para causar uma rodeira de 12,7 mm de profundidade no pavimento. Os dois últimos parâmetros são determinados utilizando a curva de modelação, podendo muitas vezes estar a ser extrapolados.

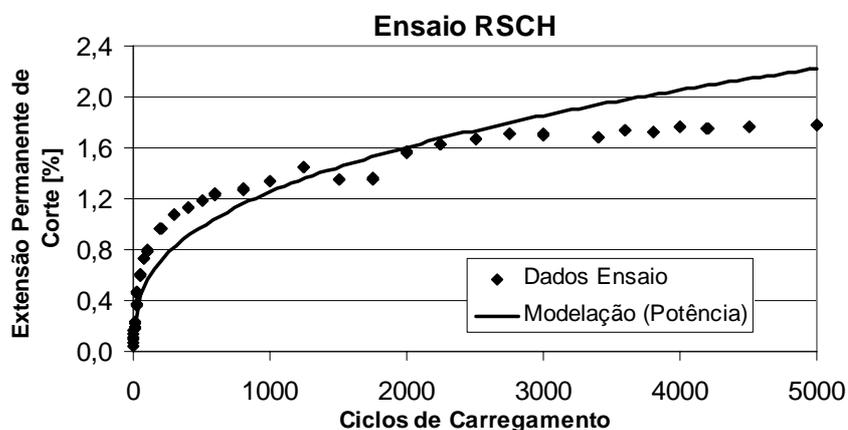


Figura 3.7 - Evolução da extensão de corte permanente com o número de carregamentos no ensaio de corte a altura constante

Este é um ensaio de laboratório que exige equipamento de alguma complexidade, o SST. De forma a tornar este ensaio mais fácil de realizar, sobretudo em obra, foram criados equipamentos mais simples para realizar estes ensaios. Como exemplo pode citar-se o FST, *Field Shear Tester* (TRB, 2004).

3.3.5 Ensaio de Cilindro Oco

Este é um ensaio complexo utilizado essencialmente para investigação, podendo ser utilizado em materiais granulares, como solos e agregados e em misturas betuminosas. Este ensaio permite aplicar ao provete forças axiais e de corte simultaneamente. É assim possível simular com mais rigor as solicitações a que o material está sujeito quando solicitado pelo rodado de um veículo, nomeadamente a rotação das tensões principais.

Quando um rodado passa no pavimento existe uma evolução das tensões conforme se representa na Figura 3.8, em que é possível observar a rotação das tensões principais na mistura betuminosa. Este ensaio permite realizar esta rotação utilizando para isso uma combinação entre a aplicação de cargas axiais e de corte (aplicando tensão às paredes interiores do cilindro ou aplicando esforços de torção). As cargas aplicadas podem ser estáticas ou cíclicas, por exemplo sinusoidais.

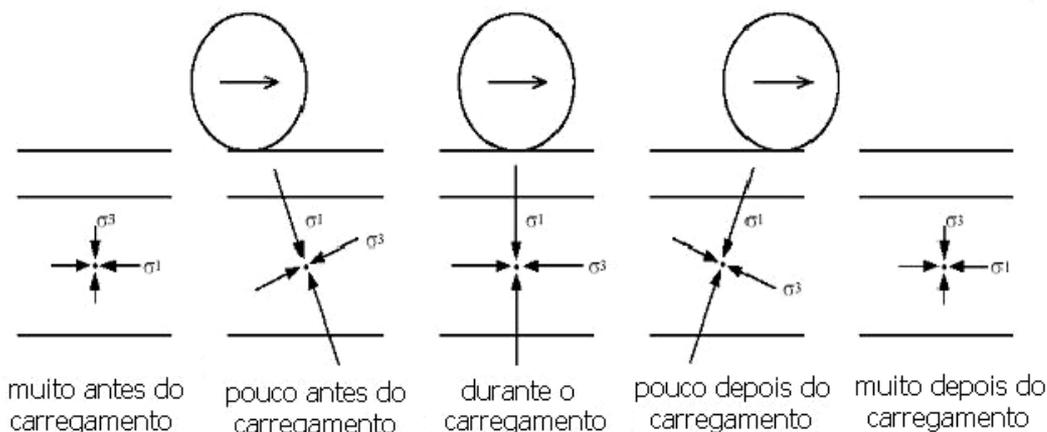


Figura 3.8 - Rotação das tensões principais no pavimento quando da passagem de um rodado (Blajezowski *et al.*, 1996)

Para este ensaio o provete é um cilindro oco, podendo ser obtido carotando o interior de um provete cilíndrico e utilizando a parte exterior no ensaio. Na Figura 3.9 apresenta-se um exemplo de um provete para este ensaio.

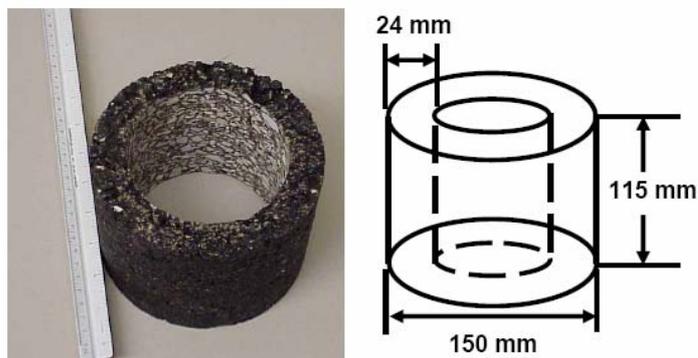


Figura 3.9 - Exemplo de um provete para o ensaio do cilindro oco e dimensões utilizadas (TRB, 2004)

O resultado do ensaio permite determinar a resistência à fadiga e o módulo de deformabilidade da mistura. Como permite obter a evolução da deformação com relação à tensão aplicada é possível inferir o comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente.

Apesar das potencialidades deste ensaio, este é utilizado principalmente para caracterizar o comportamento das misturas betuminosas à fadiga e o módulo de deformabilidade, não se utilizando usualmente para a caracterização à deformação permanente. A gama de temperaturas utilizadas é semelhante à do ensaio de compressão diametral, baixas e médias (até 40 °C).

As dimensões dos provetes indicadas na Figura 3.9 também apresentam a restrição de a máxima dimensão do agregado ser de 19 mm (TRB, 2004). O que pode ser uma limitação considerável se atendermos à prática construtiva portuguesa.

Refira-se que este é um ensaio muito complexo nas suas diferentes fases. A obtenção dos provetes exige algum esforço e a forma destes impossibilita a utilização de provetes recolhidos em obra. Este é um ensaio que, devido a estas condicionantes, apenas tem sido utilizado em investigação não parecendo reunir as condições para uma utilização na prática.

3.3.6 Ensaios de Simulação

Nestes ensaios o objectivo é simular mais aproximadamente as acções do tráfego, utilizando para esse efeito um rodado. Estes ensaios podem ser realizados a escala reduzida em laboratório com condições controladas, ou serem realizados numa escala real em pista. Os ensaios de simulação em laboratório (wheel tracking) são os que se encontram no âmbito deste trabalho, pois são equipamentos de laboratório simples podendo num futuro ser quotidianamente utilizados para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente. Os ensaios de simulação à escala real são equipamentos complexos e extremamente dispendiosos. A sua utilização é sobretudo para conduzir trabalhos de investigação e de desenvolvimento tecnológico de materiais. Realiza-se no entanto uma abordagem a estes equipamentos pois os conhecimentos que estes permitem obter são de enorme valia.

O conceito subjacente ao ensaio de simulação de tráfego em laboratório é bastante intuitivo, pois o objectivo é observar o comportamento de uma amostra de mistura betuminosa quando solicitada por um pequeno rodado, tentando simular a uma escala inferior o que se passa num pavimento. Embora todos os ensaios de simulação sejam semelhantes, existem diferenças entre eles, que vão desde a carga aplicada, forma como a carga é aplicada, diâmetro e tipo de roda, velocidade de roda, realização do ensaio ao ar ou em imersão, etc. Foram desenvolvidos em diferentes países diversos equipamentos para este fim. Como exemplo de equipamentos utilizados podem referir-se (Prithvi *et al.*, 2002):

- Asphalt Pavement Analyser (APA) - este equipamento é um desenvolvimento do GLWT (Georgia Loaded Wheel Tester);
- Hamburg Wheel Tracker Device - equipamento desenvolvido na Alemanha;
- O Nottingham Rutting Tester - da universidade com o mesmo nome (Inglaterra);
- Georgia Loaded Wheel Tester - do Estado da Georgia nos EUA, de onde deriva o APA;
- Ornièreur do LCPC – equipamento com génese em França.

Assim, são apontadas algumas vantagens e desvantagens relativas a alguns dos equipamentos mais divulgados apenas com o objectivo de tornar mais perceptível o funcionamento e as características destes equipamentos (Westrack Forensic Team, 2001):

- O ensaio do LCPC apesar de bastante divulgado tem como principal desvantagem o facto de os provetes serem pouco largos, estando o apoio rígido muito próximo influencia o plano de corte da mistura, o que impede que se formem as superfícies de corte na mistura betuminosa e a consequente deformação por corte. Este facto faz-se sentir sobretudo em misturas com agregados de maiores dimensões. Como resultado verifica-se que algumas misturas que aparentemente seriam susceptíveis à deformação permanente têm bons resultados. Alguma literatura aconselha a que não se testem misturas com a máxima dimensão do agregado superior a 20 mm. Este equipamento utiliza uma roda com pneu de borracha com 90 mm de diâmetro, os provetes têm 180 mm de comprimento.
- O Asphalt Pavement Analyser, APA, tem uma largura de aplicação da carga, devido ao diâmetro do tubo de borracha, demasiado pequena, logo os resultados para misturas com agregados de maiores dimensões também não são muito fiáveis, permitindo que algumas misturas de qualidade inferior possam dar bons resultados. Este equipamento permite ensaiar provetes tipo laje ou provetes cilíndricos, neste caso, permite ensaiar seis provetes cilíndricos ou três tipo laje simultaneamente.
- O Hamburg Wheel Tracker ao utilizar uma roda de aço para aplicar a carga torna-se demasiado severo, uma vez que esta não se deforma como as de borracha, a pressão de carregamento pode ser muito superior à prevista. Desta forma, se uma mistura obtiver bons resultados neste ensaio esta deverá ter um bom comportamento quando em serviço. No entanto, pode haver misturas que não se comportam bem no ensaio e que teriam um bom comportamento em serviço, devido à severidade do ensaio. Assim, para este ensaio a utilização de critérios de aceitabilidade podem resultar na rejeição de misturas que teriam um comportamento aceitável em serviço. Este ensaio é realizado com os provetes submersos em água. Devido à acção da roda ser bastante agressiva para a mistura é possível também avaliar a resistência à desagregação entre o betume e o agregado da mistura. Este estudo é feito analisando o ponto de inflexão que se observa na curva do ensaio (Figura 3.10).

A pré-norma europeia prevê dois tipos diferentes de equipamentos para a realização destes ensaios. O wheel tracker pequeno, *small size device*, que é semelhante ao modelo incluído na norma inglesa existindo o modelo A e o modelo B (CEN, 2002). Existem ainda o modelo grande, *large size device*, e o extra-grande, *extra-large device*, que se assemelham mais ao equipamento do LCPC.

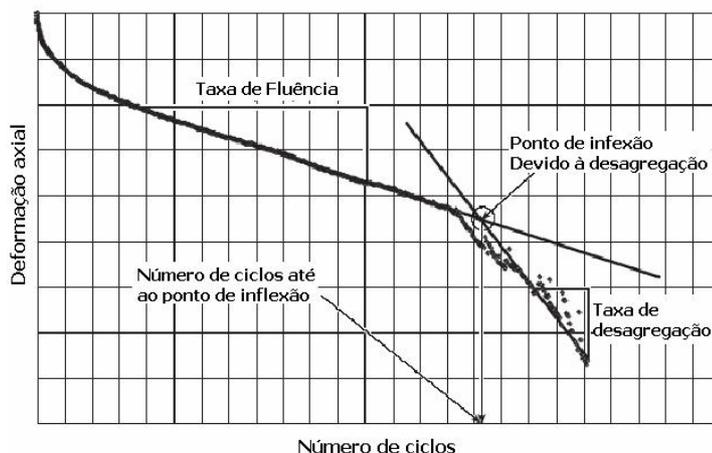


Figura 3.10 - Curva obtida em ensaio com o equipamento de simulação de Hamburg (Yildirim e Kennedy, 2001)

Os modelos mais pequenos assemelham-se bastante existindo apenas ligeiras diferenças. Os modelos pequenos realizam ensaios no ar ou em água (apenas o modelo B). Neste último caso os ensaios são mais prolongados. Estes equipamentos podem ensaiar provetes tipo laje ou provetes cilíndricos. A roda de aplicação da carga é em borracha maciça. O equipamento pequeno modelo A deriva directamente de normas já utilizados na Europa, nomeadamente em Inglaterra e Espanha (BSI, 1998 e DGC, 1984), e na Austrália (Austroads, 2001). No Japão também é utilizado este mesmo género de equipamento (Souza *et al.*, 2005). Na Figura 3.11 apresenta-se um exemplo de um equipamento pequeno modelo A.

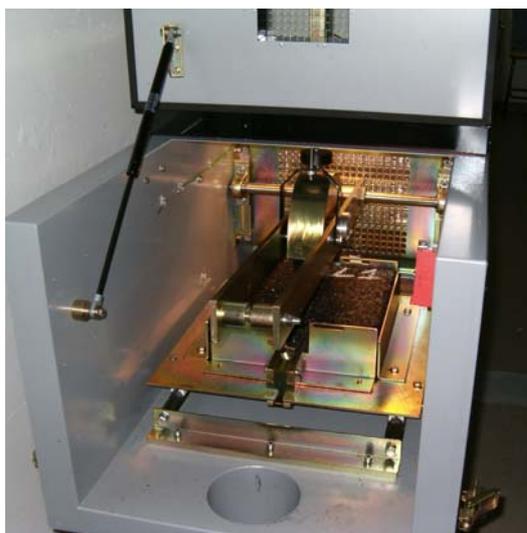


Figura 3.11 - Equipamento para a realização de ensaios de wheel tracking existente no Laboratório de Pavimentos do DEC-FCTUC.

Nos modelos grandes os ensaios são mais demorados. O condicionamento do provete e o ensaio são realizados em ar. Nestes equipamentos a carga é realizada através de uma roda pneumática com uma pressão de enchimento de 600 kPa que transmite uma carga de 5000 N ao provete (nos modelos pequenos a carga aplicada é de 700 N). Uma desvantagem destes equipamentos é a dimensão dos provetes. No caso do modelo extra-grande podem chegar a medir 690x490x60 mm. Estes equipamentos provêm do utilizado no LCPC, especialmente o equipamento grande, rectificando alguns dos pontos fracos que eram apontados a este equipamento.

Os ensaios de wheel tracking são *à priori* aqueles que mais facilmente poderão ser implementados em termos de mercado para utilização geral em termos de análise e controlo de qualidade (Brown *et al.*, 2001). São ensaios simples e cujo equipamento apresenta preços acessíveis. No entanto, é ainda necessário estabelecer características de ensaio e valores limites para os resultados, de forma a tornar mais consentânea a sua utilização e a interpretação dos resultados, nomeadamente, em termos de aceitação ou rejeição de uma mistura para ser utilizada num pavimento sujeito a determinadas acções de temperatura e de tráfego.

Os resultados do wheel tracking também podem ser representados na forma gráfica, obtendo-se curvas com forma semelhante à indicada para outros ensaios (ver Figura 3.3).

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 acção 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.

Os ensaios de simulação de tráfego em pista pretendem estudar o comportamento dos pavimentos em escala real. Neste caso o provete é, por assim dizer, um troço de pavimento, e a aplicação de cargas é realizada com rodados de camião, existindo alguns casos em que se realizaram troços experimentais com o carregamento realizado com camiões. Este tipo de equipamentos recebe correntemente a designação ALF (*Accelerated Load Facility*) e os ensaios de ALT (*Accelerated Load Testing*) ou APT (*Accelerated Pavement Testing*) pois pretendem simular de forma mais rápida o que acontece na realidade nos pavimentos.

Estes ensaios têm a vantagem de simular a realidade de forma mais satisfatória, quer no que se refere à estrutura do pavimento (número e constituição das camadas, fabrico e colocação), quer no que se refere à aplicação das cargas (valor da carga, dimensão, configuração, velocidade e distribuição lateral). Nem todos os equipamentos dispõem de todas estas possibilidades existindo diferenças entre eles, aliás, cada equipamento é por assim dizer único uma vez que são construídos de raiz seguindo as especificações desejadas.

Existe alguma variedade nestes equipamentos, alguns assemelhando-se a equipamentos de wheel tracking mas em escala real. Alguns situam-se em recintos fechados, estes têm a vantagem de factores como a temperatura e a humidade serem controlados, isto permite que se realizem estudos em que estes factores são conhecidos. Existem alguns que funcionam sob as condições atmosféricas existentes, tornando o ensaio mais real, mas tendo a desvantagem de os factores climáticos não serem controlados, apenas podendo ser monitorizados. Existem equipamentos que permitem as duas possibilidades e ainda alguns que são móveis podendo realizar os ensaios em troços reais.

Relativamente à sua configuração os equipamentos mais correntes são lineares, circulando o rodado ao longo de um eixo com um movimento de vaivém. Outros rodam em torno de um eixo central descrevendo os rodados trajectórias circulares. Existem depois equipamentos que são pistas de ensaios com uma dimensão superior, alguns a ser verdadeiros circuitos com veículos pesados a circularem ou então troços experimentais em estradas. Estes simulam a realidade da melhor forma (se for excluído o envelhecimento dos materiais), mas nos quais existem factores como, por exemplo, a temperatura e a humidade que podem ser medidos mas não são controlados, o que pode trazer alguns inconvenientes na realização de alguns estudos.

Os ensaios de simulação em pista têm relativamente aos referidos anteriormente, a desvantagem dos meios necessários e dos elevados custos envolvidos na sua construção e exploração. Ainda assim verifica-se um crescente número deste género de equipamentos existindo já algumas dezenas em todo o mundo das mais diversas configurações (COST 347, 2002).

Nos EUA contam-se mais de uma dezena, entre eles com configuração linear e em ambiente controlado podem referir-se o da Purdue University, o da Kansas State University KSU e o Ohio APLF e em ambiente não controlado podem referir-se o Louisiana ALF e o da FHWA.

Existem alguns equipamentos móveis, normalmente de configuração linear, que permitem testar pavimentos em estradas reais ou trabalhar em condições controladas dentro de hangares. Estes equipamentos são designados normalmente por HVS (*Heavy Vehicle Simulator*) entre estes podem referir-se o Texas MLS, o CAL-APT e o da FL-DOT. Existem

igualmente circuitos fechados e troços experimentais com tráfego real, como o MnRoad (troço experimental com sub-troços de tráfego real e sub-troços de tráfego controlado), o NCAT Pavement Test Track e o WesTrack (circuitos fechados com tráfego controlado).

Na Europa existem alguns destes equipamentos, podendo referir-se como exemplo de equipamentos lineares em ambiente controlado o Lintrack (na Holanda), o TRL Pavement Testing Facility (na Inglaterra), o LAVOC-EPFL (na Suíça) e o DRTM (na Dinamarca). Nos equipamentos lineares móveis podem referir-se o Nordic-HVS (associação entre a Suécia e a Finlândia, este é um equipamento HVS Mark-IV). Entre os equipamentos de referência está pista de ensaios do LCPC (França), que é um equipamento circular que trabalha em ambiente não controlado.

Com a configuração de circuito refere-se a pista de ensaios do CEDEX (Espanha), que é um circuito com a carga a ser realizada através de um rodado que circula num carril. No entanto devido à configuração do equipamento e às suas potencialidades ele é indicado como um simulador linear (COST 347, 2002), permitindo, devido ao facto de o rodado realizar o percurso do circuito e não um movimento de vaivém, simular uma maior gama de velocidades.

Têm ainda surgido equipamentos semelhantes mas que simulam a acção do tráfego não através de um rodado mas com uma placa de carga. Embora mais simples estes equipamentos já não simulam o tráfego de forma realista como os anteriormente descritos, permitem no entanto simular os carregamento de forma muito mais rápida. Estes equipamentos realizam um género de ensaio de compressão cíclico no pavimento real.

Apesar de serem equipamentos com custos de investimento e exploração elevados o seu número tem crescido de forma evidente, este facto deve-se sem dúvida às mais valias que estes equipamentos proporcionam em termos de desenvolvimento tecnológico. Assim, no âmbito programa COST 347 foi realizado um inventário destes equipamentos. Na Figura 3.12 pode observar-se a evolução do número destes equipamentos na Europa. De referir no entanto que na Europa não existe nenhuma pista de ensaios com a dimensão da MnRoad ou WesTrack (COST 347, 2002).

Existem também alguns equipamentos de referência fora dos EUA e da Europa, por exemplo, na Nova Zelândia (CAPTIF), Austrália (ALF) e Japão entre outros países. Apresentam-se, como exemplo, alguns destes equipamentos na Figura 3.13.

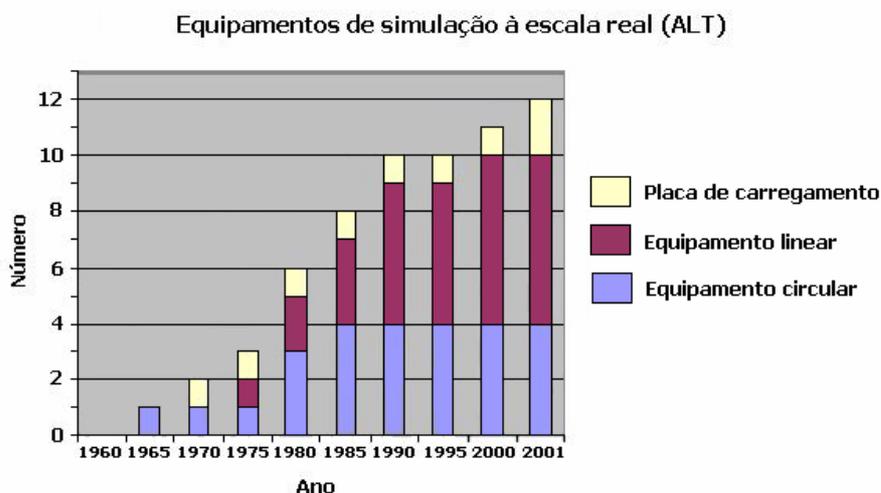


Figura 3.12 - Evolução do número de simuladores em escala real (ALT) na Europa (COST 347, 2002)



Figura 3.13 - Exemplo de simuladores de pista (pode observar-se o Lintrack T. U. Delft, o Nordic-HVS e a pista de ensaios do LCPC)

3.4 Considerações Finais

O Quadro 3.1 (adaptado de Capitão, 2003 e Brown *et al.*, 2001) resume a informação mais importante sobre os ensaios atrás referidos. Salientam-se para cada ensaio as principais vantagens e desvantagens relativas à sua utilização.

Quadro 3.1 - Características dos ensaios mais utilizados para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente

Tipo de Ensaio	Ensaio	Vantagens	Desvantagens
Ensaios Empíricos	Marshall	O equipamento é simples e encontra-se amplamente divulgado, encontrando-se em todos os laboratórios.	Não simula a acção do tráfego. Não apresenta resultados satisfatórios para previsão do desempenho à deformação permanente.
Ensaios Fundamentais	Compressão Uniaxial Estático	Ensaio com equipamento acessível. De fácil compreensão. Obtenção dos provetes acessível em obra e laboratório. Estado de tensão conhecido. Fornecer características do modelo de Burgers da mistura de forma directa.	Não simula acção dinâmica do tráfego pois a carga é estática. Pode não reflectir a influência do agregado na mistura.
	Compressão Uniaxial Cíclico	Simula a acção dinâmica do tráfego. Obtenção dos provetes é acessível em obra e laboratório. Estado de tensão conhecido.	Ensaio com equipamento mais complexo e mais dispendioso que o utilizado nos ensaios estáticos. Ao não impor confinamento, não permite simular estados de tensão próximos dos reais. Rotura do provete ocorre por fenómenos diferentes da realidade.
	Compressão Triaxial Cíclico	Simula acção dinâmica do tráfego e, ao impor confinamento, permite a utilização de tensões com valores próximos dos reais. Obtenção dos provetes é acessível em obra e laboratório. Estado de tensão conhecido.	Reproduz estados de tensão simplificados em relação aos que ocorrem no pavimento pois não permite a rotação de tensões. Exige um equipamento bastante complexo e dispendioso. A altura dos provetes pode ser um problema.
	Corte a Altura Constante	Permite determinar a deformação da mistura a volume constante. Aplica directamente tensões de corte no provete. A obtenção dos provetes em obra e laboratório é simples.	Equipamento muito complexo e bastante dispendioso. Resultados diferem por vezes dos obtidos noutros ensaios.
	Compressão Diametral	O equipamento é medianamente complexo e dispendioso (semelhante ao do ensaio de compressão uniaxial cíclico). A obtenção dos provetes em obra e laboratório é simples.	Campo de tensões não é uniforme. Devido às tensões terem uma forte componente de tracção a contribuição do agregado pode não ser devidamente contabilizada. Não permite utilizar gamas de temperaturas representativas mais elevadas.
	Cilindro Oco	Permite simular as tensões existentes no pavimento, incluindo a rotação de tensões.	Equipamento complexo e dispendioso. O fabrico dos provetes também é complexo. Não permite utilizar a gama mais alta de temperaturas representativas. Não permite a utilização de provetes de obra.
	Ensaios de Simulação	Simulação em Laboratório	Simula de forma eficaz a acção do tráfego. Comportamento semelhante ao verificado na realidade. Equipamento simples e de custos aceitáveis.
Simulação em Pista		Melhor aproximação possível à realidade. Tem grande valor científico pois permite efectuar estudos e obter conhecimentos que não são possíveis obter de outra forma.	Equipamentos extremamente dispendiosos, com custos de magnitude superior aos restantes ensaios. Algumas configurações não permitem controlar todos os parâmetros relevantes ao estudo.

3.5 Referências Bibliográficas

AASHTO (2001a). "Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus". *AASHTO T245*, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.

AASHTO (2001b). "Standard Test Method for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Test (SST)". *AASHTO TP7-01*, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.

ASTM (2001). "Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 inch-Diameter Specimens)". *ASTM D5581-98*, American Society for Testing and Materials, USA.

Austroroads (2001). "Deformation Resistance of Asphalt Mixtures by the Wheel Tracking Test". *AST01*, Austroroads, Australia.

Blajezowski, K., Nilsson, R., Hopman, P. and Sybilski, D. (1996). "Visco-Elastic Analysis of Typical Polish Flexible Pavements Using VEROAD". *Proceedings of the 2nd International Conference Durable and Safe Road Pavements*, Kielce, pp 12-23.

Brown, E. R., Kandhal, P. S. and Zhang, J. (2001). "Performance Testing for Hot Mix Asphalt (Executive Summary)". *NCAT Report No. 2001-05A*, NCAT Auburn University, Alabama.

BSI (1998). "Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas – Part 110: Methods of test for the determination of wheel tracking rate and depth". *BS 598-110*, BSI Standards, Great Britain.

Capitão, S. (2003). "Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Carswell, J. (2004). "Assessment of the Pulse Creep Test to Predict Asphalt Mixture Rutting Behaviour". *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobetume Congress*, Viena, CD edition, paper 042.

CEN (2002). "Test methods for hot mix asphalt – Wheel Tracking". *prEN 12697-22*, European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2001). “Bituminous mixtures – Test methods for mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test”. *prEN 12697-25*, European Committee for Standardization, Brussels.

Chen, J. and Liao, M. (2002). “Evaluation of Internal Resistance in Hot-Mix Asphalt (HMA) Concrete”. *Construction and Building Materials*, Elsevier Science, vol. 16, pp. 313–319.

COST 334 (2000). “COST 334 Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres, Final Report of the Action”. European Commission, Directorate General Transport, Office for official Publications of the European Communities, Luxembourg.

COST 347 (2002). “COST 347 Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing - Work Package 1: “Inventory””. European Commission, Directorate General Transport, Office for official Publications of the European Communities, Luxembourg.

DGC (1984). “Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio”. *NLT-173*, Dirección General de Carreteras, Ministerio del Fomento, España.

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.

SHRP (1994). “Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool”. *SHRP-A-698*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C..

Souza, R, Himeno, K. and Kobayashi, A. (2005). “Performance of Asphalt-Rubber Concrete Mixtures”. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV'04)*, Belfast, CD edition, paper 121.

TRB (2004). “New Simple Performance Tests for Asphalt Mixes”. *TRB E-C068*, Transportation Research Board, Washington D. C..

Westrack Forensic Team (2001). “Superpave Mixture Design Guide”. *Westrack Forensic Team Consensus Report*, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D. C..

Yildirim Y. and Kennedy T. (2001). “Correlation of Field Performance to Hamburg Wheel Tracking Device Results”. *Research Report 0-4185-1*, Center For Transportation Research, University of Texas, Austin.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Como referido o objectivo deste trabalho consiste em avaliar os ensaios de caracterização à deformação permanente de misturas betuminosas mais comuns. Uma vez que se pretende realizar essa avaliação para as condições portuguesas optou-se pela utilização uma mistura betuminosa de uso corrente em Portugal.

Assim, de forma a avaliar o desempenho dos ensaios optou-se pela utilização de um tipo de mistura cujo comportamento à deformação permanente é considerado bom, tendo a escolha recaído num macadame betuminoso. Para variar a susceptibilidade à deformação permanente foram utilizadas três misturas semelhantes em que se variou a sua percentagem em betume utilizando, no entanto, sempre a mesma granulometria. Optou-se pela utilização de misturas com estas características de forma a ser mais exigente a sua caracterização e classificação permitindo avaliar melhor as potencialidades e limitações dos ensaios.

Realizaram-se provetes em laboratório e recolheram-se provetes em obra que foram submetidos aos diferentes ensaios. Neste capítulo descrevem-se as características fundamentais das misturas utilizadas, os processos utilizados para fabrico dos provetes de laboratório e de obra e apresenta-se a descrição dos ensaios e dos procedimentos utilizados na sua realização.

4.1 Misturas Betuminosas Adoptadas no Trabalho

A escolha do tipo de mistura betuminosa teve como fundamentos os objectivos do trabalho. O principal objectivo não se prende com a análise de uma mistura específica mas antes compreender e avaliar os ensaios utilizados para caracterização à deformação permanente de misturas betuminosas. Assim, a escolha recaiu numa mistura rígida, com dimensão máxima de agregado apreciável mas que fosse plausível o seu estudo à deformação permanente.

Com base nestas premissas a mistura escolhida foi um macadame betuminoso com máxima dimensão do agregado de 25 mm. A mistura é designada como macadame betuminosa fuso A, conforme definido no Caderno de Encargos da JAE, actual E.P. E.P.E. (JAE, 1998). Esta mistura betuminosa é de utilização generalizada em Portugal, quer em obras novas como camada de regularização ou de base, quer em obras de conservação de pavimentos existentes.

4.1.1 Agregados e Granulometria

No Quadro 4.1 apresenta-se o fuso granulométrico definido no Caderno de Encargos.

Quadro 4.1 - Fuso granulométrico do macadame betuminoso fuso A conforme definido no Caderno de Encargos da JAE, actual E.P. E.P.E. (JAE, 1998)

ABERTURA DAS MALHAS DE PENEIROS ASTM	PERCENTAGEM ACUMULADA DO MATERIAL QUE PASSA Fuso A
37,5 mm (1 1/2")	--
25,0 mm (1")	100
19,0 mm (3/4")	95 -100
12,5 mm (1/2")	60 - 91
9,5 mm (3/8")	51 - 71
4,75 mm (nº 4)	36 - 51
2,00 mm (nº 10)	26 - 41
0,850 mm (nº 20)	17 - 32
0,425 mm (nº 40)	11 -25
0,180 mm (nº 80)	5 - 17
0,075 mm (nº 200)	2 - 8

O Caderno de Encargos refere ainda as características a que os agregados da mistura devem obedecer, nomeadamente:

- A curva granulométrica dentro dos limites especificados apresentará, ainda, uma forma regular.
- Perda por desgaste na máquina de Los Angeles (Granulometria A), máxima.....40%
- Índices de lamelação e alongamento, máximos.....30%
- Equivalente de areia da mistura de agregados, mínimo.....50%
- Valor de azul de metileno (material de dimensão inferior a 75 µm), máximo0,8
- Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes, máxima.....3%

Devendo a mistura betuminosa, realizada com o fuso granulométrico indicado ter as seguintes propriedades:

- Número de pancadas em cada extremo do provete.....75

- Força de rotura.....8000 a 15 000 N
- Deformação, máxima.....4 mm
- Valor de VMA (percentagem de Vazios na Mistura de Agregados), mínimo.....13%
- Porosidade^(*).....4 - 6%
- Relação ponderal filer (material de dimensão inferior a 75 μ m)/betume.....1,1 - 1,5
- Resistência conservada, mínima.....70%

(*) Os cálculos da porosidade devem ser efectuados com base na baridade máxima teórica, determinada pelo método do picnómetro de vácuo (ASTM D 2041) para a percentagem óptima de betume da mistura em estudo.

Os agregados foram recolhidos nos estaleiros da empresa Rosas Construtores em Aveiro. Recolheram-se e caracterizaram-se os seguintes agregados: brita 15/25; brita 5/15; brita 0/5; e filer comercial, no Quadro 4.2 é apresentada a sua granulometria. Todos os agregados utilizados foram de natureza calcária.

Quadro 4.2 - Granulometria dos agregados utilizados no fabrico da mistura betuminosa (percentagem de passados nos peneiros da série ASTM)

Peneiro ASTM	1"	3/4"	1/2"	3/8"	nº4	nº10	nº 20	nº40	nº80	nº200
Abertura da malha [mm]	25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,85	0,425	0,18	0,074
Brita 15/25	100,0	92,1	21,4	2,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
Brita 5/15	100,0	100,0	96,9	74,8	9,7	3,0	2,3	2,1	1,8	1,6
Brita 0/5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	84,1	50,5	31,3	18,4	11,8
Filer	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,65	99,55	99,35	86,0

Nos ensaios de caracterização efectuados aos agregados obtiveram-se os resultados que são apresentados no Quadro 4.3. Verifica-se que as propriedades caracterizadas cumprem o exigido no Caderno de Encargos, pelo que estes agregados podem ser utilizados no fabrico de um macadame betuminoso com o fuso A.

Quadro 4.3 - Propriedades caracterizadas laboratorialmente para as diversas fracções granulométricas

Fracção Granulométrica	Brita 15/25	Brita 5/15	Brita 0/5	Filer
Baridade [g/cm ³] (NP-581 e EN1097-7)	2,59	2,60	2,68	2,65
Absorção [%] (NP-581)	1,5	1,4	-	-
Valor de Adsorção de Azul de Metileno (NF P 18-592)	-	-	0,70	0,16
Los Angeles (LNEC E-237)	33	29	-	-
Índice de Alongamento [%] (BS 812)	23	28	-	-
Índice de Lamelação [%] (BS 812)	18	17	-	-

A curva final da mistura foi obtida de forma a enquadrar-se o melhor possível dentro dos limites impostos pelo Caderno de Encargos. No Quadro 4.4 apresentam-se as percentagens ponderais de cada agregado utilizadas para o fabrico da mistura. É de assinalar que não foi usada qualquer percentagem de filer comercial devido à grande quantidade de finos presentes na brita 0/5. A curva da mistura de agregados tem um andamento que se encontra dentro dos limites impostos pelo CE e encontra-se representada na Figura 4.1.

Quadro 4.4 - Percentagem relativamente ao peso de cada fracção granulométrica na mistura de agregados

Fracção Granulométrica	Percentagem na Mistura
Brita 15/25	29
Brita 5/15	27
Brita 0/5	44
Filer	0

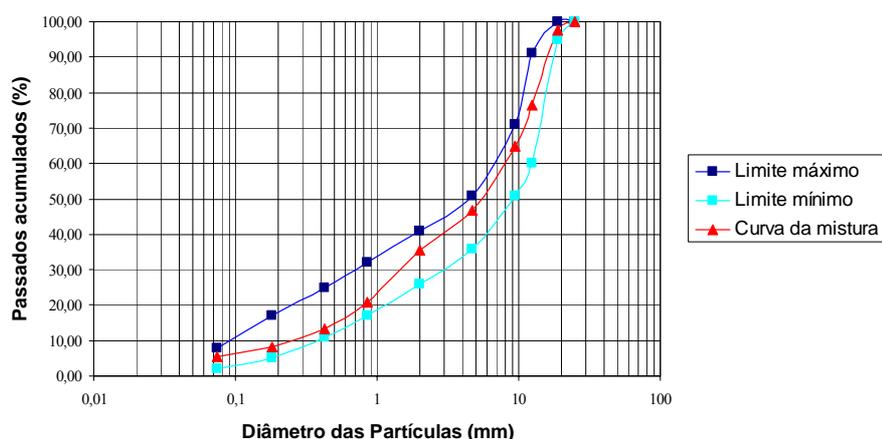


Figura 4.1 - Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada no fabrico da mistura betuminosa e limites impostos pelo CE da JAE, actual E.P. E.P.E.

Para a determinação da percentagem em betume a utilizar não se realizou o método Marshall, adoptando-se antes três valores correntes na prática, e que diferissem entre si de 0,5%. Esta variação permitiu obter misturas com comportamento diferenciado à deformação permanente de forma a avaliar a sensibilidade dos ensaios na distinção do seu comportamento.

A percentagem de betume média foi obtida utilizando a equação (11) (JAE, 1998). O CE indica valores do módulo de riqueza em betume, K, entre 3,0 e 3,5 para camadas de base e entre 3,0 a 3,8 para camadas de regularização. No entanto estes valores são referidos para camadas realizadas a frio, na literatura a gama referida para o valor de K varia entre 2,5 a 3,5 (Picado Santos e Baptista, 2004).

$$Pb = K \times F \times \sqrt[3]{Se} \quad (11)$$

com:

$$Se = (1/100) \times (0,25 \times S1 + 2,3 \times S2 + 12 \times S3 + 135 \times f1)$$

S1 - %retido no #6,3mm

S2 - %entre 6,3 e 0,315mm

S3 - %entre 0,315 e 0,075mm

f1 - %passado no #0,075mm

K = 2,75

F = 2,65/ ρ_a , em que ρ_a é a massa volúmica da mistura de agregados.

Assim, procurando obter misturas rígidas optou-se por um valor de K no extremo inferior do intervalo recomendado. Para tal utilizou-se o valor médio entre 2,5 e 3,0, ou seja K=2,75. Para este valor de K a equação (11) fornece o valor da percentagem em betume de 4,2%.

O Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, (JAE, 1995), indica que para o macadame betuminoso 0/25, a usar em camada de base ou de regularização o teor em betume, tb, deverá estar compreendido entre 4,0 e 4,8%. O que traduzido em percentagem de betume conduz ao intervalo 3,8 a 4,6% e ao valor médio de 4,2%, valor igual ao obtido pela equação (11). A equação (12) traduz matematicamente a relação entre a percentagem em betume o teor em betume.

$$Pb = \frac{tb}{1 + tb} \quad (12)$$

Considerando como percentagem média de betume 4,2% variou-se de 0,5% para baixo e para cima. O que significa que se utilizaram percentagens em betume de 3,7%, 4,2% e 4,7%.

Pensa-se que estas percentagens em betume traduzem o que é corrente ser utilizado na prática, fornecendo misturas com boa resistência à deformação permanente.

Considerando as características da mistura e as percentagens de betume utilizadas, é de esperar que a mistura com menor percentagem em betume se comporte melhor à deformação permanente. Com o aumento da percentagem em betume a resistência à deformação permanente das misturas irá diminuir.

Para a realização das misturas optou-se por utilizar um betume corrente em Portugal, a escolha recaiu num betume da classe 50/70. O plano de trabalhos incluiu a realização de provetes em laboratório e em obra. Os provetes de laboratório foram realizados com o betume previsto, no entanto, por questões de produção da central os trechos experimentais onde foram recolhidos os provetes para este trabalho foram realizados com betume 35/50. A forma como decorreu o trabalho indica que este facto, mesmo limitando algumas análises, permitiu abordar questões relevantes. Os princípios que ladearam a realização dos provetes em laboratório e em obra são apresentados em seguida.

4.2 Produção em Laboratório

As misturas betuminosas realizadas em laboratório seguiram a curva granulométrica já apresentada. Foram realizadas misturas com 3,7%, 4,2% e 4,7% de percentagem em betume. O betume utilizado na realização das misturas em laboratório foi um betume 50/70, cuja caracterização laboratorial forneceu os seguintes resultados:

- Penetração a 25 °C, Pen₂₅ – 60 dmm.
- Temperatura de Amolecimento Anel-Bola, Tab – 49 °C.

Após o fabrico e ensaio dos provetes foi recuperado betume e realizada novamente a sua caracterização, obtendo-se os seguintes resultados:

- Penetração a 25 °C, Pen_{25r} – 43 dmm.
- Temperatura de Amolecimento Anel-Bola, Tab_r – 54 °C.

O processo de fabrico dos provetes foi distinto para os diferentes ensaios, excepto para os ensaios de compressão uniaxial cíclico e triaxial cíclico em que os provetes foram realizados de forma análoga.

Assim, para o ensaio de wheel tracking os provetes, com forma de laje, foram compactados utilizando um pequeno cilindro de rolos com vibração. Os provetes para os ensaios de compressão uniaxial cíclico e triaxial cíclico foram compactados por vibro-compressão utilizando para isso um pequeno equipamento de placa vibratória. Para o ensaio de corte a

altura constante foram realizadas diferentes séries utilizando ambos os processos de compactação referidos. Mais adiante serão pormenorizados os processos de fabrico dos provetes para cada ensaio.

4.3 Produção em Obra

Para a obtenção dos provetes de obra foram realizados trechos experimentais em que os processos de fabrico, colocação e compactação foram em tudo semelhantes aos correntemente utilizados em obra (Picado Santos e Baptista, 2004).

Por razões relacionadas com a recolha de provetes para outros estudos foram construídos três troços experimentais com aproximadamente 20 metros de comprimento por 2,6 metros de largura. Os troços foram construídos nos estaleiros da Rosas Construtores em Aveiro. Na Figura 4.2 mostra-se um aspecto da compactação dos troços experimentais. A espessura final das camadas foi de 10 cm, existiu no entanto alguma variabilidade neste valor como se verá adiante.



Figura 4.2 - Realização dos troços experimentais nos estaleiros da Rosas Construtores

Para a realização dos troços experimentais foram utilizados os agregados caracterizados em laboratório. A curva granulométrica da mistura foi semelhante à de laboratório, apenas mudando entre os troços a percentagem em betume. As percentagens em betume foram iguais às de laboratório, ou seja, 3,7%, 4,2% e 4,7%. As temperaturas de compactação foram na ordem dos 120°C.

No entanto, para realização dos troços experimentais o betume que se encontrava disponível na central de produção da Rosas Construtores em Aveiro era um betume 35/50. Assim não foi

possível realizar estes troços com um betume 50/70 como previsto, utilizando-se o betume disponível, da classe 35/50. A sua caracterização forneceu os seguintes valores:

- Penetração a 25 °C, Pen25 – 39 dmm.
- Temperatura de Amolecimento Anel-Bola, Tab – 52°C.

Após o fabrico e ensaio dos provetes foi recuperado betume destes. Este foi caracterizado obtendo-se os seguintes valores:

- Penetração a 25 °C, Pen25_r – 32 dmm.
- Temperatura de Amolecimento Anel-Bola, Tab_r – 56°C.

A percentagem de betume utilizada nos troços experimentais foi determinada pelo método da incineração (ASTM, 1998) os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.5 (Picado Santos e Baptista, 2004).

Quadro 4.5 - Percentagens de betume observadas nos troços experimentais e em obra

Troço	Pb prevista [%]	Pb real [%]
A	3,7	3,6
B	4,2	4,1
C	4,7	4,6

Verifica-se que as percentagens de betume em obra não diferem significativamente das previstas, sendo a diferença de 0,1%. Atendendo que estes valores estão sujeitos a alguma imprecisão e a alguma variabilidade não se considera esta diferença significativa. Assim, opta-se por manter nos provetes de obra as indicações de 3,7%, 4,2% e 4,7%, embora os valores determinados sejam inferiores em 0,1%.

A recolha de provetes para o ensaio de wheel tracking realizou-se serrando lajes do pavimento, para os restantes ensaios utilizou-se uma caroteadora com coroa de corte com diâmetro de 150 mm.

4.4 Caracterização da Mistura Pelo Ensaio de Marshall

Como forma de caracterizar a mistura foram realizados ensaios Marshall em provetes realizados em laboratório e em obra. Este ensaio é utilizado para formulação de misturas betuminosas em Portugal, sendo os seus resultados utilizados para a caracterização de misturas betuminosas. Apesar de as percentagem em betume utilizadas não terem sido obtidas pelo método Marshall, considerou-se relevante a caracterização das misturas por este ensaio. Foi também realizado o procedimento para determinação da resistência conservada (USACE, 1995).

4.4.1 Fabrico dos Provetes

O ensaio foi realizado seguindo a NP-142 (IGPAI, 1968). Em laboratório a compactação dos provetes é realizada por apiloamento, sendo aplicadas 75 pancadas a cada lado do provete (JAE, 1998). Foi utilizado um compactador mecânico para a compactação dos provetes (ver Figura 4.3a).

No Quadro 4.6 apresentam-se as baridades e porosidades dos provetes de laboratório para o ensaio de Marshall. Foram ensaiados três provetes por série.

Quadro 4.6 - Propriedades dos provetes de laboratório para o ensaio de Marshall

Provete	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Vv [%]
A8	3,7	2,349	6,8
A5	3,7	2,349	6,7
A4	3,7	2,341	7,0
B2	4,2	2,348	5,7
B3	4,2	2,369	4,9
B4	4,2	2,344	5,9
C5	4,7	2,394	3,6
C4	4,7	2,366	4,7
C2	4,7	2,364	4,8

Os provetes de obra para a realização do ensaio Marshall foram carotados utilizando uma coroa de 100 mm de diâmetro de forma a ficarem com o diâmetro final. No entanto devido ao facto de apresentarem uma altura superior ao desejado foram cortados para ficarem com a altura requerida.

No Quadro 4.7 apresentam-se as propriedades dos provetes de obra. Para os provetes de obra apenas se ensaiaram dois provetes por série (Picado Santos e Baptista, 2004).

Quadro 4.7 - Propriedades dos provetes de obra para o ensaio de Marshall

Provete	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Vv [%]
A1-2	3,7	2,361	5,7
A1-4	3,7	2,341	6,5
A2-2	4,2	2,360	5,5
A2-4	4,2	2,408	3,6
A3-2	4,7	2,412	3,2
A3-4	4,7	2,426	2,7

4.4.2 Resultados Obtidos no Ensaio Marshall

O ensaio Marshall é realizado a 60°C. Os provetes são acondicionados em água a 60°C durante 30 minutos (ver Figura 4.3b). O provete é depois comprimido diametralmente no estabilómetro com uma velocidade constante de 50 mm/min (ver Figura 4.3c).

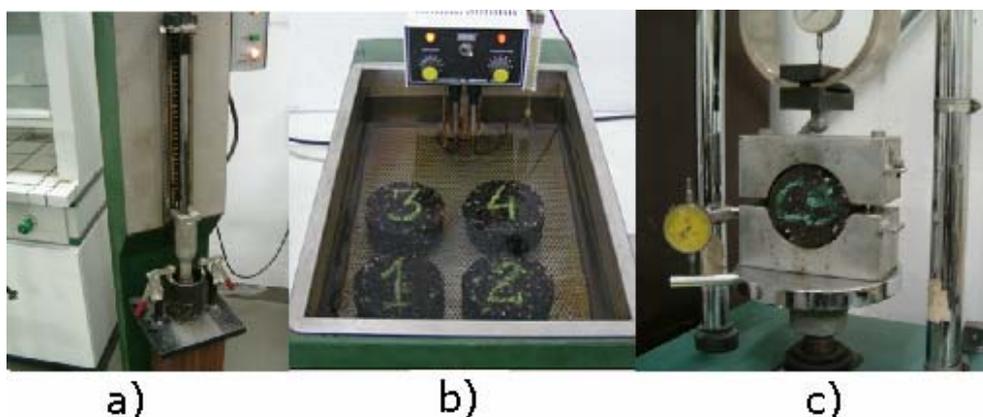


Figura 4.3 - Diferentes fases do ensaio Marshall

Os valores retirados do ensaio são a força máxima suportada pelo provete, designada por força de rotura ou estabilidade de Marshall. Para o momento em que ocorre a rotura do provete é anotada a deformação do provete. A resistência conservada é a relação entre a força de rotura assim determinada e a obtida após os provetes estarem 24 horas imersos em água a 60°C. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Resultados obtidos no ensaio Marshall e resistência conservada

Pb [%]	F. Rot. [kN]	Def. rot. [mm]	Resist. Cons. [%]
3,7	9,7	3,8	66
4,2	8,1	3,6	90
4,7	8,2	3,8	100

Os resultados do ensaio Marshall mostram que as misturas cumprem o que é exigido no CE (JAE, 1998). No entanto a resistência conservada da mistura com a percentagem em betume de 3,7% apresenta um valor inferior ao exigido. Obteve-se o valor de 66%, quando o exigido como mínimo no CE é de 70%.

Este valor não surpreende uma vez que o objectivo das percentagens em betume escolhidas é representar valores utilizados, neste caso representar um valor próximo do mínimo possível (apesar de este valor já não respeitar a resistência conservada). O CE indica ainda que para o

macadame betuminoso fuso B, em que o método de Marshall não é aplicável devido à máxima dimensão do inerte, uma percentagem mínima em betume de $4,3\% \pm 0,3\%$.

Assim, pode verificar-se que 3,7% é uma percentagem abaixo do que é desejável, não garantido a durabilidade da mistura em obra. No entanto para o objectivo pretendido não se considera inconveniente o uso desta percentagem em betume.

Os resultados deste ensaio podem ser utilizados para a deformação permanente, como referido. No entanto, são bastantes as limitações apresentadas pelo ensaio e na Europa esta abordagem não tem sido seguida nem está prevista. Não se julga assim conveniente realizar a análise da caracterização à deformação permanente com base neste ensaio.

4.5 Ensaio de Wheel Tracking

O equipamento de wheel tracking utilizado foi o Wessex 867 Wheel Tracking Machine, que é um equipamento considerado, de acordo com a pré-norma prEN 12697-22, de pequena dimensão, *Small size device model A* (CEN, 2002). Nestes equipamentos o provete é condicionado e ensaiado à temperatura desejada através do aquecimento do ar na câmara de ensaio.

4.5.1 Realização dos Provetes em Laboratório

Os provetes ensaiados foram lajes com 305x305x80 mm. A prEN 12697-22 indica estas dimensões para os provetes, variando a espessura com a máxima dimensão do agregado. Para misturas com a máxima dimensão de agregado entre 22 mm e 32 mm a espessura de laje indicada é de 80 mm. Esta é também a altura máxima das lajes recomendada para o equipamento utilizado.

Cada laje pesa aproximadamente 18 kg o que poderá apresentar dificuldades de fabrico em laboratórios que não possuam equipamento de mistura de dimensão adequada.

Os provetes realizados em laboratório foram compactados em molde de madeira com as dimensões finais. A temperatura de compactação foi de 135°C. A compactação foi realizada com a ajuda de um pequeno cilindro de rolos utilizando vibração (Figura 4.4). A quantidade de mistura colocada no molde foi determinada de forma que o volume de vazios das lajes após compactação fosse próximo dos 4 %. Após a colocação da mistura no molde compactou-se até se obter uma superfície nivelada.



Figura 4.4 - Compactação dos provetes laje em laboratório para o ensaio de wheel tracking

Na Figura 4.5 apresenta-se o aspecto de um provete laje realizado em laboratório para o ensaio de wheel tracking.



Figura 4.5 - Provede fabricado em laboratório em forma de laje com 305*305*80 mm para o ensaio de wheel tracking

Constatou-se que as principais dificuldades envolvem a quantidade de mistura a realizar e a necessidade de a compactação destes provetes exigir um cilindro de pequenas dimensões. Este último facto tem no entanto a vantagem de aproximar a forma como se realiza a compactação de provetes em laboratório com a realizada em obra.

As características dos provetes produzidos em laboratório e submetidos ao ensaio de wheel tracking apresentam-se no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Características dos provetes realizados em laboratório para o ensaio de wheel tracking

Laje	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Vv [%]	Dimensões [mm]
L5	Laboratório	3,7	2,398	4,8	307*308*82
L6	Laboratório	3,7	2,387	5,2	308*306*82
L2	Laboratório	4,2	2,355	5,5	306*305*84
L7	Laboratório	4,2	2,383	4,3	307*303*82
L3	Laboratório	4,7	2,374	4,4	308*308*83
L4	Laboratório	4,7	2,393	3,6	305*307*82

4.5.2 Realização dos Provetes em Obra

Os provetes foram cortados *in situ* em lajes de 350x350mm tendo sido depois cortados com uma serra circular de forma a apresentarem as dimensões exigidas para prEN 12697-22 de 305x305mm.

Os provetes cortados do pavimento tinham a altura da camada colocada em obra, desta forma, também foram cortados na altura de forma a terem aproximadamente 80 mm de altura. A face cortada foi a face inferior uma vez que se apresentava bastante irregular. O corte não permitiu obter uma face regular, os provetes foram então rectificados de forma a ficarem com as faces lisas e paralelas. Esta operação permitiu melhores condições para a realização do ensaio, pois as irregularidades existentes nas faces dos provetes podem provocar um movimento saltitante da roda durante o ensaio. Na Figura 4.6 apresenta-se uma imagem da rectificação dos provetes de obra.



Figura 4.6 - Rectificação das faces dos provetes laje de obra para o ensaio de wheel tracking

No Quadro 4.10 apresentam-se as características dos provetes recolhidos em obra para o ensaio de wheel tracking.

Quadro 4.10 - Características dos provetes de wheel tracking de obra

Laje	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Vv [%]	Dimensões [mm]
LA1-2	Obra	3,7	2,348	6,2	299*299*73
LA1-5	Obra	3,7	2,339	6,6	299*299*78
LA1-6	Obra	3,7	2,346	6,3	299*299*79
LA2-1	Obra	4,2	2,364	5,3	299*299*76
LA2-2	Obra	4,2	2,398	4,0	299*298*72
LA2-4	Obra	4,2	2,402	3,8	299*298*80
LA3-3	Obra	4,7	2,390	4,1	300*299*78
LA3-5	Obra	4,7	2,396	3,9	299*299*77
LA3-6	Obra	4,7	2,399	3,8	299*299*76

4.5.3 Procedimentos de Ensaio

O procedimento de ensaio seguido foi o descrito na prEN 12697-22 (CEN, 2002), que define de forma clara algumas das condições de ensaio, nomeadamente dimensões dos provetes e forma de carregamento. Existem outras condições, como por exemplo, a temperatura, que a norma deixa em aberto.

É comum estes ensaios serem realizados com temperaturas que variam entre 40°C a 60°C. Em Portugal as temperaturas nos pavimentos podem atingir valores elevados, e algumas normas referem como temperatura de ensaio os 60°C (DGC, 1984 e BSI,1998).

No entanto, esta temperatura pode não ser representativa excepto nas zonas mais quentes de Portugal (Freire, 2002 e Capitão, 2003). Assim, optou-se por uma temperatura de 45°C, a escolha desta temperatura para a realização dos ensaio fundamentou-se nos seguintes aspectos:

- É uma temperatura representativa da gama de temperaturas para a zona média (Freire, 2002);
- Permite também que a mistura apresente um comportamento mais rígido do que utilizando temperaturas superiores, o que favorece a avaliação da sensibilidade dos ensaios;
- A utilização de temperaturas mais elevadas não se justifica pois esta mistura é utilizada em camadas de regularização e base betuminosa pelo que não estão sujeitas a temperaturas extremas como as camadas de desgaste;
- Considerou-se importante que a temperatura utilizada se situasse abaixo da temperatura de amolecimento anel-bola dos betumes utilizados, isto permite que o betume apresente uma

parcela de resistência à deformação permanente. Esta parcela de resistência da mistura devido ao betume reduz-se com a utilização de temperaturas em que este apresente viscosidades baixas. Este aspecto requer maior acuidade sempre que se utilizam betumes de viscosidades diferentes. A temperatura escolhida permite incluir as diferentes parcelas de resistência das misturas betuminosas na caracterização a efectuar pelos diferentes ensaios.

A temperatura de ensaio de 45°C foi utilizada em todos os ensaios, não só com base nas razões apresentadas, mas de forma a permitir uma melhor comparação entre os resultados dos diversos ensaios.

As lajes foram acondicionadas a 45°C, em ar, dentro da câmara do Wheel-Tracker durante 7 horas. A pré-norma especifica um tempo mínimo de 6 horas e um máximo de 24 horas. Após o acondicionamento foram ensaiadas com a temperatura de ensaio mantida constante.

Os ensaios têm a duração de 45 minutos, com uma frequência de 21 ciclos por minuto (cada ciclo corresponde a duas passagens da roda (CEN, 2002)). A pré-norma não especifica a tensão de contacto da roda, indicando que esta deve aplicar uma carga de 700 N ao provete. Uma avaliação rápida realizada em laboratório permitiu estimar a tensão de contacto da roda em aproximadamente 700 kPa.

Foram ensaiados 6 provetes em laboratório e recolhidos 9 provetes em obra. A face de ensaio foi a contrária à da compactação para todos os provetes.

A velocidade da roda é menor nos limites exteriores do provete, junto às faces, e anula-se quando a roda muda de sentido. Desta forma podem verificar-se deformações verticais superiores nestas zonas do provete. A própria configuração das placas de apoio do provete pode potenciar este efeito, pois têm um rasgo na direcção de andamento da roda o que provoca falta de apoio na face lateral do provete na zona onde esta muda de sentido. No entanto, devido à rigidez da mistura e à temperatura de ensaio este efeito não se verificou.

Apresenta-se na Figura 4.7 uma laje após ter sido ensaiada, pode observar-se que a deformação na zona de passagem do pneu é uniforme.



Figura 4.7 - Provetes laje após realização do ensaio de wheel tracking

4.6 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico

O procedimento utilizado para a realização do ensaio é o descrito na prEN 12697-25a (CEN, 2001). O equipamento usado não foi um equipamento comercial, tratando-se de um equipamento desenvolvido no DEC da Universidade de Coimbra especificamente para a realização deste género de ensaios.

4.6.1 Realização dos Provetes em Laboratório

Os provetes de laboratório foram compactados em moldes cilíndricos utilizando um compactador de placa vibratória Kango, conforme representado na Figura 4.8. Foi aplicado um tempo de compactação de 1,5 minutos em cada face do provete. A temperatura de compactação foi de 135 °C. Os provetes foram compactados em moldes cilíndricos com o diâmetro de 150 mm de forma a ficarem com o diâmetro final.

A compactação dos provetes por este método não garante que os provetes tenham as faces paralelas. Deste modo, realizaram-se provetes com altura superior à desejada em cerca de 5 mm, estes foram posteriormente rectificadas de forma a ficarem com as faces paralelas e com aproximadamente 100 mm de altura (ver Figura 4.9). A rectificação foi realizada com cuidado de forma a que além de paralelas as faces sejam o mais possível perpendiculares ao eixo do provete.



Figura 4.8 - Compactação em laboratório dos provetes para o ensaio de compressão uniaxial cíclico utilizando um equipamento de vibro-compactação tipo Kango



Figura 4.9 - Rectificação dos provetes para o ensaio de compressão uniaxial cíclico

No Quadro 4.11 apresentam-se as principais características dos provetes fabricados em laboratório. Pode observar-se que foi conseguida uma boa homogeneidade de fabrico. Os volumes de vazios encontram-se dentro dos valores habituais em pavimentos, excepto um ou outro caso pontual. Na série com 3,7 % de betume um dos provetes foi rejeitado por se verificarem problemas durante o seu fabrico, portanto apenas se apresentam três resultados para esta série.

Quadro 4.11 - Características dos provetes realizados em laboratório para o ensaio de compressão uniaxial cíclico

Provete	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Vv [%]
PL15	Laboratório	3,7	2,376	152	102	5,7
PL16	Laboratório	3,7	2,395	152	102	4,9
PL17	Laboratório	3,7	2,364	152	102	6,2
PL02	Laboratório	4,2	2,417	152	100	3,0
PL03	Laboratório	4,2	2,417	152	93	3,0
PL04	Laboratório	4,2	2,421	152	91	2,8
PL05	Laboratório	4,2	2,443	152	89	1,9
PL20	Laboratório	4,7	2,421	152	95	2,5
PL09	Laboratório	4,7	2,409	152	93	3,0
PL11	Laboratório	4,7	2,372	152	99	4,5
PL10	Laboratório	4,7	2,419	152	95	2,6

4.6.2 Realização dos Provetes em Obra

Os provetes de obra foram carotados directamente nos trechos experimentais utilizando uma caroteadora com coroa de 150 mm, desta forma os provetes foram carotados com o seu diâmetro final. Na Figura 4.10 pode observar-se a carotagem destas provetes.



Figura 4.10 - Carotagem dos provetes de obra para o ensaio de compressão uniaxial cíclico

No entanto, os provetes apresentavam a face inferior bastante irregular, com agregados de grandes dimensões da sub-base colados por efeito da rega de colagem (Figura 4.11). Observa-

se também na Figura 4.11 que os alguns provetes apresentavam após carotagem uma altura total inferior a 100 mm. Esta situação apresentava-se com maior acuidade nos provetes do troço A-1 e A-2 devido à espessura de colocação da mistura em obra ter inferior aos 100 mm nestes troços. No troço A-3, pelo contrário, a espessura final da camada betuminosa foi superior a 100 mm (Figura 4.12).



Figura 4.11- Provetes de obra do troço A-1 ($P_b = 3,7\%$) para o ensaio de compressão uniaxial cíclico antes do corte e rectificação



Figura 4.12 - Provetes de obra do troço A-3 ($P_b = 4,7\%$) para o ensaio de compressão uniaxial cíclico antes do corte e rectificação

Procedeu-se ao corte da face inferior dos provetes e à posterior rectificação das faces dos provetes de modo a ficarem lisas, paralelas e sem irregularidades, analogamente ao realizado para os provetes de laboratório (Figura 4.13).

No Quadro 4.12 podem observar-se as características dos provetes recolhidos em obra.



Figura 4.13 - Corte da face inferior dos provetes para o ensaio de compressão uniaxial cíclico

Quadro 4.12 - Características dos provetes de obra para o ensaio de compressão uniaxial cíclico

Provete	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	V _v [%]
A-1-1	Obra	3,7	2,389	151	86	4,6
A-1-2	Obra	3,7	2,362	151	82	5,7
A-2-1	Obra	4,2	2,395	152	88	4,1
A-2-2	Obra	4,2	2,420	152	91	3,1
A-3-1	Obra	4,7	2,390	152	107	4,1
A-3-2	Obra	4,7	2,426	152	96	2,7

4.6.3 Procedimentos de Ensaio

O ensaio de compressão uniaxial cíclico consiste em submeter o provete de mistura betuminosa a uma carga cíclica de compressão axial.

Segundo o procedimento da norma prEN 12697-25, apesar de este ensaio ser uniaxial consegue-se um certo grau de confinamento, pois o diâmetro da placa que aplica o carregamento é inferior ao diâmetro do provete (CEN, 2001). No entanto neste ensaio não se podem simular as temperaturas e pressões de carregamento que se verificam na realidade pois isso iria levar a uma rotura demasiado rápida do provete, não se obtendo os resultados pretendidos.

As dimensões dos provetes utilizadas foram de 100 mm de altura e 150 mm de diâmetro. Esta relação altura/diâmetro é baixa, aconselhando-se a utilização de relações mais elevadas. O principal inconveniente da relação altura/diâmetro ser baixa está relacionado com o efeito fronteira. Em provetes com uma baixa relação altura/diâmetro as tensões tangenciais de atrito

existentes entre o provete e as placas de carregamento geram campos de tensões não uniformes no provete que podem influenciar os resultados.

Para minimizar este efeito no ensaio de compressão uniaxial cíclico as placas de carregamento foram lubrificadas com uma mistura de pó-de-talco e de glicerina. O objectivo é minimizar o atrito entre as placas e o provete, diminuindo o efeito de fronteira e permitindo uma distribuição de tensões mais homogénea no provete, conforme aconselhado na prEN 12697-25.

A obtenção de relações altura diâmetro elevadas torna-se complexa quando se utilizam provetes com 150 mm de diâmetro tanto em obra, devido à espessura das camadas, como em laboratório, por possíveis dificuldades na compactação. A opção de colocar dois provetes sobrepostos vem tornar o ensaio mais trabalhoso, exigindo a realização de mais carotes e provetes, apenas se justificando em camadas mais delgadas (como sejam as camadas de desgaste).

Refira-se que a altura mínima aconselhada para os provetes é de 6 cm, devendo-se colocar dois provetes sobrepostos caso apresentem altura inferior a este valor. A altura mínima individual de cada provete é de 2,5 cm, mas a altura do conjunto a ensaiar deve ser sempre superior a 6 cm. Este procedimento obriga a duplicar o número de provetes carotados para camadas de desgaste uma vez que estas apresentam habitualmente espessuras inferiores ao recomendado.

A temperatura de ensaio escolhida foi de 45°C, temperatura que se considera adequada para a mistura em questão, como anteriormente referido. Os provetes foram condicionados a 45°C ao ar em câmara térmica durante 6 horas após o qual foram ensaiados. O equipamento de ensaio encontra-se envolvido pela câmara térmica pelo que a temperatura foi mantida constante durante todo o ensaio respeitando a tolerância exigida pela pré-norma.

Adoptou-se um carregamento sinusoidal com uma tensão máxima de 150 kPa, com tempos de carregamento e de repouso de 1 segundo. A Figura 4.14 representa o carregamento e a deformação axial obtida como resposta. O tempo de carregamento foi escolhido de forma a representar uma baixa velocidade de circulação, simulando uma situação de exigência para a mistura. O tempo de repouso permite que a mistura recupere a parte reversível da deformação.

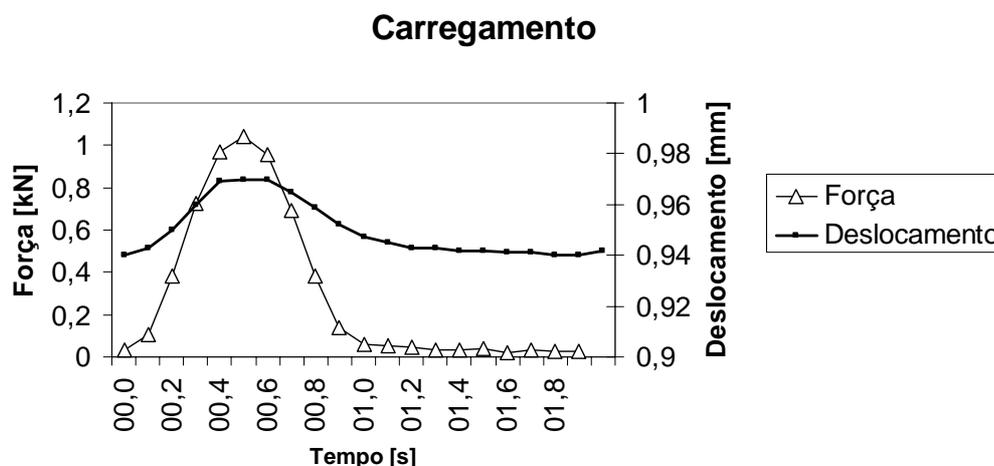


Figura 4.14 - Representação de um ciclo de carregamento e resposta obtida em termos de deformação vertical no provete

A aplicação da carga foi realizada com placas de carregamento circulares. A placa superior tem uma secção em contacto com o provete de 96 mm de diâmetro, como indicado na pré-norma. A placa inferior apresenta um diâmetro de 150 mm, aproximadamente igual ao do provete. A pré-norma indica que esta deveria ter um diâmetro 10 mm superior ao do provete. No entanto esta diferença não se considerou como passível de influenciar os resultados. A força aplicada foi determinada de forma a conseguir-se uma tensão máxima de 150 kPa na placa superior, isto é, na placa com 96 mm de diâmetro.

O facto de a dimensão da placa superior ser inferior ao diâmetro do provete tem como objectivo principal criar um efeito de confinamento originado pelo material circundante ao que está a ser solicitado. A principal desvantagem está em se obter um campo de tensões menos homogéneo que o obtido se as duas placas tivessem a dimensão do provete.

Antes do carregamento é realizado um pré-carregamento. A prEN 12697-25 indica que a tensão de pré carregamento deve ser 10% do valor máximo atingido no ensaio, neste caso 15 kPa, aplicada de forma estática durante 120 segundos. O objectivo deste pré-carregamento é apenas de realizar um ajuste das placas ao provete, evitando que algum desajuste inicial entre as placas de carregamento e o provete possa induzir leituras incorrectas da deformação axial.

Os ensaios tiveram uma duração de 3600 ciclos conforme o indicado na prEN 12697-25. Devido à configuração do carregamento a duração de ensaio foi de 2 horas. Os dados do ensaio foram adquiridos automaticamente por um *software* desenvolvido especificamente para o equipamento. Os dados adquiridos foram a força exercida na célula de carga e as leituras dos dois LVDT's colocados para medir a deformação axial do provete. Os LVDT's

foram colocados de forma a ficarem diametralmente opostos. Na Figura 4.15 apresenta-se a disposição do equipamento e LVDT's.



Figura 4.15 - Equipamento para a realização do ensaio de compressão uniaxial cíclico

4.7 Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico

O procedimento utilizado, no âmbito deste trabalho, para a realização do ensaio é o descrito na prEN 12697-25 parte b (CEN, 2001). O equipamento utilizado foi um equipamento comercial da Wykeham Farrance. A principal diferença relativamente ao ensaio de compressão uniaxial cíclico é a imposição de uma pressão estática de confinamento ao provete. Este confinamento permite utilizar temperaturas e pressões de carregamento superiores sem provocar a rotura precoce do provete.

4.7.1 Realização dos Provetes em Laboratório

Os processos para a realização dos provetes triaxiais em laboratório foram análogos aos utilizados para a realização dos provetes destinados ao ensaio de compressão uniaxial cíclico.

Os provetes foram assim compactados com um vibro-compactador (Figura 4.8) durante 1,5 minutos por face. A temperatura de compactação foi de 135°C. Após a compactação os provetes foram rectificadas de forma a ficarem com as faces lisas, paralelas e perpendiculares ao eixo.

As principais propriedades dos provetes cilíndricos realizados em laboratório para o ensaio triaxial apresentam-se no Quadro 4.13

Quadro 4.13 - Propriedades dos provetes realizados em laboratório para o ensaio de compressão triaxial cíclico

Provete	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Vv [%]
PL19	Lab.	3,7	2,419	152	100	4,0
PL31	Lab.	3,7	2,399	152	98	4,8
PL28	Lab.	4,2	2,435	152	93	2,2
PL58	Lab.	4,2	2,400	152	95	3,6
PL13	Lab.	4,7	2,435	152	93	1,9
PL23	Lab.	4,7	2,444	152	94	1,6
PL32	Lab.	3,7	2,402	152	98	4,7
PL34	Lab.	3,7	2,406	152	96	4,5
PL26	Lab.	4,2	2,425	152	96	2,6
PL53	Lab.	4,2	2,404	152	95	3,5
PL21	Lab.	4,7	2,442	152	94	1,6
PL55	Lab.	4,7	2,437	152	93	1,8
PL33	Lab.	3,7	2,412	152	98	4,3
PL51	Lab.	3,7	2,413	152	93	4,2
PL27	Lab.	4,2	2,441	152	94	2,0
PL54	Lab.	4,2	2,416	152	94	3,0
PL56	Lab.	4,7	2,417	152	95	2,7
PL61	Lab.	4,7	2,423	152	94	2,4

4.7.2 Realização dos Provetes em Obra

Os processos para a recolha dos provetes em obra foram semelhantes aos realizados para os provetes utilizados no ensaio de compressão uniaxial cíclico. Os provetes foram carotados e depois serrados e rectificados de forma a apresentarem as dimensões pretendidas com as faces paralelas, perpendiculares ao eixo e sem irregularidades.

No Quadro 4.14 apresentam-se as principais propriedades dos provetes cilíndricos recolhidos em obra para o ensaio de compressão triaxial cíclico.

Quadro 4.14 - Propriedades dos provetes de obra para o ensaio de compressão triaxial cíclico

Provete	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	V _v [%]
A1-3	Obra	3,7	2,353	151	78	6,0
A1-6	Obra	3,7	2,397	152	86	4,3
A2-3	Obra	4,2	2,376	152	84	4,8
A2-10	Obra	4,2	2,355	152	98	5,7
A3-3	Obra	4,7	2,428	152	100	2,8
A3-9	Obra	4,7	2,406	152	101	3,6
A1-8	Obra	3,7	2,402	151	82	4,1
A1-10	Obra	3,7	2,396	151	84	4,3
A2-4	Obra	4,2	2,367	151	93	5,2
A2-8	Obra	4,2	2,399	151	91	3,9
A3-4	Obra	4,7	2,419	152	105	3,0
A3-7	Obra	4,7	2,377	152	108	4,6
A1-5	Obra	3,7	2,367	151	79	5,5
A1-9	Obra	3,7	2,362	151	81	5,7
A2-6	Obra	4,2	2,368	151	84	5,1
A2-9	Obra	4,2	2,370	152	98	5,1
A3-5	Obra	4,7	2,402	152	104	3,6
A3-8	Obra	4,7	2,388	152	105	4,2

4.7.3 Procedimentos de Ensaio

Neste ensaio os provetes são submetidos a uma tensão de confinamento estática, sendo solicitados por uma tensão axial dinâmica. Esta tensão axial dinâmica pode segundo a prEN 12697-25b seguir:

- uma forma sinusoidal (Figura 4.16):

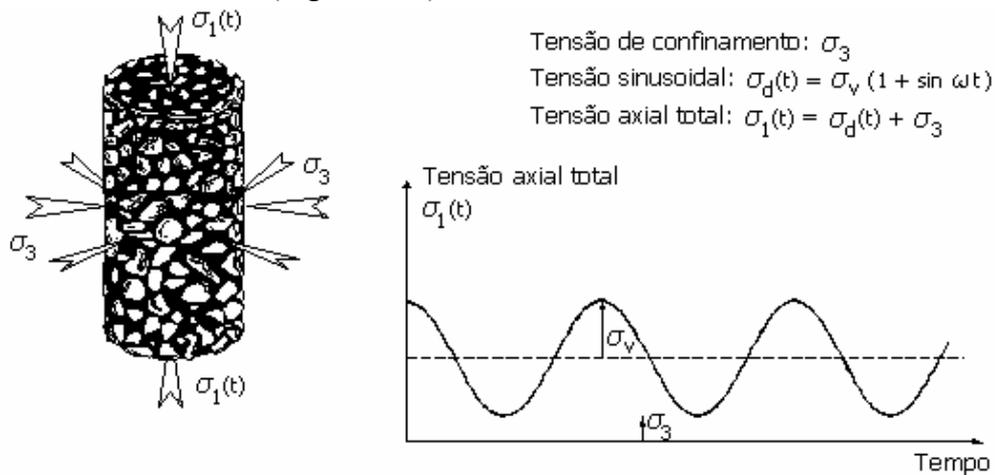


Figura 4.16 - Representação do carregamento cíclico sinusoidal (CEN, 2001)

- uma forma rectangular (Figura 4.17):

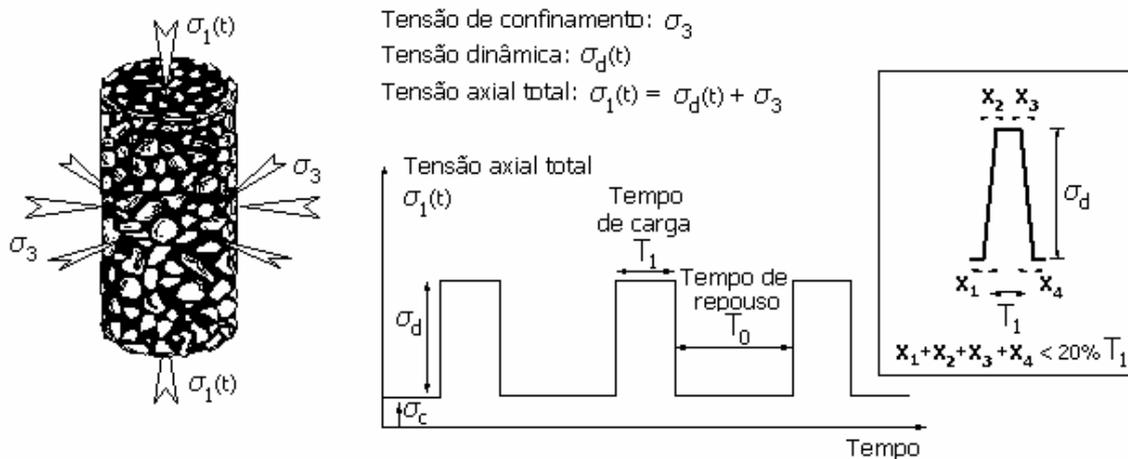


Figura 4.17 - Representação do carregamento cíclico rectangular com repouso (CEN, 2001)

O carregamento adoptado foi semelhante ao utilizado no ensaio de compressão uniaxial cíclico. Assim, utilizou-se um carregamento sinusoidal, com 1 segundo de tempo de carregamento e 1 segundo de tempo de repouso. A duração de ensaio considerada foi igualmente de 3600 ciclos.

A pressão de confinamento é um factor bastante importante na análise à deformação permanente de misturas betuminosas para bases, pois segundo a prEN 12697-25b, os ensaios uniaxiais são mais apropriados para misturas betuminosas mais densas. Para a análise de misturas abertas com agregados de grande dimensão, como sejam as misturas betuminosas utilizadas em bases, o ensaio de compressão triaxial com tensão de confinamento é mais apropriado para uma correcta avaliação da resistência à deformação permanente (CEN, 2001).

A pressão de confinamento deve ser escolhida criteriosamente, pois se esta for muito elevada as deformações permanentes observadas diminuem, tornando-se assim difícil distinguir quais as composições que apresentam melhor comportamento, para se utilizar pressões de confinamento muito baixas, torna-se mais simples e é menos oneroso realizar ensaios cíclicos uniaxiais.

A pré-norma não especifica com exactidão os níveis de tensão a utilizar para a realização do ensaio, desta forma, optou-se por se utilizar vários níveis de tensão dentro dos intervalos indicados, tanto para a tensão máxima como para a tensão de confinamento.

A forma como estas tensões são aplicadas depende do tipo de equipamento. Na pré-norma são descritos três equipamentos diferentes, estes são apresentados na Figura 4.18. No

equipamento a), que corresponde ao utilizado neste trabalho, a tensão de confinamento é realizada com água. As placas de carregamento estão dentro da câmara, deste modo a pressão de confinamento é aplicada a todo o provete, incluindo a direcção axial. A tensão axial dinâmica aplicada varia entre 0 e a tensão desviante, σ_d .

No equipamento representado na Figura 4.18b) a tensão de confinamento é realizada com água. No entanto, as placas de carregamento estão no limite da câmara pelo que a tensão de confinamento é aplicada apenas na face lateral do provete. A tensão axial aplicada varia assim entre σ_3 e σ_1 .

No caso do equipamento da Figura 4.18c) a tensão de confinamento é conseguida criando vácuo no interior do provete que se encontra envolvido por uma membrana lateralmente e pelas placas de carregamento axialmente. Este método tem a desvantagem de só permitir aplicar tensões de confinamento até 100 kPa. A tensão axial aplicada varia entre 0 e σ_d .

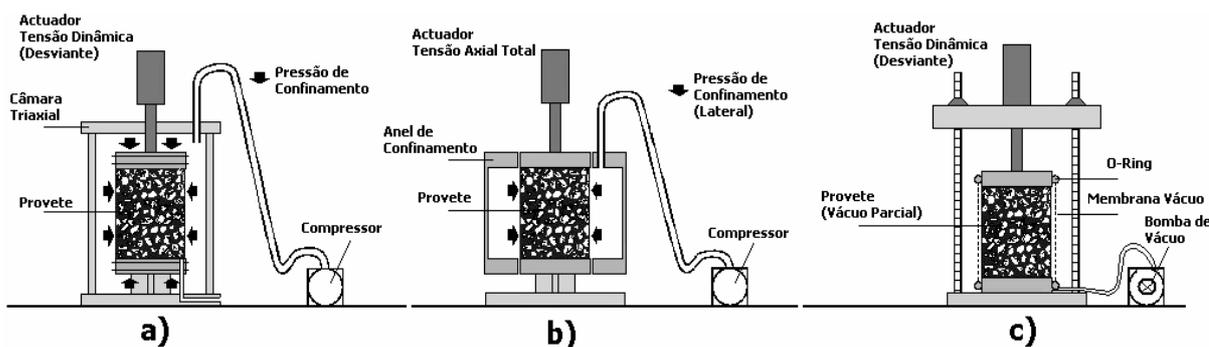


Figura 4.18 - Diferentes configurações para os equipamentos de ensaios de compressão triaxial cíclicos (CEN, 2001)

Optou-se por utilizar três combinações entre a tensão máxima e a tensão de confinamento, correspondendo aos três níveis de tensões que se apresentam no Quadro 4.15. Adoptou-se um nível de tensão baixo, no limiar dos limites inferiores indicados na prEN 12697-25 para a tensão máxima axial e de confinamento, um nível de tensão elevado, no limiar dos limites superiores indicados na prEN 12697-25 para a tensão máxima axial e de confinamento e um nível intermédio.

A temperatura de ensaio escolhida foi, pelos motivos já expostos, de 45°C. Os provetes foram condicionados ao ar dentro de uma câmara térmica à temperatura de ensaio durante 3 horas, e em seguida foram colocados na câmara de ensaio triaxial. A câmara foi cheia com água e estabilizada a 45°C durante uma hora. Durante o ensaio a temperatura foi mantida constante dentro da câmara, respeitando os limites exigidos pela pré-norma.

Quadro 4.15 - Níveis de tensão utilizados no ensaio de compressão triaxial cíclico

Nível de tensão	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Tensão axial máxima σ_1 [kPa]	150	300	600
Tensão de confinamento σ_3 [kPa]	50	100	200
Tensão desviante $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ [kPa]	100	200	400

Este procedimento foi seguido devido ao facto de o equipamento de origem não estar de preparado para regular a temperatura da água na câmara. A solução encontrada passou por colocar uma resistência de aquecimento a envolver a câmara de ensaio, utilizando duas sondas para medir a temperatura no interior da câmara ligadas a dois termocontroladores (ver Figura 4.19). Utilizou-se um termoacumulador de forma que a água colocada na câmara triaxial apresentasse uma temperatura semelhante à requerida para o ensaio.



Figura 4.19 - Colocação de uma resistência eléctrica envolvendo a câmara triaxial para controlo da temperatura de ensaio

Assim, antes de iniciar o ensaio a temperatura dentro câmara foi mantida constante introduzindo água quente na câmara e deixando sair água do seu interior (neste momento não existia tensão no interior da câmara). Após o início do ensaio a tensão dentro da câmara é elevada até à tensão de confinamento, deste modo não era possível fazer circular água. Assim, durante o ensaio a temperatura foi mantida estável pela resistência eléctrica cujo funcionamento é controlado pelos termocontroladores.

O carregamento foi aplicado com placas de 150 mm de diâmetro. Para minimizar o atrito entre as placas e o provete, minimizando o efeito de fronteira, foi aplicado em ambas as faces do provete um lubrificante feito à base de glicerina e talco, ver Figura 4.20 a) e b).

Durante o ensaio o provete não deve ficar em contacto com a água, com este fim é colocada uma membrana de borracha a envolver o provete. São utilizados dois “O-rings” para evitar a entrada de água para dentro da membrana (Figura 4.20c)).

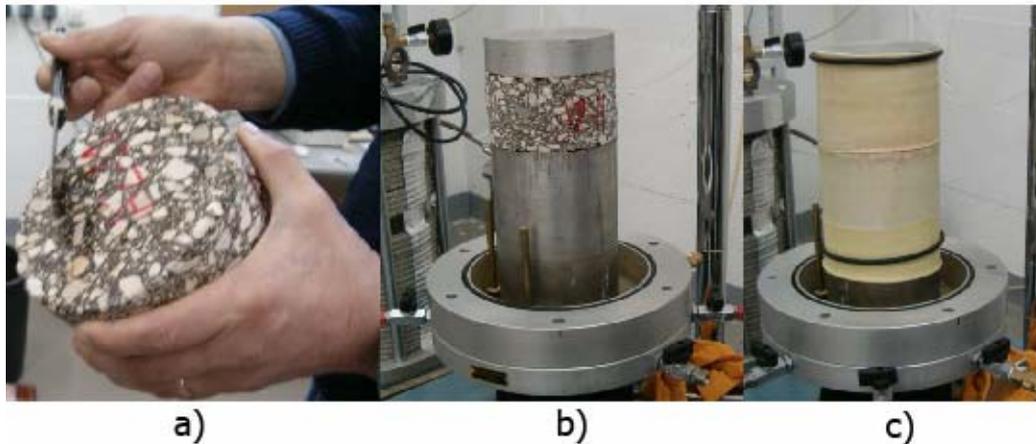


Figura 4.20 - Diferentes fases da preparação do ensaio de compressão triaxial cíclico

Antes do início do ensaio é realizado um pré-carregamento estático com a finalidade de evitar que desajustes entre as placas de aplicação da carga e o provete possam influenciar os resultados. Este pré-carregamento é realizado sem o provete estar sujeito à tensão de confinamento. A duração do pré-carregamento é de 120 segundos e a tensão aplicada é dada pela expressão (CEN, 2001):

$$\sigma_{PC} = 0,02 \times (2 \times \sigma_d + \sigma_3) \quad (13)$$

com,

σ_{PC} – Tensão de pré-carregamento;

σ_d – Tensão desviante, é a diferença entre a tensão máxima e a de confinamento, $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$;

σ_3 – tensão de confinamento.

Para os diferentes níveis de tensão utilizaram-se as tensões de pré-carregamento apresentadas no Quadro 4.16.

Quadro 4.16 - Níveis de tensão de pré-carregamento utilizados no ensaio de compressão triaxial cíclico

Nível de tensão	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Tensão de pré-carregamento σ_{PC} [kPa]	5	10	20

Utilizaram-se dois LVDT's para obter a evolução da deformação dos provetes durante o ensaio, estes foram colocados de forma a ficarem diametralmente opostos entre si. As leituras foram adquiridas automaticamente pelo *software* de controlo do equipamento.

4.8 Ensaio de Corte a Altura Constante (RSCH)

Como referido anteriormente este ensaio teve origem e é utilizado essencialmente nos EUA no âmbito do programa SUPERPAVE do SHRP. O seu objectivo é de servir como ensaio de desempenho à deformação permanente de misturas betuminosas.

Apesar de não ser previsível a inclusão deste ensaio na prática dos países europeus, este ensaio foi incluído neste estudo como termo de comparação. Além disso a avaliação das capacidades deste ensaio quando comparado com os que se utilizam na prática nos países da Europa apresenta-se de elevado interesse para a análise das potencialidades e limitações destes.

A realidade construtiva dos EUA difere em determinados aspectos da prática portuguesa. Em Portugal recorre-se à utilização de agregados com dimensão superior ao que é corrente no outro lado do Atlântico. Assim a AASHTO TP7 apenas refere dimensões de agregado até 19 mm. No entanto é comum a utilização deste ensaio em misturas betuminosas com máxima dimensão de agregado até 25,4 mm, como sejam as utilizadas neste estudo. Para misturas com a máxima dimensão do agregado superior o ensaio é realizado com provetes de 200 mm de diâmetro e 75 mm de altura (SHRP, 1994). Assim, foi implementado um programa de ensaios de corte a altura constante para este trabalho. A adequação deste ensaio à mistura será analisada a par com os resultados obtidos.

É importante realçar que o equipamento de ensaio permite realizar várias configurações de ensaio, no entanto o ensaio de corte a altura constante (RSCH – *Repeated Shear at Constant Height*) apresenta-se como o mais indicado para a caracterização à deformação permanente de misturas betuminosas (SHRP, 1994). Para a realização deste ensaio, seguiu-se o Procedimento AASHTO TP7 (AASHTO, 2001). Foi utilizado um equipamento comercial da James Cox & Sons, o CS7400S, existente no Laboratório de Engenharia Civil da UM.

4.8.1 Realização dos Provetes em Laboratório

Este ensaio permite aplicar tensões de corte aos provetes, para o procedimento utilizado a tensão de corte aplicada é cíclica e solicita o provete sempre na mesma direcção. Os provetes têm as dimensões de 50 mm de altura e 150 mm de diâmetro.

A AASHTO TP7 indica que os provetes a realizar em laboratório devem ser carotados de uma laje. No entanto esta poderá não ser a forma mais simples de fabricar em laboratório provetes para a realização deste ensaio. A maior complexidade de obtenção de provetes, quer em laboratório quer em obra, para a realização de um ensaio é um factor de perda de atractividade.

Optou-se assim por realizar quatro séries de provetes de laboratório. As séries foram realizadas utilizando processos de fabrico diferentes, nomeadamente a sua compactação. Duas séries foram compactadas com cilindro e duas utilizando a vibro-compressão.

Para a primeira série os provetes foram realizados de acordo com o procedimento AASHTO TP7-01. Foi assim compactada uma laje com 50 mm de altura e depois foram carotados dessa laje os provetes com 150 mm de diâmetro. A compactação foi realizada utilizando um pequeno cilindro de rolos vibratórios. Na Figura 4.21 pode observar-se um provete desta série.



Figura 4.21 - Provetes da série LC para o ensaio de corte a altura constante

No Quadro 4.17 apresentam-se as características dos provetes desta série. Os provetes receberam a designação LC (laje cilindrada) seguindo-se a referência da percentagem em betume e o número do provete.

Quadro 4.17 - Características dos provetes da série LC para o ensaio de corte a altura constante

Provete	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Bar. Max. Teo. [g/cm ³]	Vv [%]
LC37-1	Lab.	3,7	2,395	152	51	2,519	4,7
LC37-2	Lab.	3,7	2,390	152	52	2,519	5,1
LC42-1	Lab.	4,2	2,400	152	52	2,491	3,6
LC42-2	Lab.	4,2	2,400	152	52	2,491	3,6
LC47-1	Lab.	4,7	2,381	152	51	2,483	4,1
LC47-2	Lab.	4,7	2,392	152	52	2,483	3,7

A segunda série foi realizada utilizando um molde que permitiu compactar os provetes com as dimensões finais (150 mm de diâmetro e 50 mm de altura). O processo de compactação foi análogo ao da primeira série. Na Figura 4.22 apresenta-se o processo de compactação e o molde utilizado no fabrico desta série de provetes. Este processo de fabrico permitiu assim evitar a realização da operação de caroteamento.



Figura 4.22 - Compactação de provetes da série PC para o ensaio de corte a altura constante

Os provetes desta série receberam a designação PC (provete cilindrado) seguindo-se a referência à percentagem de betume e o número do provete. Devido à maior facilidade de fabrico destes provetes fabricaram-se 9 provetes para esta série. No Quadro 4.18 apresentam-se as características dos provetes desta série.

A terceira série foi realizada compactando os provetes por vibro-compressão num molde metálico de 150 mm de diâmetro. Nesta série compactaram-se os provetes com 50 mm de altura. Na Figura 4.23 apresenta-se o processo de compactação e aspecto final dos provetes.

Quadro 4.18 - Características dos provetes da série PC para o ensaio de corte a altura constante

Provete	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Bar. Max. Teo. [g/cm ³]	V _v [%]
PC37-42	Lab.	3,7	2,419	151	49	2,519	4,0
PC37-43	Lab.	3,7	2,411	151	50	2,519	4,3
PC37-50	Lab.	3,7	2,425	151	49	2,519	3,7
PC42-44	Lab.	4,2	2,415	151	48	2,491	3,0
PC42-45	Lab.	4,2	2,426	151	49	2,491	2,6
PC42-49	Lab.	4,2	2,441	151	48	2,491	2,0
PC47-46	Lab.	4,7	2,417	151	50	2,483	2,6
PC47-47	Lab.	4,7	2,439	151	49	2,483	1,8
PC47-48	Lab.	4,7	2,428	151	49	2,483	2,2



Figura 4.23 - Compactação e aspecto dos provetes da série VA para o ensaio de corte a altura constante

Os provetes foram depois rectificadas de forma a ficarem com as faces paralelas e perpendiculares ao eixo, no entanto devido à configuração do ensaio esta operação pode ser dispensada numa utilização quotidiana. Como a altura dos provetes é de 50 mm o tempo de compactação foi reduzido relativamente ao utilizado nos provetes com 100 mm de altura. O tempo de compactação utilizado nesta série foi de 0,5 minutos por face.

Os provetes da série assim realizada receberam a designação VA (vibro-compressão série A) seguida da referência à percentagem em betume e do número do provete. Devido à facilidade no fabrico desta série foram realizados 9 provetes, três por cada percentagem em betume.

No Quadro 4.19 apresentam-se as principais características dos provetes desta série.

Quadro 4.19 - Características dos provetes da série VA para o ensaio de corte a altura constante

Provete	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Bar. Max. Teo. [g/cm ³]	Vv [%]
VA37-36	Lab.	3,7	2,388	152	47	2,519	5,2
VA37-37	Lab.	3,7	2,405	152	46	2,519	4,5
VA37-39	Lab.	3,7	2,428	152	46	2,519	3,6
VA42-29	Lab.	4,2	2,416	152	46	2,491	3,0
VA42-30	Lab.	4,2	2,405	152	46	2,491	3,4
VA42-41	Lab.	4,2	2,417	152	47	2,491	3,0
VA47-24	Lab.	4,7	2,450	152	46	2,483	1,3
VA47-25	Lab.	4,7	2,454	152	44	2,483	1,2
VA47-40	Lab.	4,7	2,438	152	46	2,483	1,8

A quarta série foi realizada utilizando a vibro-compressão, mas os provetes foram compactados com 100 mm de altura. Para ficarem com as dimensões de ensaio foram posteriormente serrados ao meio e rectificados. Desta forma com cada compactação realizam-se dois provetes de 50 mm de altura. Esta forma de realizar provetes é no entanto mais complexa pois exige a serragem dos provetes ao meio. O tempo de compactação foi de 1,5 minutos por face.

Os provetes da série assim realizada receberam a designação VB (vibro-compressão série B) seguida da percentagem em betume e do número do provete. No Quadro 4.20 apresentam-se as principais características dos provetes desta série.

Quadro 4.20 - Características dos provetes da série VB para o ensaio de corte a altura constante

Provete	Origem	Pb [%]	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Bar. Max. Teo. [g/cm ³]	Vv [%]
VB37-1	Lab.	3,7	2,400	152	46	2,519	4,7
VB37-2	Lab.	3,7	2,403	152	47	2,519	4,6
VB42-1	Lab.	4,2	2,343	152	47	2,491	5,9
VB42-2	Lab.	4,2	2,354	152	50	2,491	5,5
VB47-1	Lab.	4,7	2,384	152	46	2,483	4,0
VB47-2	Lab.	4,7	2,382	152	43	2,483	4,0

A realização destas quatro séries diferenciadas pelo processo de fabrico, permite analisar formas mais simples de fabricar provetes para ensaio de corte a altura constante. A

comparação com os resultados obtidos com os provetes de obra fornece ainda informações sobre a representatividade dos provetes de laboratório e qual a influência do processo de compactação nos resultados.

As séries realizadas em laboratório apresentam, para a percentagem em betume de 4,7%, volumes de vazios baixos, significativamente abaixo dos 3% nalguns provetes. Como já foi referido este facto pode influenciar de forma determinante a resistência da mistura betuminosa. Posteriormente será analisada a forma como estes factores podem ter influenciado os valores obtidos.

4.8.2 Realização dos Provetes em Obra

Os provetes de obra foram carotados nos troços experimentais de forma análoga ao realizado com os provetes utilizados nos ensaios de compressão uniaxial e triaxial cíclicos. Como a espessura da camada era próxima dos 100 mm optou-se por cortar os carotes realizados em dois. Assim de cada carote foram extraídos dois provetes. Depois de cortados os provetes foram rectificadas de forma a ficarem com as faces paralelas e perpendiculares ao eixo do provete. Na Figura 4.24 apresenta-se o aspecto final de um provete de obra.



Figura 4.24 - Provede recolhido em obra para o ensaio de corte a altura constante

Foram realizados e ensaiados 6 provetes de obra. A designação da série foi a corrente neste trabalho para este tipo de provetes, assim a designação adoptada foi “A”, seguindo-se o número do troço de onde foi carotado e o número do provete. No Quadro 4.21 são apresentadas as principais características dos provetes de obra

Alguns provetes apresentam altura abaixo dos 50 mm, o que é desaconselhável, pois para uma dimensão máxima do agregado de 19 mm o procedimento AASHTO TP7 indica a altura de provete de 50 mm. Devido ao corte e rectificação muitos provetes ficaram com dimensão

inferior, no entanto num uso quotidiano a operação de rectificação é dispensável, pois, para a realização do ensaio as faces podem apresentar algumas irregularidades sem estas interferirem nos resultados. Isto é conseguido na colagem do provete às placas metálicas que aplicam a carga. Nesta operação o provete é comprimido axialmente colmatando a cola as irregularidades e imperfeições existentes. A altura mínima recomendada na norma para os provetes é de 38 mm, todos os provetes realizados apresentaram altura superior.

Quadro 4.21 - Características dos provetes de obra (série A) para o ensaio de corte a altura constante

Provete	Origem	Pb (%)	Baridade [g/cm ³]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Bar. Max. Teo. [g/cm ³]	V _v [%]
A1-1	Obra	3,7	2,408	152	40	2,504	3,8
A1-2	Obra	3,7	2,387	152	43	2,504	4,6
A2-1	Obra	4,2	2,377	152	48	2,497	4,7
A2-2	Obra	4,2	2,369	152	50	2,497	5,1
A3-1	Obra	4,7	2,380	152	56	2,493	4,5
A3-2	Obra	4,7	2,385	152	52	2,493	4,1

4.8.3 Procedimentos de Ensaio

Os provetes são colados às placas de aplicação de carga. Esta operação é realizada num equipamento específico. Começa por se aplicar a cola em ambas as faces do provete, a cola utilizada é uma resina epoxi. Em seguida, o provete é colocado entre as placas de aplicação de carga e depois, no equipamento de colagem, vai ser comprimido de forma a assegurar a correcta colagem entre as placas e o provete. A tensão de compressão aplicada na colagem é de 35 kPa. Na Figura 4.25 pode observar-se o aspecto dos provetes após a colagem.

Os provetes foram condicionados à temperatura de ensaio durante duas horas ao ar dentro da câmara térmica do equipamento de corte. A temperatura de ensaio escolhida foi, pelos motivos já expostos, de 45°C.

Imediatamente antes de começar o ensaio são colocados os LVDT's, esta é uma operação simples pois estes são fixados às placas por um sistema de parafusos. Para este ensaio são utilizados dois LVDT's. Um LVDT vertical que controla a altura do provete, que deve ser mantida constante durante todo o ensaio. Isto é conseguido através da aplicação de uma carga axial controlada pelas medições do LVDT vertical e que impede a deformação axial do provete. O segundo LVDT é colocado horizontalmente e é utilizado para medir a deformação do provete devido às tensões de corte aplicadas durante o ensaio.



Figura 4.25 - Colagem do provete às placas de aplicação da carga

Na Figura 4.26 são visíveis os dois LVDT's já colocados. Na Figura 4.27 pode observar-se o equipamento para a realização do ensaio de corte a altura constante e um provete colocado na posição de ensaio.



Figura 4.26 - Colocação dos LVDT's para o ensaio de corte a altura constante

Antes de se iniciar o ensaio é realizado um pré-carregamento. Este consiste em realizar uma sequência de 100 ciclos de carga, mas utilizando uma tensão igual a 10% da tensão máxima no ensaio.



Figura 4.27 - Equipamento para a realização do ensaio de corte a altura constante do Laboratório de Engenharia Civil da UM

Imediatamente após o pré-carregamento é realizado o ensaio. O carregamento de ensaio segue uma forma sinusoidal com repouso. Cada ciclo de carregamento é constituído por um tempo de carga com duração de 0,1 segundos seguindo-se um tempo de repouso com a duração de 0,6 segundos. A força máxima aplicada é de 1218 N, o que corresponde a uma tensão de corte de 69 kPa. O ensaio finaliza após a aplicação de 5000 ciclos de carga, o que corresponde a uma duração de ensaio de aproximadamente 1 hora.

4.9 Referências Bibliográficas

- AASHTO (2001). “Standard Test Method for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Test (SST)”. *AASHTO TP7-01*, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.
- ASTM (1998). “Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method”. *ASTM D 6307-98*, American Society For Testing and Materials, USA.
- BSI (1998). “Sampling and Examination of Bituminous Mixtures for Roads and Other Paved Areas – Part 110: Methods of Test for the Determination of Wheel Tracking Rate and Depth”. *BS 598-110*, BSI Standards, Great Britain.
- CEN (2002). “Test methods for hot mix asphalt – Wheel Tracking”. *PrEN 12697-22*, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2001). “Bituminous mixtures – Test methods for mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test”. *PrEN 12697-25*, European Committee for Standardization, Brussels.
- DGC (1984). “Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio”. *NLT-173*, Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, España.
- IGPAI (1968). “Misturas Betuminosas - Ensaio de Compressão Marshall”. *Norma Portuguesa NP-142*, Inspeção Geral dos Produtos Agrícolas e Industriais, Lisboa.
- JAE, (1998). “Caderno de Encargos da Junta Autónoma de Estradas”. Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.
- JAE (1995). “Manual de Concepção de Pavimentos Para a Rede Rodoviária Nacional”. Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.
- 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.
- Picado Santos, L. e Baptista, A. (2004). “Reciclagem a Quente de Misturas Betuminosas”. *Relatório Técnico, Protocolo de Cooperação Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra /LUSOS CUT-CP*, Coimbra.

SHRP (1994). “Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool”. *SHRP-A-698*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C..

USACE (1995). “Standard Test Method for Measurement of Reduction in Marshall Stability of Bituminous Mixtures Caused by Immersion in Water”. *CRD-C 652-95*, United States Army Corps of Engineers, USA.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos em cada ensaio bem como a sua análise. Comparam-se os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados e tecem-se alguns comentários sobre estes e o modo como se relacionam.

Os resultados são analisados individualmente observando as suas tendências, analisando a clareza da classificação de misturas e a coerência entre os resultados obtidos com os provetes de laboratório e de obra. São também determinados os diversos parâmetros que cada ensaio permite obter e avaliada a coerência e correlações existentes entre estes. São ainda discutidas algumas questões relativas ao fabrico dos provetes e condições de ensaio, procurando encontrar soluções que permitam obter melhores resultados.

Os resultados dos diferentes ensaios são depois comparados utilizando como referência os resultados obtidos no ensaio de wheel tracking. Desta forma é possível comparar a sensibilidade dos ensaios e analisar a coerência entre os resultados dos diferentes ensaios. No final são apresentadas as vantagens e limitações dos ensaios reveladas por este trabalho procurando analisar o seu potencial para introdução na prática portuguesa.

5.1 Wheel Traking

O resultado do ensaio de wheel tracking é uma curva que relaciona o tempo de ensaio com a deformação do provete. Como o equipamento realiza 21 ciclos por minuto, correspondendo cada ciclo a duas passagens da roda, pode relacionar-se o tempo de ensaio com os ciclos de carregamento. A prEN 12697-22 indica os resultados sejam analisados em função do tempo.

Apresentam-se na Figura 5.1 as curvas de deformação média obtidas para as diferentes percentagens de betume para os provetes produzidos em laboratório. A Figura 5.2 apresenta os mesmos resultados, mas para os provetes recolhidos *in situ*.

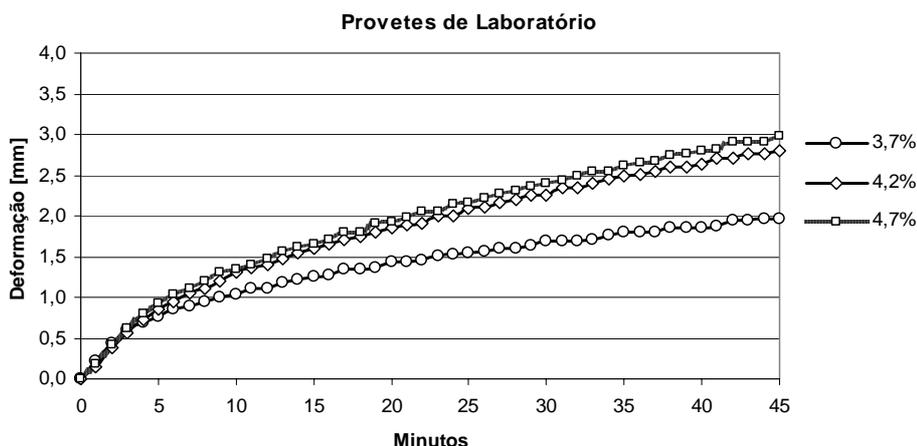


Figura 5.1 - Relação entre o tempo de ensaio e a deformação vertical média obtida para as séries de provetes de laboratório

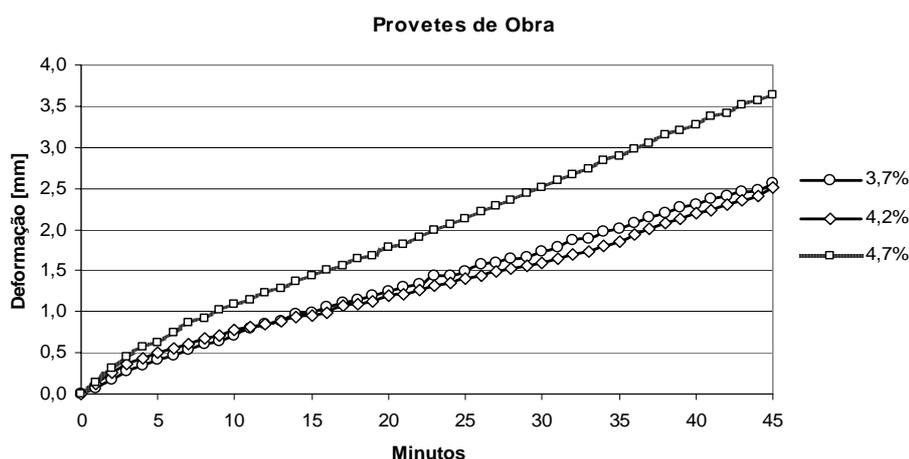


Figura 5.2 - Relação entre o tempo de ensaio e a deformação vertical média obtida para as séries de provetes de obra

Na pré-norma prEN 12697-22 para efectuar a análise dos resultados são propostos vários parâmetros. A profundidade média da rodeira, R_D (*Mean Rut Depth*), é a profundidade média da rodeira no final do ensaio expressa em milímetros.

A velocidade de deformação, TR (*Wheel Tracking Rate*) em mm/h, definida na pré-norma pela equação (14):

$$TR = 3,6 \times r_n + 1,2 \times r_{n-1} - 1,2 \times r_{n-2} - 3,6 \times r_{n-3} \quad (14)$$

com,

TR – velocidade de deformação [mm/h];

r_i – leitura da deformação vertical da laje num dado momento i [mm];
 n – última leitura efectuada.

Esta expressão é apresentada para o caso de apenas se realizarem medições de 5 em 5 minutos. O *software* de controlo do equipamento regista a deformação em cada minuto. Isto permitiu realizar uma regressão linear das deformações medidas do minuto 30 ao 45. Deste modo a velocidade de deformação foi obtida na parte quase linear da curva de deformação.

A pré-norma indica ainda como parâmetro de caracterização à deformação permanente a velocidade de wheel tracking média WTR (*Mean Wheel-Tracking Rate*) definida a partir da velocidade de deformação TR.

$$WTR = 14 \times TR_m \times \frac{w}{L} \quad (15)$$

com,

WTR – velocidade de wheel tracking média;

TR_m – velocidade de deformação média [mm/h];

w – largura do pneu [mm];

L – peso aplicado pela roda [N].

Como w e L do equipamento são constantes (w = 50 mm e L = 700 N) este parâmetro não é mais que a velocidade de deformação. Assim, em termos de análise de resultados não acrescenta nada ao cálculo da velocidade de deformação TR, apenas o faria se os valores de w ou L fossem variáveis entre ensaios.

Outro parâmetro que pode apresentar interesse é o número de ciclos (ou tempo) até à rotura do provete. Em nenhum ensaio se atingiu a rotura do provete pelo que este parâmetro não foi determinado.

Pelo exposto, a análise de resultados do ensaio de wheel tracking irá centrar-se na deformação total R_D e na velocidade de deformação TR.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5.1 para os provetes de laboratório e no Quadro 5.2 para os provetes de obra.

Quadro 5.1- Resultados obtidos no ensaio de wheel tracking para os provetes fabricados em laboratório

Laje	Pb [%]	Vv [%]	R _D [mm]	R _{DM} [mm]	TR [mm/h]	TRm [mm/h]
L5	3,7	4,8	2,30	1,96	1,41	1,18
L6	3,7	5,2	1,61		0,95	
L2	4,2	5,5	3,19	2,80	2,37	2,07
L7	4,2	4,3	2,41		1,77	
L3	4,7	4,4	3,46	2,98	2,63	2,26
L4	4,7	3,6	2,49		1,89	

Quadro 5.2 - Resultados obtidos no ensaio de wheel tracking para os provetes recolhidos em obra

Laje	Pb [%]	Vv [%]	R _D [mm]	R _{DM} [mm]	TR [mm/h]	TRm [mm/h]
LA1-2	3,7	6,2	2,91	2,57	3,52	3,32
LA1-5	3,7	6,6	2,41		3,19	
LA1-6	3,7	6,3	2,39		3,26	
LA2-1	4,2	5,3	3,70	2,50	6,32	3,71
LA2-2	4,2	4,0	2,01		2,96	
LA2-4	4,2	3,8	1,80		1,84	
LA3-3	4,7	4,1	2,81	3,64	3,48	4,53
LA3-5	4,7	3,9	3,31		4,05	
LA3-6	4,7	3,8	4,80		6,06	

Na Figura 5.3 e na Figura 5.4 apresentam-se graficamente estes resultados.

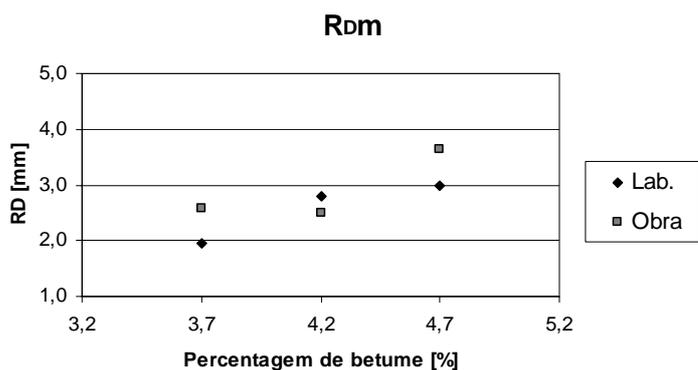


Figura 5.3 - Relação entre a deformação R_{DM} e a percentagem em betume

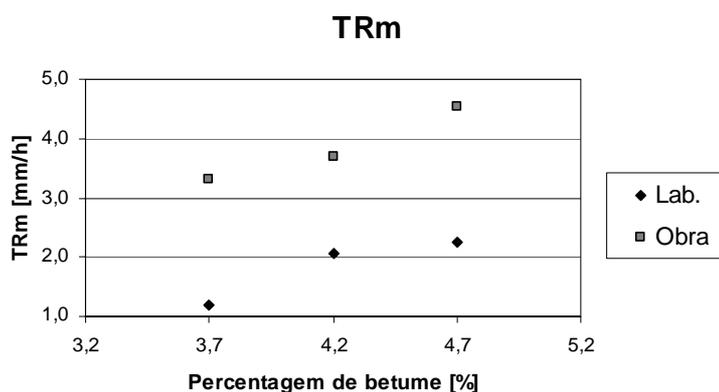


Figura 5.4 - Relação entre a velocidade de deformação TRm e a percentagem em betume

Pode observar-se que os provetes com menor percentagem de betume sofreram menores deformações e apresentam velocidades de deformação inferiores. A velocidade de deformação permite obter uma classificação mais clara. Com ambos os parâmetros a seriação por percentagem em betume é igual, isto é, tanto para os provetes de laboratório como para os provetes de obra verifica-se que a uma maior percentagem em betume correspondeu uma menor resistência à deformação permanente. No entanto verifica-se que este tipo de misturas apresenta velocidades de deformação baixas a 45°C, demonstrando boa resistência à deformação permanente.

Contrariamente ao esperado os provetes de obra obtiveram piores resultados que os de laboratório. A formulação das misturas apenas diferia *à priori* na classe de betume, utilizando-se em obra um betume mais duro. Assim, era esperado que os provetes de obra apresentassem maior resistência à deformação permanente. O melhor comportamento dos provetes de laboratório pode dever-se a um maior controlo e rigor no fabrico destes, nomeadamente, no controlo da granulometria e da homogeneidade dos provetes. Os provetes de obra também apresentam maior variação de resultados. Esse facto deve-se a uma maior heterogeneidade da mistura. Em alguns provetes era visível alguma segregação dos materiais o que pode ter introduzido alguma variação em termos de resultados (ver Figura 5.5).

A prEN 12697-22 aconselha a realizar seis provetes por série, no entanto verifica-se que se podem obter tendências nítidas com um menor número de ensaios.

As baridades obtidas em laboratório estão muito próximas das baridades de obra. Como o processo de compactação é semelhante, verifica-se ser possível obter em laboratório provetes com características semelhantes aos de obra.



Figura 5.5 - Exemplo de segregação num provete de obra

Ambos os parâmetros, deformação total e velocidade de deformação, apresentam boas indicações com classificações claras e coerentes. Da análise de resultados, a velocidade de deformação apresenta-se como o parâmetro mais interessante para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente. A deformação total também mostra bom potencial mas é influenciada pelo índice de vazios inicial. Durante o ensaio de wheel tracking verifica-se que existe uma redução do volume de vazios na zona de passagem do rodado. Assim, a deformação total obtida depende do volume de vazios inicial. A velocidade de deformação é no entanto mais insensível a este fenómeno, pois é determinada numa fase em que essa densificação já se processou, existindo essencialmente a deformação a volume constante.

Apesar do fabrico dos provetes de wheel tracking em laboratório exigir alguns meios para o seu fabrico (tanto na produção da mistura como na compactação), a obtenção de provetes com características satisfatórias aparenta, em geral, poder ser conseguida sem dificuldades.

5.2 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico

O resultado deste ensaio é a chamada curva de fluência, que relaciona a deformação axial ocorrida no provete com os ciclos de carga a que este foi submetido. As curvas de deformação obtidas para o ensaio de compressão uniaxial cíclico têm um andamento semelhante às que se obtiveram para o de wheel tracking.

Na Figura 5.6 e na Figura 5.7 apresentam-se as curvas de deformação obtidas para cada percentagem em betume para os provetes de laboratório e de obra.

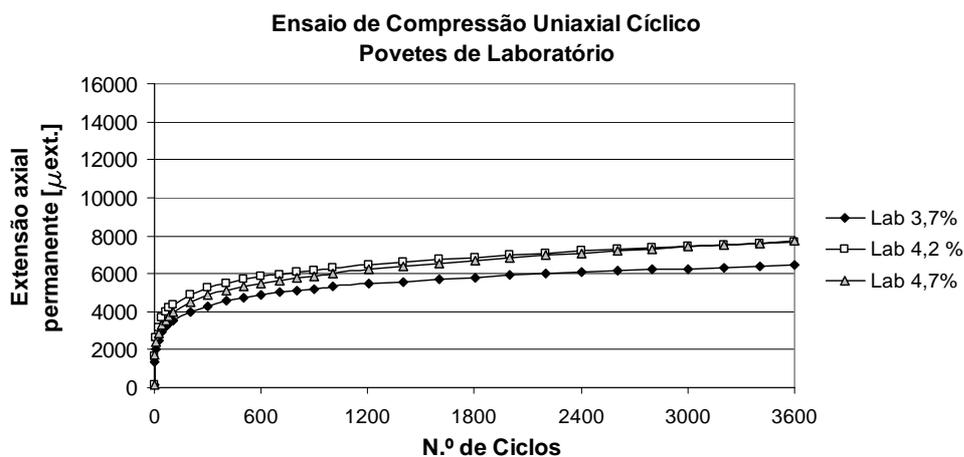


Figura 5.6 - Curvas de deformação médias obtidas no ensaio de compressão uniaxial cíclico para as séries de provetes de laboratório

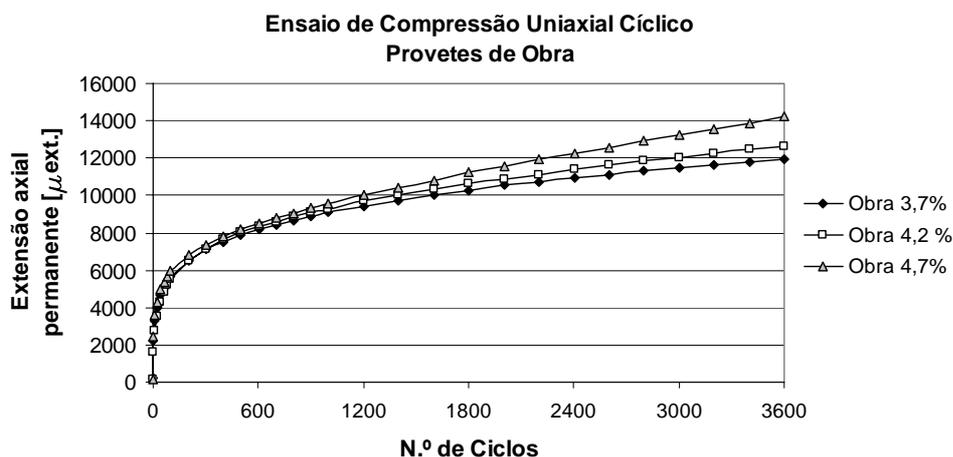


Figura 5.7 - Curvas de deformação médias obtidas no ensaio de compressão uniaxial cíclico para as séries de provetes de obra

Deste ensaio podem retirar-se diversos parâmetros para caracterizar as misturas à deformação permanente. A pré-norma indica que se podem determinar os seguintes:

Extensão axial permanente, ε_N :

$$\varepsilon_N = \frac{\Delta h_N}{h_0} \quad (16)$$

com,

ε_N – extensão axial permanente acumulada após N ciclos [ext.];

Δh_N – deformação axial do provete após N ciclos [mm];

h_0 – altura inicial provete [mm].

Este parâmetro representa a extensão axial permanente acumulada após N ciclos. Para este trabalho apresenta-se o valor ε_{3600} , que é a extensão permanente axial total medida no final do ensaio. Devido s existirem diferenças de altura entre os provetes, nomeadamente nos de obra, é vantajoso analisar os resultados em extensão e não em deformação. A opção pela extensão vai levar em conta as diferentes alturas dos provetes na análise de resultados. As classificações obtidas apresentaram sempre melhores valores trabalhando em microextensões, pelo que, apenas se apresentarão estes valores na análise de resultados.

Velocidade de deformação, f :

$$f = \frac{\varepsilon_{N1} - \varepsilon_{N2}}{N2 - N1} \quad (17)$$

com,

f – velocidade de deformação [$\mu\text{ext./ciclo}$];

ε_N – extensão axial permanente acumulada após N ciclos [$\mu\text{ext.}$];

N – N° de ciclos.

Este parâmetro representa o acréscimo de extensão que ocorreu por ciclo de carregamento. Para este trabalho tomaram-se medições da defomação axial de quatro em quatro ciclos, obtendo-se por regressão linear a velocidade de deformação entre os ciclos 2000 e 3600 (fase quase linear da curva). Refira-se que este procedimento foi sempre efectuado uma vez que nenhum dos provetes atingiu a rotura durante o ensaio.

Módulo de fluência, S_N :

$$S_N = \frac{\sigma}{\varepsilon_N} \times 1000 \quad (18)$$

com,

S_N – módulo de fluência no ciclo N [Mpa];

ε_N – deformação permanente acumulada após N ciclos [ext.];

σ – tensão axial aplicada [kPa].

O módulo de fluência traduz em certo sentido a rigidez da mistura e é definido pelo quociente da tensão aplicada ao provete pela deformação permanente acumulada registada após um determinado número de ciclos. Neste trabalho será referida a todo o ensaio, ε_{3600} . Assim, este parâmetro não acrescenta muito à análise realizada com o valor de ε_{3600} , exceptuando se existir a necessidade de comparar os resultados de ensaios realizados com diferentes tensões de carregamento. Neste trabalho apenas se utilizou para o ensaio de compressão uniaxial cíclico um carregamento com 150 kPa de tensão de compressão máxima.

Para além dos valores referidos na norma determinou-se o módulo resiliente E_r , definido por:

$$E_r = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ri}} \quad (19)$$

com,

E_r - módulo resiliente no ciclo i [Mpa];

ε_{ri} - deformação recuperada ocorrida no ciclo i [ext.];

σ - tensão axial aplicada [kPa].

O módulo resiliente da mistura é definido pela razão entre a tensão máxima aplicada num ciclo de carregamento e a extensão recuperada medida nesse mesmo ciclo. Para misturas betuminosas e condições de ensaio correntes este valor é próximo do valor do módulo de deformabilidade complexo, este calculado com a extensão total ocorrida no ciclo, pois a extensão recuperada é normalmente muito superior à permanente ocorrida num ciclo de carregamento.

Um parâmetro que também pode ser usado é o número de ciclos até à rotura do provete. Neste caso não se atingiu a rotura em nenhum provete pelo que este parâmetro não foi determinado.

A pré-norma indica ainda que se deve terminar o ensaio sempre que ocorra uma extensão de 40000 microextensões. Neste caso o provete deve ter atingido a rotura (fase 3 da curva de deformação). Assim, deve prolongar-se a parte quase linear da curva (fase 2) até aos 3600 ciclos, obtendo-se o valor da extensão total no ensaio. Esta condição de paragem nunca se verificou neste trabalho.

No Quadro 5.3 apresentam-se os resultados obtidos para os provetes de laboratório.

Quadro 5.3 - Resultados obtidos para os provetes realizados no laboratório

Provetes	Pb [%]	Vv [%]	ε_{3600} [μext.]	f [μext./ciclo]	S_N [MPa]	E_r [MPa]
PL15	3,7	5,7	5803,9	0,359	25,8	467,0
PL16	3,7	4,9	6803,9	0,335	22,0	500,9
PL17	3,7	6,2	6303,9	0,324	23,8	546,2
PL02	4,2	3,0	10240,0	0,521	14,6	511,1
PL03	4,2	3,0	8075,3	0,801	18,6	457,3
PL04	4,2	2,8	7923,1	0,319	18,9	524,6
PL05	4,2	1,9	3865,2	0,088	38,8	661,6
PL20	4,7	2,5	11210,5	0,332	13,4	474,6
PL09	4,7	3,0	7043,0	0,687	21,3	444,9
PL11	4,7	4,5	5818,2	0,733	25,8	469,4
PL10	4,7	2,6	6336,8	0,442	23,7	500,2

O Quadro 5.4 apresenta os resultados obtidos para os provetes de obra.

Quadro 5.4 - Resultados obtidos para os provetes realizados em obra

Provetes	Pb [%]	Vv [%]	ϵ_{3600} [$\mu\text{ext.}$]	f [$\mu\text{ext./ciclo}$]	S_N [MPa]	E_r [MPa]
A-1-1	3,7	4,6	12186,0	0,946	12,3	459,8
A-1-2	3,7	5,7	11304,9	0,820	13,3	419,8
A-2-1	4,2	4,1	13818,2	1,090	10,9	436,3
A-2-2	4,2	3,1	11329,7	1,110	13,2	484,6
A-3-1	4,7	4,1	14906,5	2,065	10,1	447,5
A-3-2	4,7	2,7	13380,2	1,205	11,2	460,3

No Quadro 5.5 e no Quadro 5.6 apresentam-se os valores médios obtidos em cada série.

Quadro 5.5 - Resultados médios obtidos nas séries de laboratório no ensaio de compressão uniaxial cíclico

Série	Pb [%]	Vv [%]	ϵ_{3600} [$\mu\text{ext.}$]	f [$\mu\text{ext./ciclo}$]	S_N [MPa]	E_r [MPa]
PL-3,7	3,7	5,6	6303,9	0,339	23,9	504,7
PL-4,2	4,2	2,7	7525,9	0,432	22,7	538,7
PL4,7	4,7	3,2	7602,1	0,549	21,0	472,3

Quadro 5.6 - Resultados médios obtidos nas séries de obra no ensaio de compressão uniaxial cíclico

Provetes	Pb [%]	Vv [%]	ϵ_{3600} [$\mu\text{ext.}$]	f [$\mu\text{ext./ciclo}$]	S_N [MPa]	E_r [MPa]
A-1	3,7	5,2	11745,5	0,883	12,8	439,8
A-1	4,2	3,6	12573,9	1,100	12,0	460,4
A-3	4,7	3,4	14143,4	1,635	10,6	453,9

Observando os resultados obtidos nas diferentes séries verifica-se que o ensaio diferenciou os seus comportamentos alcançando a classificação esperada.

Refira-se que a pré-norma indica que se devem utilizar cinco provetes por percentagem em betume, número superior ao realizado. No entanto, o facto de se terem que realizar cinco ensaios aumenta o esforço necessário tornando menos interessante este ensaio. Analisando os resultados verifica-se que para a maioria dos casos não será necessário realizar cinco provetes para se obterem resultados satisfatórios.

Da Figura 5.8 à Figura 5.11 apresentam-se graficamente os resultados obtidos.

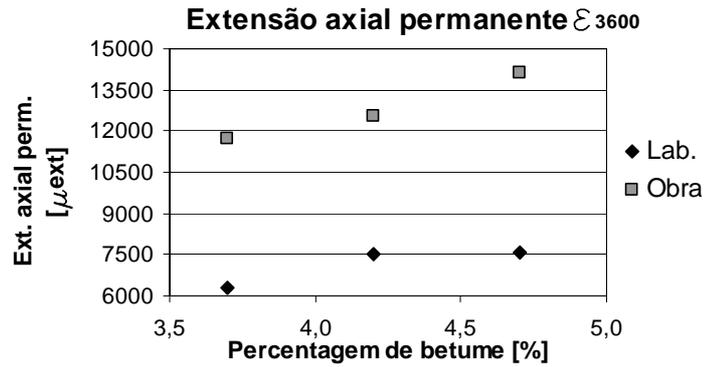


Figura 5.8 - Valores da extensão permanente acumulada, ϵ_{3600} , obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico

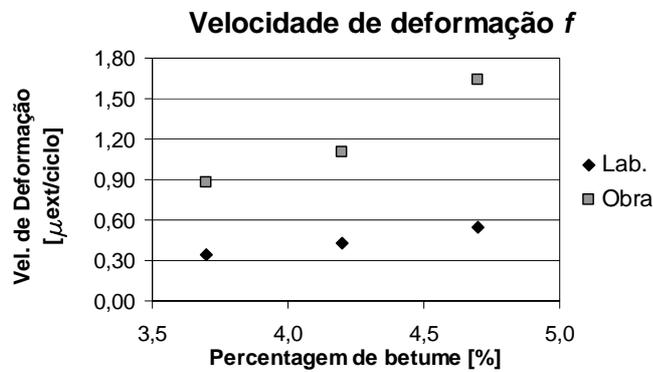


Figura 5.9 - Valores da velocidade de deformação, f , obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico

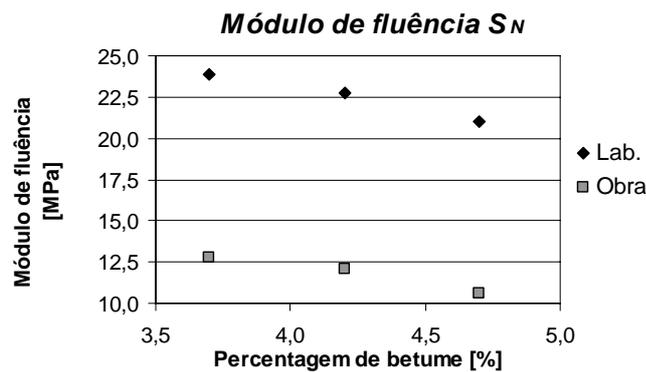


Figura 5.10 - Valores do módulo de fluência, S_N , obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico

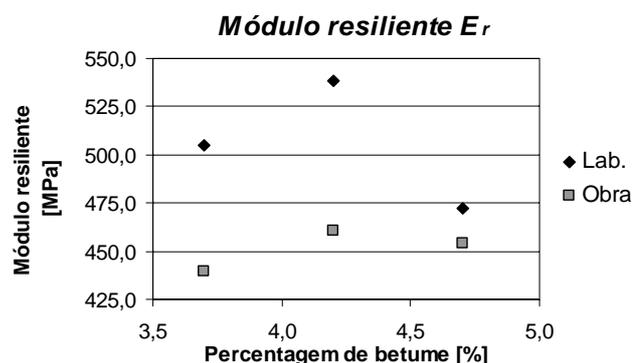


Figura 5.11 - Valores do módulo resiliente, E_r , obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico

Os resultados obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico são análogos aos de wheel tracking, isto é, tanto nos provetes de laboratório como nos de obra observa-se que para maiores percentagens de betume obtiveram-se resistências à deformação permanente inferiores. Realce também para o facto de os resultados para os provetes de laboratório serem melhores que os de obra. Estes resultados coincidem com os obtidos no ensaio de wheel tracking. No entanto, neste ensaio o processo de compactação em laboratório, por vibro-compressão, poderá ter contribuído estes resultados.

O ensaio apresenta uma boa sensibilidade conseguindo diferenciar o comportamento das misturas. A extensão permanente total (Figura 5.8) e a velocidade de deformação (Figura 5.9) apresentam bons resultados, obtendo-se a classificação esperada e de forma nítida. Os resultados apresentam a seriação esperada, isto é, a uma maior percentagem em betume corresponderam menores resistências à deformação permanente.

O módulo de fluência (Figura 5.10) apresenta igualmente uma classificação nítida, pois como a tensão do carregamento é constante o valor do módulo de fluência segue a tendência da extensão permanente total. O módulo de fluência decresce com o incremento da percentagem em betume da mistura, ou seja com o aumento da extensão.

A utilização do módulo de fluência só é interessante se os ensaios forem realizados com diferentes tensões, caso contrário as conclusões serão as mesmas que as obtidas com a extensão permanente total.

Para o módulo resiliente os resultados foram menos satisfatórios, não se obtendo a mesma classificação que utilizando os parâmetros anteriores (Figura 5.11). No entanto verifica-se que se obteve sensivelmente a mesma classificação para os provetes de laboratório e de obra. A utilização do módulo resiliente (determinado com a extensão recuperada) não se apresentou

como uma boa solução para a caracterização à deformação permanente. Este facto pode dever-se a duas causas. Este ser determinado utilizando a deformação recuperada e não a deformação permanente do ciclo de carga, o que pode não traduzir o comportamento à deformação permanente. Outra questão que influencia estes resultados é a forma como as leituras da deformação foram realizadas e a sua precisão. Esta última causa pode ter influenciado decisivamente os resultados obtidos neste trabalho.

A utilização do módulo resiliente exige uma maior precisão das leituras de deformação. Na Figura 5.12 apresenta-se esquematicamente a evolução da deformação num ensaio de compressão cíclico. Embora não possa ser generalizado, verifica-se que a deformação permanente total do provete é muito superior à deformação recuperada que se verifica num ciclo.

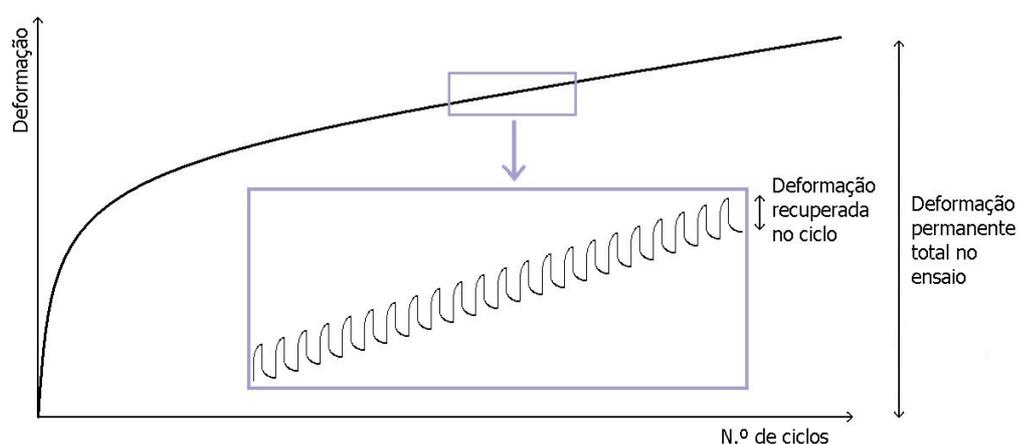


Figura 5.12 - Representação esquemática da evolução da deformação num ensaio de compressão uniaxial cíclico

Para uma correcta determinação da extensão máxima é necessário num mesmo ciclo tirar diversas leituras uma vez que os momentos em que ocorrem a tensão máxima e a extensão máxima não são coincidentes, dependendo do ângulo de fase (ver Figura 5.13). Devem assim ser obtidas leituras suficientes para obter os valores de tensão e extensão máximas. Neste ensaio realizaram-se 20 leituras por ciclo, 10 leituras na fase de carga e 10 na fase de repouso.

Estes factos podem ter influenciado os resultados obtidos. A quantidade de leituras de deformação obtidas por ciclo poderá ter sido inferior ao desejável. Introduzindo alguma dispersão de resultados. A questão de não se adoptar um número de leituras por ciclo superior relacionou-se com o controlo de ensaio, uma vez que o controlo do equipamento e a aquisição de dados foram efectuados simultaneamente pelo mesmo processador. Os resultados obtidos pecam assim por alguma imprecisão na sua determinação.

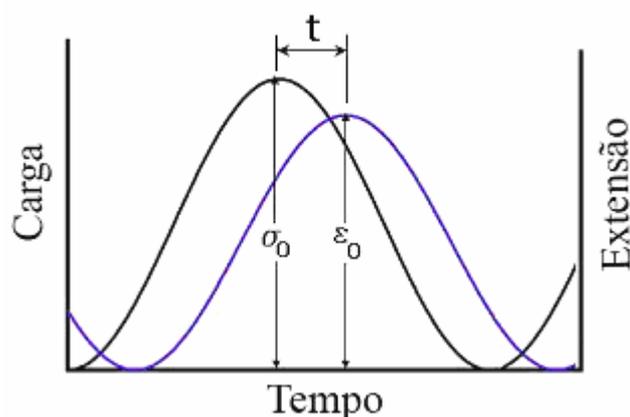


Figura 5.13 - Evolução da tensão e extensão num ciclo de carregamento

Este ensaio permitiu classificar de forma correcta as misturas. A extensão axial permanente acumulada e a velocidade de deformação são parâmetros simples mas capazes de caracterizar as misturas de forma eficiente. A velocidade de deformação apresenta-se como o parâmetro mais interessante para uma utilização corrente pois tem como base o troço quase linear da curva de fluência em que ocorrem essencialmente deformações a volume constante, principais responsáveis pelos insucessos, evitando alguma influência do volume de vazios inicial.

Numa apreciação global, este ensaio permite caracterizar misturas betuminosas à deformação permanente, apresentando uma boa sensibilidade e versatilidade.

5.3 Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico

Neste ensaio o resultado é uma curva que relaciona a deformação axial do provete com o número de carregamentos, à semelhança do ensaio de compressão uniaxial cíclico. As curvas médias obtidas para as diferentes séries de provetes de laboratório para cada nível de tensão são apresentadas da Figura 5.14 à Figura 5.16.

Da Figura 5.17 à Figura 5.19 apresentam-se curvas de fluência obtidas para os provetes de obra.

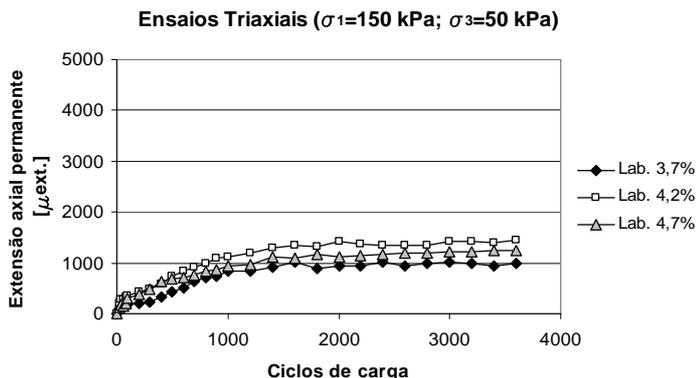


Figura 5.14 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de laboratório para o nível de tensão $\sigma_1=150$ kPa e $\sigma_3=50$ kPa

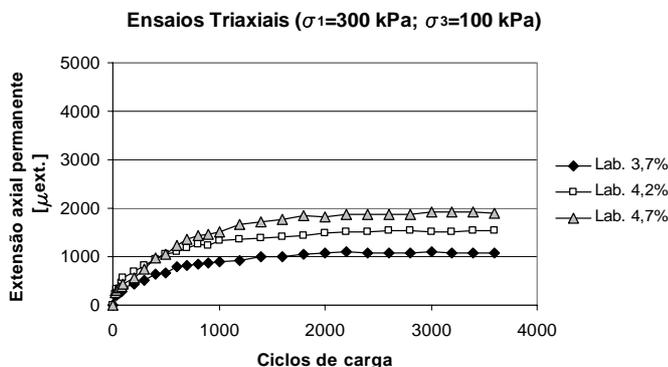


Figura 5.15 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de laboratório para o nível de tensão $\sigma_1=300$ kPa e $\sigma_3=100$ kPa

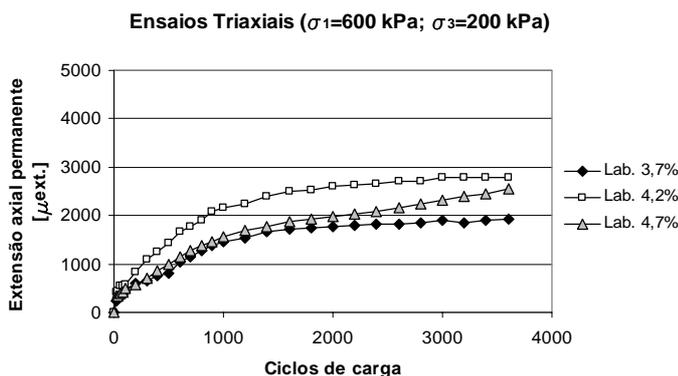


Figura 5.16 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de laboratório para o nível de tensão $\sigma_1=600$ kPa e $\sigma_3=200$ kPa

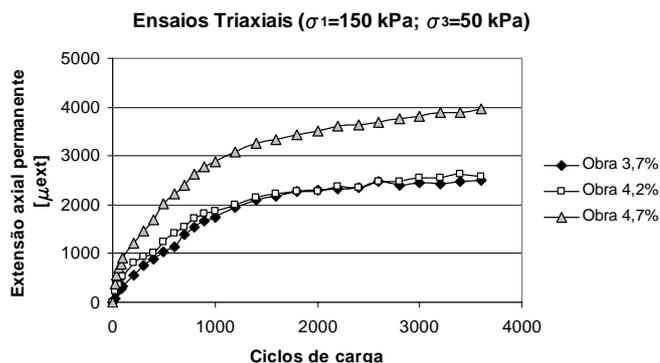


Figura 5.17 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de obra para o nível de tensão $\sigma_1=150$ kPa e $\sigma_3=50$ kPa

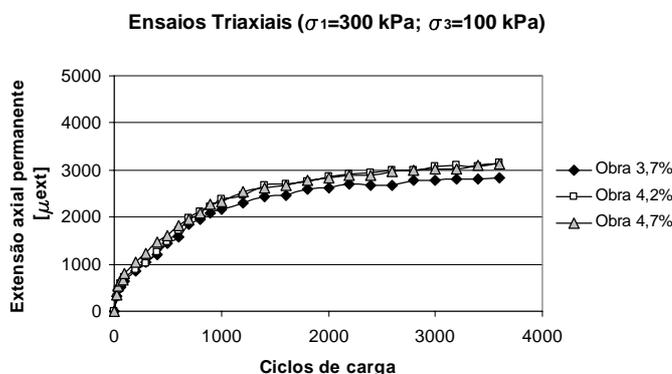


Figura 5.18 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de obra para o nível de tensão $\sigma_1=300$ kPa e $\sigma_3=100$ kPa

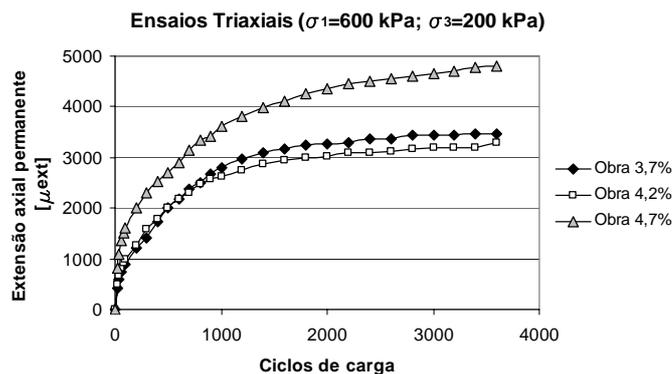


Figura 5.19 - Curvas médias de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico para os provetes de obra para o nível de tensão $\sigma_1=600$ kPa e $\sigma_3=200$ kPa

Diversos parâmetros podem ser determinados a partir das medições efectuadas durante o ensaio e que podem ser usados para avaliar o comportamento da mistura. A pré-norma prEN 12697-25 indica os seguintes:

Extensão axial permanente acumulada, ε_N :

$$\varepsilon_N = \frac{h_0 - h_N}{h_0} \times 100 \quad (20)$$

com,

ε_N – extensão axial permanente acumulada no ciclo N [%]:

h_0 – altura inicial do provete [mm]

h_N – altura do provete no ciclo N [mm]

Este parâmetro representa a extensão axial permanente sofrida pelo provete durante o ensaio.

Uma das formas de avaliar a susceptibilidade à deformação permanente das misturas betuminosas é através da inclinação da fase 2 da curva de fluência, como descrito no capítulo 4.

De acordo com a pré-norma prEN 12697-25 podem utilizar-se dois métodos para determinar os parâmetros retirados da curva de fluência que podem ajudar a avaliar a resistência da mistura betuminosa à deformação permanente. O primeiro tem como fundamento a curva obtida e a sua parte quase linear, o segundo opta pela representação em escala logarítmica. A seguir referem-se os parâmetros determinados seguindo estas metodologias.

a) Determinação da velocidade de deformação ou taxa de fluência, f ,

Consiste em determinar a equação da recta que corresponde à segunda fase da curva de deformação (fase quase linear) utilizando para o efeito uma regressão linear.

$$\varepsilon_N = A_1 + B_1 \times N \quad (21)$$

Logo, a velocidade de deformação ou taxa de fluência, f , pode ser determinada pela seguinte expressão (em $\mu\text{ext./ciclo}$):

$$f = 10^6 \times B_1 \quad (22)$$

Em que o valor da velocidade de deformação pode ser utilizado para avaliar a resistência da mistura à deformação permanente. Este valor corresponde à velocidade de deformação na fase quase linear da curva. Optou-se por calcular este parâmetro entre os ciclos 2000 e 3600, ou seja, na parte final do ensaio. Refira-se que este procedimento foi sempre efectuado uma vez que nenhum dos provetes atingiu a rotura durante o ensaio.

Este método apesar de simples considera apenas a parte quase linear da curva de fluência, “esquecendo” o restante. Esta é a fase cuja caracterização apresenta maior relevância, pois corresponde às deformações por corte a volume constante que são as principais responsáveis pela formação de rodeiras.

Devido ao facto de a fase 2 da curva de fluência não ser exactamente linear a sua inclinação varia em cada ciclo, assim, a velocidade de deformação varia conforme o intervalo de ciclos de carregamento escolhido. No entanto, a variação do valor da velocidade de deformação não é significativa desde que os ciclos se encontrem na fase quase linear. Deste modo é necessário escolher um intervalo de ciclos que apenas contenha a fase linear da curva, evitando que possa haver enviesamento por se considerarem ciclos da fase 1 ou fase 3 da curva de fluência.

b) Determinação dos parâmetros B e $\epsilon_{1000,calc}$

Estes parâmetros são determinados da representação da curva de fluência num gráfico com ambas as escalas logarítmicas. Assim, a curva de fluência pode ser aproximada por uma equação do tipo:

$$\epsilon_N = A \times N^B \quad (23)$$

linearizando a equação (23) obtém-se a equação(24):

$$\log \epsilon_N = \log A + B \times \log N \quad (24)$$

Pode determinar-se através da equação (25) o valor de $\epsilon_{1000, calc}$, que é a deformação após 1000 ciclos, utilizando os valores de A e B determinados:

$$\epsilon_{1000,calc} = A \times 1000^B \quad (25)$$

Os parâmetros B e $\epsilon_{1000,calc}$ podem ser utilizados para caracterizar a mistura betuminosa à deformação permanente.

Na representação em escala logarítmica a curva de fluência é linear. Desta forma, a equação (23) contém a informação de todo o ensaio, o que permite que a modelação seja mais completa. No entanto ao se utilizar informação de todo o ensaio para a modelação incluem-se todas as fase da curva. Com esta aproximação não se procura caracterizar nenhuma fase específica da deformação, mas antes obter uma modelação que represente todo o ensaio. Embora se apresente como mais completa esta aproximação tem a desvantagem de incluir

para a caracterização diferentes causas de deformação, não permitindo uma análise separada das deformações a volume constante.

A pré-norma não especifica a utilização de nenhum módulo, no entanto, foram determinados os valores do módulo de fluência e do módulo resiliente.

Módulo de fluência S_N :

$$S_N = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_N} \times 1000 \quad (26)$$

com,

S_N - módulo de fluência no ciclo N [Mpa];

ε_N - deformação permanente acumulada após N ciclos, neste caso 3600 ciclos [ext.];

σ_d - tensão desviante aplicada, $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ [kPa].

A determinação do módulo de fluência foi análoga ao realizado no ensaio de compressão uniaxial cíclico, mas neste caso, utilizando a tensão desviante.

Módulo resiliente, E_r :

$$E_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{ri}} \quad (27)$$

com,

E_r - módulo resiliente no ciclo i [Mpa];

ε_{ri} - deformação recuperada ocorrida no ciclo no ciclo i [ext.];

σ_d - tensão desviante aplicada [kPa].

Os valores do módulo resiliente foram determinados de forma automática pelo *software* do equipamento e os resultados apresentados representam a média dos valores obtidos entre o ciclo 2000 e 3600.

A pré-norma considera duas condições para a paragem antecipada do ensaio. A primeira ocorre quando se verifica que a curva apenas contém a fase 1 e a fase 3 e a segunda se após um pequeno número ciclos de carga a extensão ultrapassa os 6%. Nestes casos a mistura deve ser considerada como muito susceptível à deformação permanente para as condições de ensaio utilizadas. Em situações destas a comparação entre misturas pode ser realizada através dos valores da deformação permanente obtidos para após um determinado número de ciclos de carregamento (por exemplo ε_{1000} e ε_{10000}). Não se verificaram estas condições em nenhum ensaio deste trabalho.

Para a análise de resultados determinaram-se todos os parâmetros acima descritos. No Quadro 5.7 e no Quadro 5.8 apresentam-se os resultados obtidos para os provetes de laboratório e de obra respectivamente.

Apresentam-se em seguida os valores médios obtidos em cada série, estes encontram-se no Quadro 5.9 e no Quadro 5.10. Nestes quadros designam-se as séries por PL (provetes laboratório) seguido do valor da percentagem em betume ou A (provetes de obra) seguido de 1, 2 ou 3 (percentagens em betume de 3,7%, 4,2% e 4,7% respectivamente), em ambos os casos é indicado o nível de tensão do ensaio.

Os resultados obtidos mostram como tendência que o acréscimo da quantidade de betume conduz a misturas menos resistentes, como esperado. O ensaio de compressão triaxial cíclico permite desta forma diferenciar o comportamento das misturas e ordená-las de forma coerente. No entanto, os resultados nem sempre são claros podendo ser observadas diversas situações em que diferentes parâmetros fornecem classificações díspares.

Quadro 5.7 - Resultados para os provetes realizados em laboratório

Provete	Pb [%]	Vv [%]	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	ϵ_{3600} [µext]	f [µext./ciclo]	S_N [MPa]	E_r [MPa]	B	$\epsilon_{1000,calc}$ [µext]
PL19	3,7	4,0	150	50	449,3	0,0138	222,6	184,3	0,1552	383,5
PL31	3,7	4,8	150	50	1542,4	0,0527	64,8	198,7	0,6777	839,3
PL28	4,2	2,2	150	50	1031,9	0,0686	96,9	199,3	0,2502	769,8
PL58	4,2	3,6	150	50	1873,9	0,0593	53,4	217,1	0,5171	1139,9
PL13	4,7	1,9	150	50	1462,6	0,0826	68,4	184,1	0,3015	644,1
PL23	4,7	1,6	150	50	1608,1	0,0815	62,2	177,0	0,5167	1002,6
PL32	3,7	4,7	300	100	946,9	0,0372	211,2	261,0	0,2484	738,0
PL34	3,7	4,5	300	100	1228,6	0,0152	162,8	255,1	0,4154	867,0
PL26	4,2	2,6	300	100	373,9	0,0352	534,9	225,8	0,3748	220,4
PL53	4,2	3,5	300	100	2724,8	0,0396	73,4	96,9	0,3029	2116,6
PL21	4,7	1,6	300	100	1569,1	0,0426	127,5	281,5	0,3079	1197,3
PL55	4,7	1,8	300	100	2234,6	0,0690	89,5	256,6	0,5100	1439,7
PL33	3,7	4,3	600	200	1888,8	0,0531	211,8	343,4	0,3365	1376,1
PL51	3,7	4,2	600	200	1943,1	0,1185	205,9	371,5	0,5779	1085,7
PL27	4,2	2,0	600	200	3465,6	0,1914	115,4	326,0	0,3614	2426,5
PL54	4,2	3,0	600	200	2131,2	0,1292	187,7	294,6	0,5293	1307,3
PL56	4,7	2,7	600	200	2974,1	0,6166	134,5	243,2	0,5619	1332,8
PL61	4,7	2,4	600	200	2148,4	0,0986	186,2	303,9	0,3821	1479,5

Quadro 5.8 - Resultados para os provetes realizados em obra

Provete	Pb [%]	Vv [%]	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	ϵ_{3600} [μext]	f [$\mu\text{ext./ciclo}$]	S_N [MPa]	E_r [MPa]	B	$\epsilon_{1000calc}$ [μext]
A1-03	3,7	6,0	150	50	2304,2	0,0731	43,4	212,6	0,6246	1351,9
A1-06	3,7	4,3	150	50	2711,8	0,1729	36,9	256,6	0,5188	1603,3
A2-03	4,2	4,8	150	50	3116,5	0,2302	32,1	125,1	0,4737	1915,4
A2-10	4,2	5,7	150	50	2030,8	0,1156	49,2	170,1	0,4319	1362,3
A3-03	4,7	2,8	150	50	4263,7	0,3113	23,5	180,0	0,4694	2617,7
A3-09	4,7	3,6	150	50	3655,8	0,2363	27,4	161,8	0,3752	2512,3
A1-08	3,7	4,1	300	100	2788,7	0,1043	71,7	266,7	0,4293	1894,1
A1-10	3,7	4,3	300	100	2866,4	0,1219	69,8	256,6	0,4228	1881,3
A2-04	4,2	5,2	300	100	2912,0	0,1974	68,7	261,4	0,4122	1903,3
A2-08	4,2	3,9	300	100	3402,7	0,1904	58,8	183,0	0,4677	2164,4
A3-04	4,7	3,0	300	100	2090,8	0,1232	95,7	229,8	0,5214	1322,7
A3-07	4,7	4,6	300	100	4160,4	0,2486	48,1	152,3	0,3566	2832,0
A1-05	3,7	5,5	600	200	3347,7	0,1598	119,5	317,8	0,4388	2263,3
A1-09	3,7	5,7	600	200	3605,7	0,1116	110,9	359,8	0,3396	2616,1
A2-06	4,2	5,1	600	200	4273,5	0,0967	93,6	337,3	0,2810	3319,9
A2-09	4,2	5,1	600	200	2295,0	0,1432	174,3	332,0	0,4637	1385,6
A3-05	4,7	3,6	600	200	4282,9	0,2427	93,4	307,1	0,3386	3035,0
A3-08	4,7	4,2	600	200	5302,6	0,3104	75,4	260,4	0,3154	3752,9

Quadro 5.9 - Resultados obtidos em cada série de provetes realizados em laboratório no ensaio de compressão triaxial cíclico

Série	Vv [%]	ϵ_{3600} [μext]	f [$\mu\text{ext./ciclo}$]	S_N [MPa]	E_r [MPa]	B	$\epsilon_{1000calc}$ [μext]
PL3,7-150/50	4,4	995,9	0,0333	143,7	191,5	0,4165	611,4
PL4,2-150/50	2,9	1452,9	0,0640	75,1	208,2	0,3837	954,9
PL4,7-150/50	1,8	1535,3	0,0821	65,3	180,6	0,4091	823,4
PL3,7-300/100	4,6	1087,8	0,0262	187,0	258,1	0,3319	802,5
PL4,2-300/100	3,1	1549,3	0,0374	304,2	161,3	0,3389	1168,5
PL4,7-300/100	1,7	1901,8	0,0558	108,5	269,1	0,4090	1318,5
PL3,7-600/200	4,3	1916,0	0,0858	208,8	357,5	0,4572	1230,9
PL4,2-600/200	2,5	2798,4	0,1603	151,6	310,3	0,4454	1866,9
PL4,7-600/200	2,6	2561,3	0,3576	160,3	273,6	0,4720	1406,2

Quadro 5.10 - Resultados obtidos em cada série de provetes realizados em obra no ensaio de compressão triaxial cíclico

Série	V _v [%]	ϵ_{3600} [μext]	f [μext./ciclo]	S_N [MPa]	E_r [MPa]	B	$\epsilon_{1000calc}$ [μext]
A1-150/10	5,2	2508,0	0,1230	40,1	234,6	0,5717	1477,6
A2-150/50	5,3	2573,7	0,1729	40,7	147,6	0,4528	1638,9
A3-150/50	3,2	3959,7	0,2738	25,4	170,9	0,4223	2565,0
A1-300/100	4,2	2827,6	0,1131	70,7	261,7	0,4261	1887,7
A2-300/100	4,6	3157,4	0,1939	63,7	222,2	0,4400	2033,9
A3-300/100	3,8	3125,6	0,1859	71,9	191,1	0,4390	2077,4
A1-600/200	5,6	3476,7	0,1357	115,2	338,8	0,3892	1131,8
A2-600/200	5,1	3284,2	0,1200	133,9	334,7	0,3724	2352,7
A3-600/200	3,9	4792,8	0,2765	84,4	283,7	0,3270	3393,9

A classificação obtida nos diversos níveis de tensão nem sempre é coincidente. Analisando os níveis de tensão observa-se que nenhum deles se destaca por oferecer classificações mais nítidas, existindo alguma homogeneidade nos resultados e tendências obtidas com os diferentes níveis de tensão. Como esperado, níveis de tensão superiores conduzem a deformações, velocidades de deformação e módulos superiores.

Os resultados obtidos com os provetes de laboratório foram sensivelmente melhores que os obtidos com os provetes de obra. Este facto deve-se essencialmente ao processo de fabrico em laboratório, nomeadamente a um melhor controlo na dosagem dos diversos componentes e ao processo de compactação. De facto, os provetes de laboratório apresentam uma resistência à deformação permanente considerável. A grande rigidez dos provetes pode assim ajudar a explicar alguma dificuldade em obter classificações nítidas.

Em seguida apresentam-se graficamente as relações obtidas para cada parâmetro com aptidão para caracterizar a mistura à deformação permanente com base nos resultados do ensaio de compressão triaxial cíclico.

Na Figura 5.20 representam-se os valores da extensão axial permanente medida no ensaio para os provetes de laboratório e de obra. Observa-se que para cada nível de tensão a extensão aumentou com a percentagem em betume. Níveis de tensão mais elevados conduziram a extensões mais elevadas. No geral a classificação das misturas é a esperada e apresenta-se de forma coerente. As classificações obtidas com os provetes de laboratório e de obra são coincidentes.

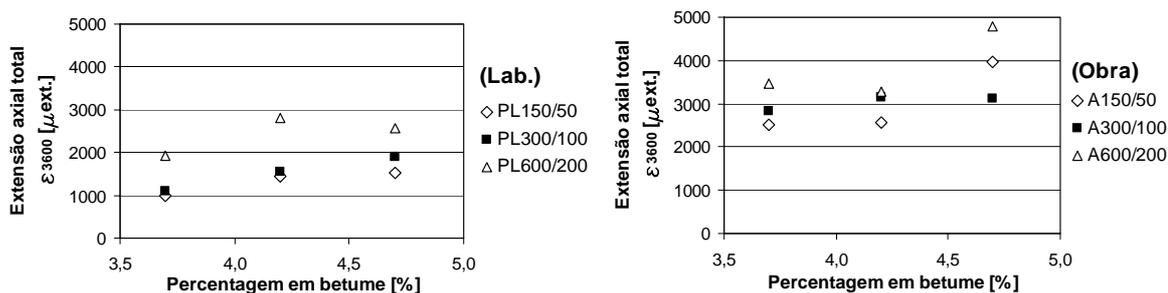


Figura 5.20 - Extensões axiais permanentes, ϵ_{3600} , obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico

Na Figura 5.21 representam-se os valores da velocidade de deformação para os provetes de laboratório e de obra. A velocidade de deformação aumentou com o aumento da percentagem em betume e com o aumento do nível de tensão. Nos provetes de laboratório estas tendências são nítidas obtendo-se uma ordenação de misturas evidente. Para os provetes de obra a classificação das misturas é mais difusa, mas de forma geral apresenta as tendências esperadas. A velocidade de deformação fornece bons resultados demonstrando potencial para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente.

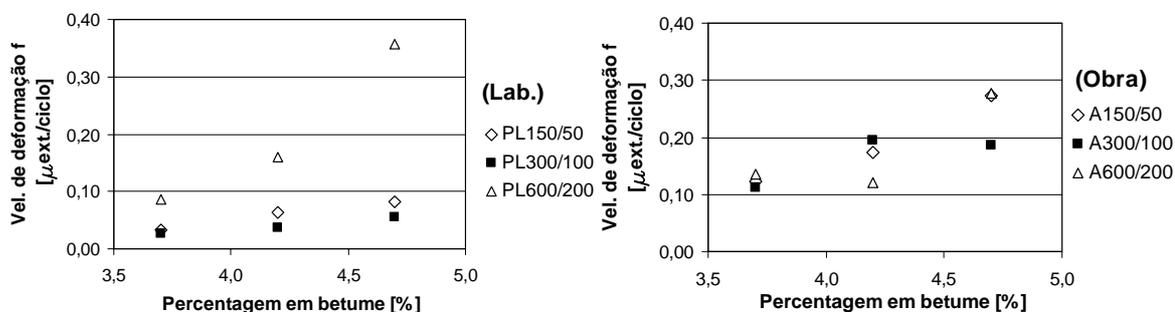


Figura 5.21 - Velocidades de deformação, f , obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico

O módulo de fluência apresenta resultados globais semelhantes aos obtidos com a extensão axial permanente total do ensaio. O módulo de fluência decresce com a percentagem em betume e aumenta com o nível de tensão, como se pode observar na Figura 5.22. No entanto, a caracterização e classificação das misturas é similar à obtida com a extensão axial permanente, pelo que, sendo este último um parâmetro mais compreensível a utilização do módulo de fluência não se apresenta vantajosa. O objectivo de normalizar os resultados obtidos com diferentes níveis de tensão não é alcançado, pelo que a correspondência de resultados obtidos com diferentes níveis de tensão utilizando este parâmetro deve ser analisado cuidadosamente.

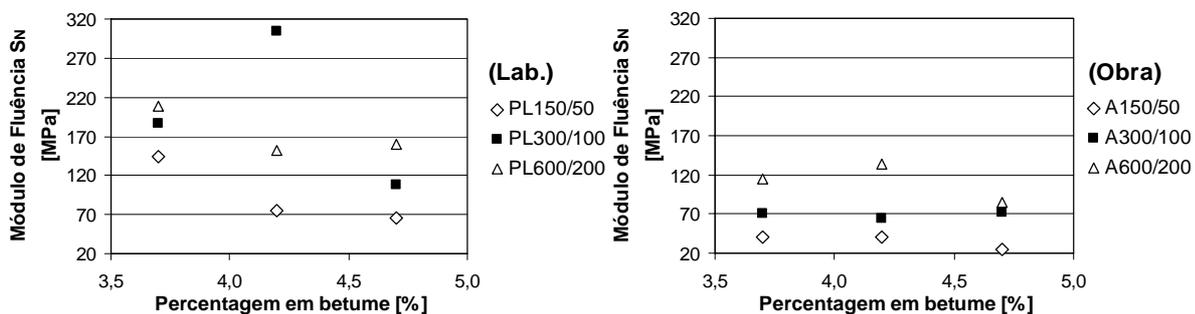


Figura 5.22 - Módulos de fluência, S_N , obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclico

A classificação das misturas obtida com o módulo resiliente revelou-se nítida e coerente, tanto para os provetes de laboratório como de obra. O valor do módulo resiliente diminui com a percentagem em betume e com o nível de tensão. A determinação de forma automática pelo *software* do equipamento deste valor permitiu obter resultados fiáveis. Estes mostram tendências nítidas e uma classificação de misturas evidente. Este parâmetro mostra assim bom potencial para caracterização de misturas à deformação permanente. Observando os resultados verifica-se que este é o parâmetro onde os valores obtidos com os provetes de laboratório e de obra são no geral mais semelhantes.

Na Figura 5.23 apresentam-se graficamente os resultados obtidos utilizando o módulo resiliente.

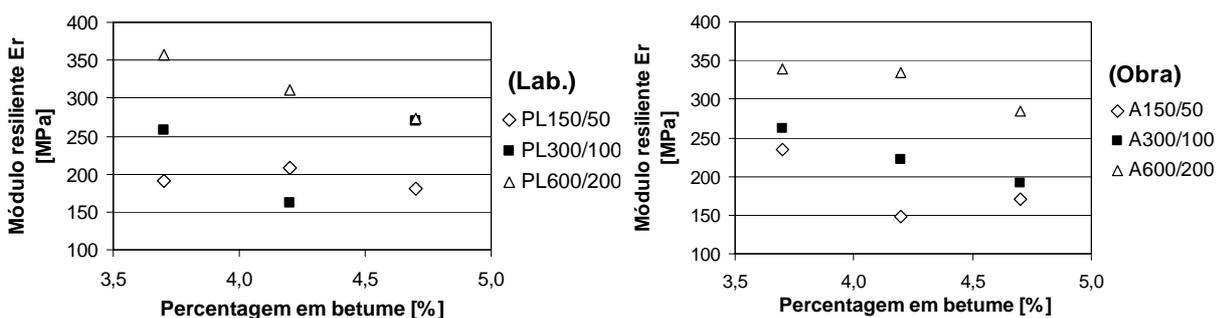


Figura 5.23 - Módulos resilientes, E_r , obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclico

Apesar de ser determinado com a extensão recuperada por ciclo, e portanto não analisar explicitamente a extensão permanente, para misturas com características semelhantes é de esperar que existam proporções entre a extensão total, permanente e recuperada. Assim, é de esperar que exista alguma correlação entre o valor da extensão recuperada e permanente num ciclo, isto é, que a um aumento de uma corresponda um aumento da outra. Isto pode explicar as boas correlações obtidas. Esta análise deixa de ser verdadeira se compararmos misturas em

que os seus componentes tenham características diversas. No entanto, por razões já apontadas, este não é um parâmetro interessante para utilização na prática corrente.

A modelação da curva de fluência por uma equação do tipo potência permite determinar o parâmetro B. No entanto os resultados obtidos com este parâmetro apresentam alguma dispersão, não se encontrando tendências nítidas, tanto no que diz respeito à sua evolução com a percentagem em betume como com a sua evolução com o nível de tensão (Figura 5.24). Existem assim, algumas incongruências na classificação obtida tanto com os provetes de laboratório como com os de obra. Este parâmetro revela pouco potencial para a caracterização à deformação permanente, isto pode dever-se à inclusão na modelação de toda a curva de fluência, como referido anteriormente.

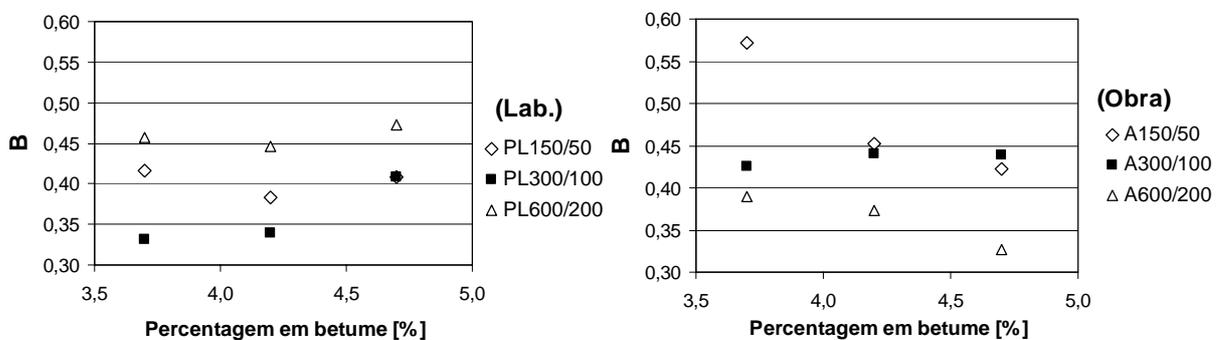


Figura 5.24 - Valor do parâmetro B obtido no ensaio de compressão triaxial cíclico

Utilizando a equação potencial resultante da modelação da curva de fluência é possível determinar para um determinado número de ciclos a extensão axial permanente acumulada. Este valor não corresponde ao medido no ensaio, sendo o que resulta do cálculo directo utilizando a equação (23). Na pré-norma é sugerido que se determine o valor $\epsilon_{1000,calc}$, isto é, a extensão axial permanente acumulada após 1000 ciclos de carregamento. Da Figura 5.25 observa-se que o valor de $\epsilon_{1000,calc}$ aumentou com o aumento da percentagem em betume e com o aumento do nível de tensão. No entanto, os resultados obtidos são muito semelhantes aos obtidos com a extensão axial permanente total medida no ensaio, ϵ_{3600} (Figura 5.20). Como não se obtêm melhores resultados com o valor de $\epsilon_{1000,calc}$, a utilização do valor de ϵ_{3600} apresenta-se mais interessante pois é um parâmetro medido directamente do ensaio e portanto mais intuitivo.

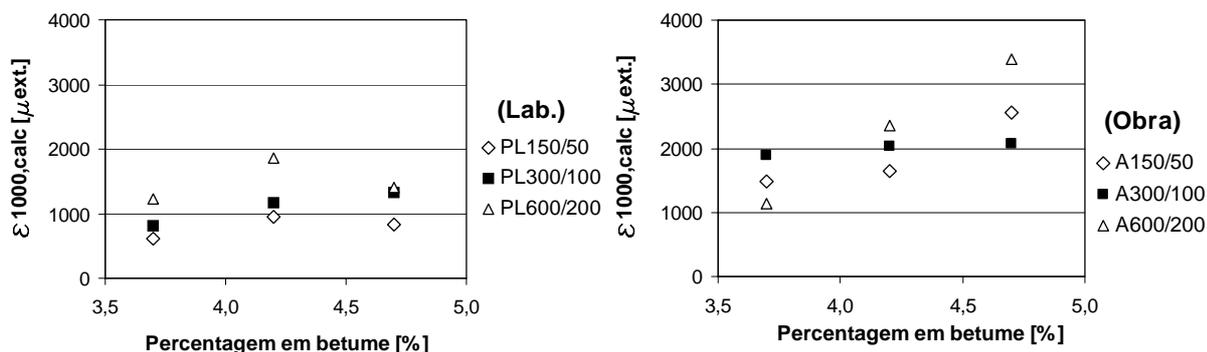


Figura 5.25 - Valor do parâmetro $\epsilon_{1000,calc}$ obtido no ensaio de compressão triaxial cíclico

Apesar de existirem diversas diferenças nas classificações obtidas pelos diferentes parâmetros, de forma mais ou menos evidente todos apontam para as mesmas conclusões. No entanto aqueles cujas classificações se aproximam mais do esperado, tanto nas séries de laboratório como de obra, são a extensão axial permanente total, a velocidade de deformação e o módulo de resiliente. Pelos motivos anteriormente apontados a velocidade de deformação será o mais indicado para uma utilização quotidiana.

Existem parâmetros que oferecem classificações díspares. Este facto merece ser realçado, pois em processo de formulação de misturas pode induzir erros na selecção destas. Ainda assim, este ensaio apresenta potencialidades na caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente, devendo existir algum cuidado no parâmetro escolhido para análise de resultados e na escolha das condições de ensaio.

Parâmetros como a extensão axial permanente acumulada e a velocidade de deformação apresentam-se como mais interessantes para utilização quotidiana. Os restantes parâmetros são mais complexos de determinar ou têm conceitos menos directos e não apresentam resultados qualitativamente superiores.

Relativamente aos níveis de tensão verifica-se que a níveis de tensão superiores, maior tensão desviante e maior tensão axial máxima, correspondem maiores deformações, no entanto aumenta a dispersão de resultados. Este facto é mencionado em alguns estudos (Freire, 2002). Isto pode ajudar a compreender porque nenhum nível de tensão apresenta de forma global tendências mais nítidas com melhores correlações.

5.4 Ensaio de Corte a Altura Constante

O ensaio de corte a altura constante é um ensaio com origem na prática tecnológica americana. O procedimento de ensaio utilizado foi o descrito na AASHTO TP7 (AASHTO, 2001).

Na Figura 5.26 e na Figura 5.27 podem observar-se as curvas médias de deformação obtidas para as diversas séries. Refira-se que da globalidade dos provetes ensaiados os resultados dos provetes VA39 e PC47-47 não foram considerados por apresentarem anomalias.

Os resultados obtidos com os provetes de laboratório mostram uma diferença de comportamento bastante acentuada entre as séries de provetes compactados com cilindro e por vibro-compressão (Figura 5.26). Os provetes obtidos por vibro-compressão apresentaram uma resistência superior, registando deformações inferiores no ensaio. Embora os provetes compactados com cilindro apresentem menor resistência, os seus resultados são semelhantes aos obtidos com a série recolhida em obra. Isto pode significar uma importante vantagem pois permite obter em laboratório valores próximos dos obtidos com os provetes recolhidos em obra.

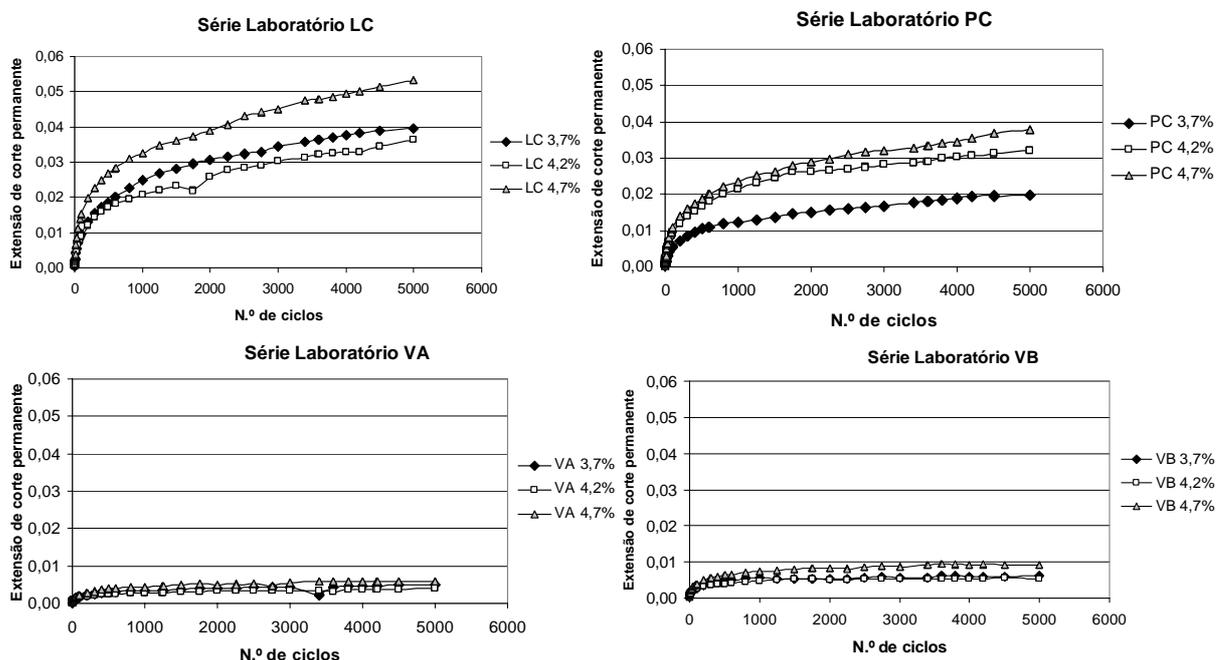


Figura 5.26 - Curvas de deformação médias obtidas no ensaio de corte a altura constante para as séries de provetes de laboratório

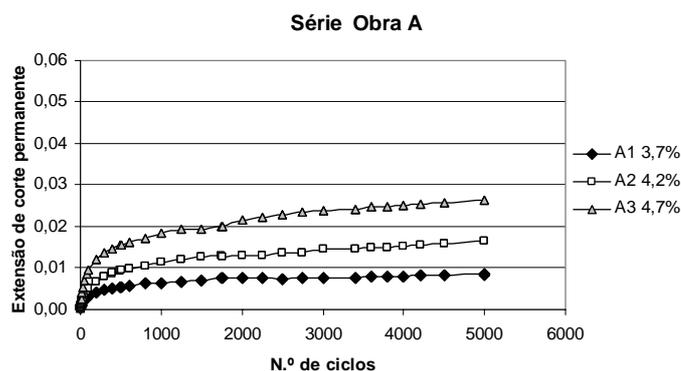


Figura 5.27 - Curvas de deformação médias obtidas no ensaio de corte a altura constante para os provetes de obra

O procedimento AASHTO TP7 refere para análise de resultados apenas a deformação permanente acumulada durante o ensaio. Esta é definida pela equação (28) (AASHTO, 2001):

$$\gamma_p = \frac{\delta_{def.final} - \delta_{def.inicial}}{h} \quad (28)$$

com,

γ_p – extensão por corte permanente acumulada no final do ensaio [ext.];

$\delta_{def.final}$ – deformação permanente por corte no final do ensaio [mm];

$\delta_{def.inicial}$ – deformação permanente por corte no início do ensaio (normalmente assume o valor zero) [mm];

h – altura do provete [mm].

É comum o módulo de corte resiliente também ser utilizado para a caracterização das misturas.

Para além destes parâmetros Sousa (SHRP, 1994) criou um conjunto de diagramas, com base nos resultados laboratoriais que obteve, que permitem obter qual o n.º de eixos de 80 kN que pode solicitar a mistura até esta apresentar uma deformação considerada inaceitável. É habitual considerar para esta deformação de rodeira o valor de 12,7 mm (0,5 polegadas), este valor de rodeira corresponde a uma extensão permanente de corte de 5,454% no ensaio laboratorial. Estes diagramas apresentam-se na Figura 5.28.

Em seguida resume-se a utilização destes diagramas.

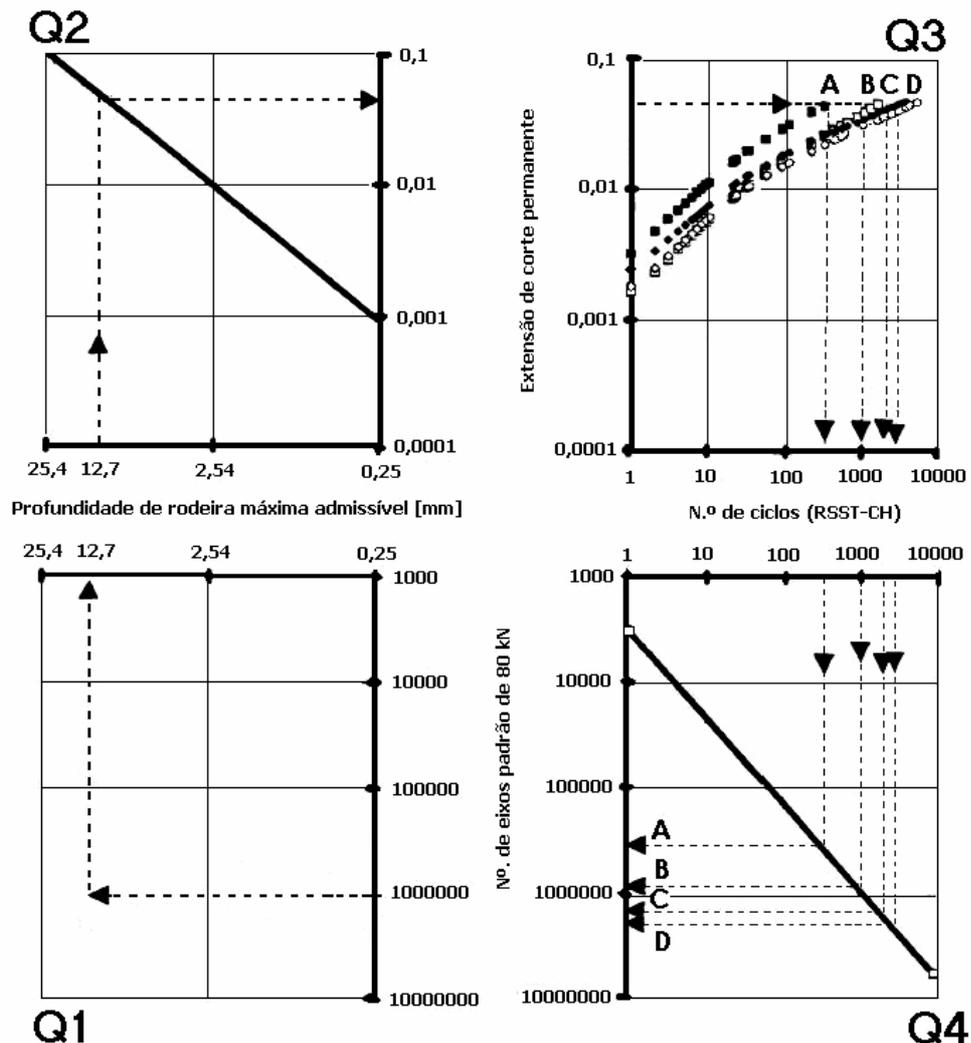


Figura 5.28 - Diagramas que permitem avaliar a profundidade de rodeira com base nos resultados do ensaio de corte a altura constante (SHRP, 1994)

Diagrama Q1:

- Entrar com o número de eixos padrão de 80 kN que solicita o pavimento durante a sua vida útil;
- Escolher a profundidade de rodeira admissível.

Na Figura 5.28 encontra-se representado um exemplo de aplicação em que foram analisadas 4 misturas betuminosas (designadas por A, B, C e D). Assumiu-se um N_{dim}^{80} de 1.000.000 eixos padrão de 80 kN e um valor de rodeira admissível de 12,7 mm.

Diagrama Q2:

- Usando o valor da deformação máxima aceitável, intersectar a recta representada no diagrama e obter a extensão máxima aceitável no ensaio de corte a altura constante. A recta do diagrama corresponde à equação (29):

$$\text{Profundidade de Rodeira} = 279 \text{ máxima extensão admissível por corte (RSCH)} \quad (29)$$

No exemplo representado, entrando no diagrama Q2 com uma profundidade de rodeira de 12,7 mm obtém-se uma extensão de corte máxima no ensaio de 0,04545 ou seja 4,545%.

Diagrama Q3:

- Determinar a média das temperaturas dos 7 dias consecutivos mais quentes por ano. Esta temperatura representativa é determinada a uma profundidade no pavimento de 51 mm;
- Realizar ensaios de corte a altura constante (RSCH) à temperatura representativa do pavimento;
- Determinar o número de ciclos que corresponde à extensão máxima aceitável no ensaio de corte para a mistura.

No diagrama Q3 aparecem representados os resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para as misturas em estudo. É possível obter neste diagrama o número de ciclos para o qual cada mistura atingiu a extensão permanente de corte admissível, neste caso 4,545%.

Diagrama Q4:

- Determinar o número de eixos padrão que corresponde ao número de ciclos no ensaio. Se este for superior ao de projecto a mistura é aceite. A recta do diagrama corresponde à equação (30):

$$\log (n.^\circ \text{ de ciclos}) = -4,36 + 1,24 \log (n.^\circ \text{ de eixos padrão } 80 \text{ kN}) \quad (30)$$

No exemplo é possível observar que as misturas A e B obtiveram valores do número de eixos padrão inferiores ao de projecto e as misturas C e D valores superiores. Assim, as misturas C e D poderiam ser utilizadas enquanto as misturas A e B deveriam ser rejeitadas.

Estes diagramas pretendem relacionar os resultados do ensaio com a realidade, permitindo servir de auxílio à formulação de misturas e predição de desempenho.

Este ensaio realiza-se a altura constante procurando que as deformações ocorram a volume constante, deste modo, não existe a densificação da mistura ocorrida noutros ensaios.

Verifica-se na fase inicial do ensaio um aumento de rigidez da mistura devido à restrição da diletância e a alguma densificação (SHRP, 1994). Desta forma a resistência da mistura depende do volume de vazios. Na Figura 5.29 pode observar-se que as misturas resistem mais para volumes de vazios na ordem dos 3%.

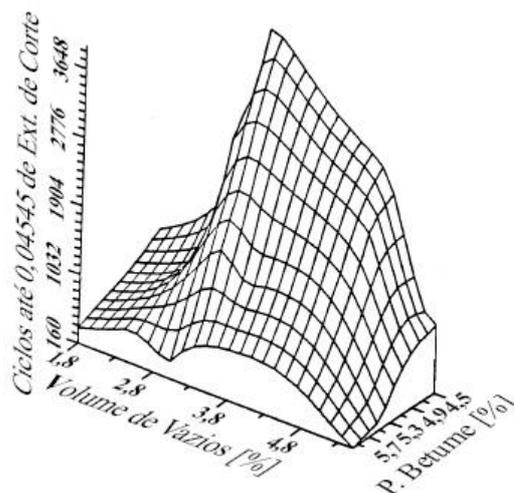


Figura 5.29 - Relação entre a resistência à deformação permanente, a percentagem em betume e o volume de vazios (SHRP, 1994)

É assim conveniente que na caracterização à deformação permanente pelo ensaio de corte a altura constante se utilizem provetes com volume de vazios semelhante, pois de contrário pode não se obter uma classificação correcta das misturas. A utilização de valores do volume de vazios que se aproximem dos 3%, onde se verifica a resistência máxima das misturas é aconselhável, por exemplo, se se quiser utilizar os ábacos da Figura 5.28.

Do Quadro 5.11 ao Quadro 5.15 apresentam-se os resultados obtidos para cada provete e em cada série. Para cada provete é referida a extensão por corte no final do ensaio, o valor do módulo de corte resiliente, o número de ciclos de carga até se atingir 4,545% de extensão por corte e o número de eixos padrão de 80 kN estimados para no pavimento se atingir 12,7 mm de profundidade de rodeira. Este valor tem como base a metodologia referida anteriormente (Figura 5.28). Estes resultados são determinados automaticamente utilizando *software* apropriado.

O valor do número de ciclos até se atingir 4,545% de extensão é determinado ajustando a deformação do provete no ensaio por expressões do tipo:

$$\gamma_p = a \times ciclo^b \quad (31)$$

com, a e b constantes.

No Quadro 5.16 mostram-se os valores médios obtidos para cada série de provetes.

Quadro 5.11 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série LC

Provete	Origem	Pb [%]	Vv [%]	Extensão permanente total	Módulo de corte resiliente [kPa]	Ciclos 4,545% de extensão	ESAL rodeira de 12,7 mm	Vel. de deformação [μ ext/ciclo]
LC37-1	Lab.	3,7	4,7	0,0415	141.986,4	4163	2,72E+06	3,139
LC37-2	Lab.	3,7	5,1	0,0378	146.769,2	4949	3,13E+06	2,192
LC42-1	Lab.	4,2	3,6	0,0248	206.660,5	12855	6,76E+06	1,480
LC42-2	Lab.	4,2	3,6	0,0478	183.460,5	3547	2,39E+06	4,265
LC47-1	Lab.	4,7	4,1	0,0695	113.890,9	1759	1,36E+06	6,672
LC47-2	Lab.	4,7	3,7	0,0369	143.692,6	4289	2,79E+06	1,151

Quadro 5.12 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série PC

Provete	Origem	Pb [%]	Vv [%]	Extensão permanente total	Módulo de corte resiliente [kPa]	Ciclos 4,545% de extensão	ESAL rodeira de 12,7 mm	Vel. de deformação [μ ext/ciclo]
PC37-42	Lab.	3,7	4,0	0,02183	261.302,1	18417	9,03E+06	2,934
PC37-43	Lab.	3,7	4,3	0,01829	204.040,6	31960	1,41E+07	1,201
PC37-50	Lab.	3,7	3,7	0,01917	181.733,4	26106	1,20E+07	0,867
PC42-44	Lab.	4,2	3,0	0,03073	175.920,3	9237	5,18E+06	2,193
PC42-45	Lab.	4,2	2,6	0,01707	277.209,5	20409	9,81E+06	1,078
PC42-49	Lab.	4,2	2,0	0,04864	149.323,0	2551	1,83E+06	3,088
PC47-46	Lab.	4,7	2,6	0,03783	169.634,4	5795	3,56E+06	3,037
PC47-48	Lab.	4,7	2,2	0,03783	173.866,1	5108	3,21E+06	3,172

Quadro 5.13 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série VA

Provete	Origem	Pb [%]	Vv [%]	Extensão permanente total	Módulo de corte resiliente [kPa]	Ciclos 4,545% de extensão	ESAL rodeira de 12,7 mm	Vel. de deformação [μ ext/ciclo]
VA36	Lab.	3,7	5,2	0,00449	342.977,2	3884201	6,76E+08	0,290
VA37	Lab.	3,7	4,5	0,00539	284.559,9	3269817	5,89E+08	0,435
VA29	Lab.	4,2	3,0	0,00798	115.414,1	1351805	2,89E+08	0,565
VA30	Lab.	4,2	3,4	0,00126	948.937,9	2059267412	1,06E+11	0,032
VA41	Lab.	4,2	3,0	0,00249	309.078,5	6627709	1,04E+09	0,155
VA24	Lab.	4,7	1,3	0,00580	283.812,3	1714721	3,50E+08	0,045
VA25	Lab.	4,7	1,2	0,00547	402.171,8	1614916	3,33E+08	0,555
VA40	Lab.	4,7	1,8	0,00595	241.506,7	955397	2,18E+08	-0,310

Quadro 5.14 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série VB

Provete	Origem	Pb [%]	Vv [%]	Extensão permanente total	Módulo de corte resiliente [kPa]	Ciclos 4,545% de extensão	ESAL rodeira de 12,7 mm	Vel. de deformação [μ ext/ciclo]
VB18-1	Lab.	3,7	4,7	0,00282	311.620,0	109072753	9,96E+09	-0,049
VB18-2	Lab.	3,7	4,6	0,00930	168.421,9	789107	1,87E+08	0,405
VB06-1	Lab.	4,2	5,9	0,00227	297.974,5	7358948662	2,97E+11	0,067
VB06-2	Lab.	4,2	5,5	0,00864	193.815,4	288897	8,32E+07	0,180
VB14-1	Lab.	4,7	4,0	0,01020	71.793,1	224844	6,79E+07	-0,279
VB14-2	Lab.	4,7	4,0	0,00786	246.641,2	554951	1,41E+08	0,441

Quadro 5.15 - Resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante para a série de obra

Provete	Origem	Pb [%]	Vv [%]	Extensão permanente total	Módulo de corte resiliente [kPa]	Ciclos 4,545% de extensão	ESAL rodeira de 12,7 mm	Vel. de deformação [μ ext/ciclo]
A1-1	Obra	3,7	3,8	0,01212	383.325,2	45409	1,87E+07	0,830
A1-2	Obra	3,7	4,6	0,00470	256.554,5	87330823	8,32E+09	0,004
A2-1	Obra	4,2	4,7	0,01360	286.849,9	57432	2,26E+07	0,775
A2-2	Obra	4,2	5,1	0,01931	233.405,3	19292	9,38E+06	1,145
A3-1	Obra	4,7	4,5	0,03511	169.595,8	5694	3,51E+06	2,140
A3-2	Obra	4,7	4,1	0,01775	183.545,8	37316	1,60E+07	0,447

Quadro 5.16 - Resultados médios obtidos por série e por percentagem em betume

Série	Origem	Pb [%]	Vv [%]	Extensão permanente total	Módulo de corte resiliente [kPa]	Ciclos 4,545% de extensão	ESAL rodeira de 12,7 mm	Vel. de deformação [μ ext/ciclo]
LC	Lab.	3,7	4,9	0,03961	144.377,8	4556	2,93,E+06	2,666
		4,2	3,6	0,03632	195.060,5	8201	4,58,E+06	2,872
		4,7	3,9	0,05319	128.791,8	3024	2,07,E+06	3,912
PC	Lab.	3,7	4,0	0,01976	215.692,0	25494	1,17E+07	1,667
		4,2	2,5	0,03215	200.817,6	10732	5,61E+06	2,120
		4,7	2,4	0,03783	171.750,3	5452	3,38E+06	3,104
VA	Lab.	3,7	4,9	0,00494	313.768,5	3577009	6,32E+08	0,362
		4,2	3,1	0,00391	457.810,2	689082309	3,59E+10	0,250
		4,7	1,4	0,00574	309.163,6	1428345	3,00E+08	0,097
VB	Lab.	3,7	4,7	0,00606	240.021,0	54930930	5,07,E+09	0,178
		4,2	5,7	0,00545	245.894,9	3679618780	1,49,E+11	0,124
		4,7	4,0	0,00903	159.217,1	389898	1,04,E+08	0,081
A	Obra	3,7	4,2	0,00841	319.939,9	43688116	4,17,E+09	0,417
		4,2	4,9	0,01646	260.127,6	38362	1,60,E+07	0,960
		4,7	4,3	0,02643	176.570,8	21505	9,73,E+06	1,294

Apesar de não ser corrente a determinação da velocidade de deformação nestes ensaios, neste trabalho determinou-se esse parâmetro por analogia com os restantes ensaios. Assim, foi determinada a velocidade de deformação dos provetes entre os ciclos 3000 e 5000 (à excepção da série de laboratório VA com percentagem em betume de 3,7% que registou algumas leituras com valores anómalos, como é visível na Figura 5.26, pelo que esses ciclos não foram considerados).

Em seguida apresentam-se graficamente as relações entre os resultados obtidos para os diversos parâmetros e as percentagens em betume.

Na Figura 5.30 apresentam-se os valores da extensão de corte permanente acumulada. A extensão de corte permanente no ensaio aumenta com a percentagem em betume, isto é particularmente visível nas séries LC, PC e de obra, para as quais este parâmetro fornece bons resultados. Para as séries obtidas por vibro-compressão obtêm-se extensões inferiores e a classificação obtida é menos nítida.

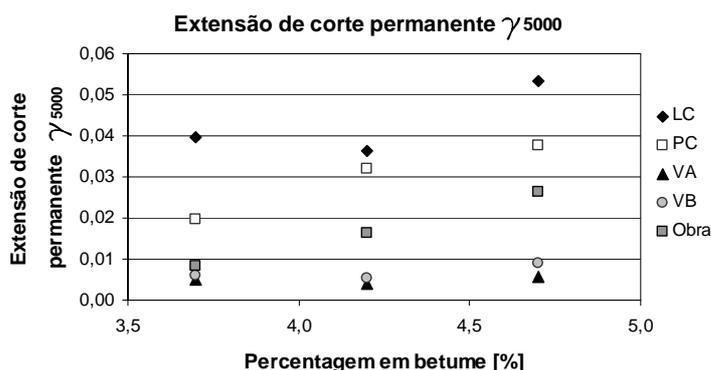


Figura 5.30 - Extensões de corte permanentes obtidas no ensaio de corte a altura constante

Os valores do módulo de corte resiliente são apresentados na Figura 5.31. Estes diminuem com o aumento da percentagem em betume. No entanto, apenas para a série de obra e série PC a classificação é nítida, embora as tendências gerais sejam as esperadas. A diferença de comportamento entre as séries compactadas com cilindro e por vibro-compressão não é tão evidente como a observada noutros parâmetros. Este parâmetro oferece a caracterização de misturas esperada mas de forma menos clara que outros parâmetros.

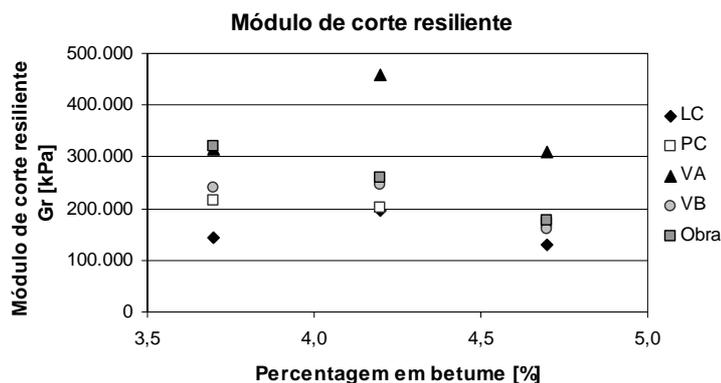


Figura 5.31 - Módulos de corte resilientes obtidos no ensaio de corte a altura constante

Na Figura 5.32 apresentam-se os resultados obtidos para o número de ciclos até se atingir uma extensão de 4,545% no provete e o número de eixos padrão até se atingir uma profundidade de rodeira de 12,7 mm. Foi utilizada uma escala logarítmica para a representação destes valores pois existe uma variação apreciável na ordem de grandeza dos resultados. Estes valores estão relacionados pela equação (30), desta forma ambos fornecem a mesma classificação de misturas. A classificação de misturas é a esperada para as séries de laboratório compactadas com cilindro e para a série de obra. Nas séries obtidas por vibro-compressão os provetes com percentagem em betume de 4,2% obtiveram os melhores resultados. Estes parâmetros evidenciam a diferença de comportamento entre as séries obtidas por vibro-compressão e as restantes. A caracterização das misturas é a esperada embora menos evidente que a observada com outros parâmetros.

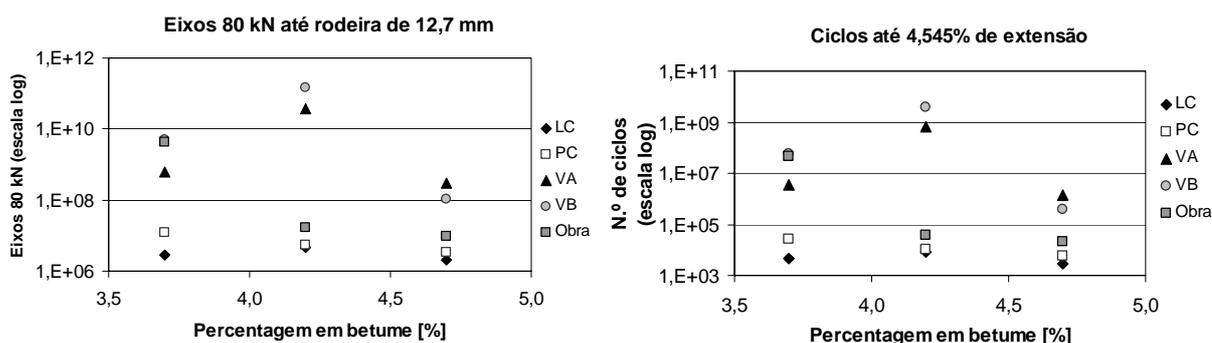


Figura 5.32 - N.º de ciclos até se obter uma extensão de corte de 4,545% e n.º de eixos padrão até se verificar uma profundidade de rodeira de 12,7 mm

A velocidade de deformação, embora não seja um parâmetro habitualmente utilizado, apresenta-se como um bom parâmetro para a classificação de misturas à deformação permanente (Figura 5.33). Os resultados obtidos com este parâmetro evidenciam a diferença de comportamento entre as série compactadas com cilindro e por vibro-compressão, as séries

VA e VB são mais resistentes, mas não foi possível diferenciar o comportamento entre as diferentes percentagens em betume. Para as restantes séries a velocidade de deformação aumentou com a percentagem em betume. Este parâmetro oferece para as séries LC, PC e para a série de obra classificações coerentes e nítidas.

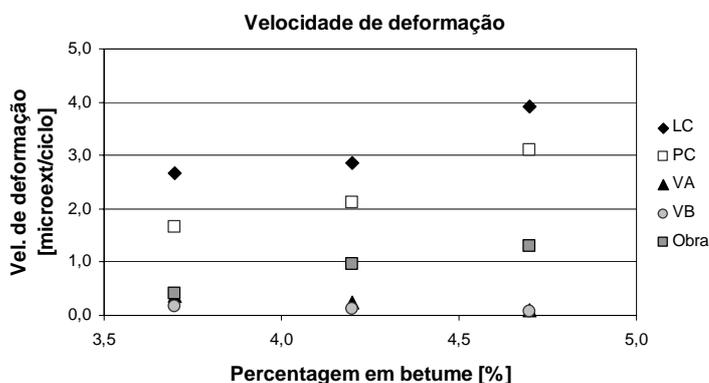


Figura 5.33 - Velocidades de deformação obtidas no ensaio de corte a altura constante

As tendências observadas em todos os parâmetros são consistentes. Percentagens em betume mais elevadas conduziram a menores resistências à deformação permanente. Verifica-se que os comportamentos obtidos nas séries de laboratório compactadas com cilindro e na série de obra são semelhantes.

A diferença substancial entre o comportamento dos provetes compactados com cilindro de rolo e os provetes compactados por vibro-compressão é significativa. Os primeiros apresentam a seriação esperada, registando menores resistências que a série de obra mas seguindo a mesma tendência. Os provetes compactados em laboratório com cilindro apresentam um comportamento mais homogêneo e coerente que os provetes compactados por vibro-compressão. Estes últimos apresentam melhores resultados, com uma resistência muito superior. No entanto, apresentam comportamentos mais incoerentes não se conseguindo diferenciar o comportamento entre as diferentes percentagens em betume. Em parte estas duas constatações estão ligadas, pois, a maior rigidez dos provetes torna mais difícil diferenciar o seu comportamento.

É possível, com base nestes resultados, verificar como o processo de compactação dos provetes tem uma influência decisiva no comportamento da mistura e, portanto, nos resultados. A compactação por cilindro é o processo de fabrico recomendado pela AASHTO TP7, apesar de não ser o mais simples, garante um comportamento mais próximo do obtido em obra.

Observando os diferentes gráficos constata-se que os provetes de obra obtêm a mesma seriação em todos os parâmetros. Nas séries de laboratório, compactadas com cilindro, as classificações revelam-se menos nítidas nos diferentes parâmetros, a série PC (provetes compactados com cilindro nas dimensões finais) apresenta uma classificação globalmente mais coerente. A compactação de provetes com cilindro já nas dimensões finais (evitando a carotagem dos provetes) é menos trabalhosa e apresenta-se capaz de fornecer bons resultados.

Os resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante permitem concluir que este ensaio tem a capacidade de caracterizar misturas betuminosas à deformação permanente, mostrando uma boa sensibilidade. Da análise dos resultados verifica-se que a extensão permanente de corte e a velocidade de deformação oferecem melhores resultados.

A utilização de parâmetros como a extensão de corte permanente medida no ensaio apresenta-se vantajosa, pois apresentam uma eficiente caracterização à deformação permanente e são parâmetros simples e intuitivos.

A altura dos provetes, que nalguns casos era inferior ao desejável, para uma máxima dimensão de agregado de 25 mm não parece ter influenciado os resultados obtidos de forma significativa.

5.5 Comparação de Resultados

De forma a melhor se compreender os resultados dos ensaios, estes foram comparados podendo observar-se como se relacionam. Como forma de comparar os resultados optou-se por utilizar como referência os resultados do ensaio de wheel tracking. Esta opção tem como justificação o facto dos resultados obtidos com este parâmetro serem satisfatórios, para os provetes de obra e de laboratório. Acresce que os resultados obtidos em ensaios de wheel tracking frequentemente têm sido utilizados na prática de alguns países europeus, e este ensaio é aquele que também simula melhor o comportamento real, sobretudo no que diz respeito à forma como o estado de tensão é induzido.

Diversos parâmetros podem ser determinados para os ensaios realizados e que permitem avaliar a resistência à deformação permanente, no entanto, apenas serão comparadas a extensão total no ensaio e a velocidade de deformação. Estes são os parâmetros que de forma mais consistente forneceram boas caracterizações em todos os ensaios. Embora todos os parâmetros possam ser utilizados para a caracterização à deformação permanente eles têm significados físicos diferentes pelo que as relações existentes entre eles devem ser objecto de uma análise mais cuidada. Assim, comparam-se apenas aqueles que mais directamente podem ser relacionados.

O ensaio de wheel tracking permite determinar dois parâmetros que apresentam boas possibilidades para a caracterização à deformação permanente de misturas betuminosas, que são a deformação total R_{Dm} e a velocidade de deformação TR_m . Os resultados obtidos com estes parâmetros serão utilizados como referência para observar as correlações existentes entre os ensaios utilizados.

Desta forma é possível complementar as observações realizadas aos resultados dos ensaios isoladamente e analisar como estes se relacionam. Os valores dos coeficientes de correlação apresentados foram obtidos para regressões lineares entre os resultados.

5.5.1 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico

Em correspondência com os parâmetros referidos para o ensaio de wheel tracking, para o ensaio de compressão uniaxial cíclico determinaram-se os seguintes parâmetros, extensão axial permanente total ϵ_{3600} e velocidade de deformação f . As relações entre estes parâmetros encontram-se na Figura 5.34 e na Figura 5.35.

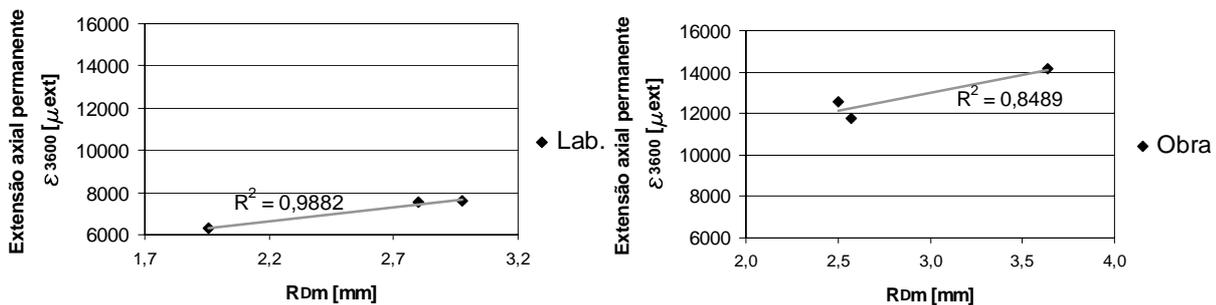


Figura 5.34 - Relação entre a deformação total do ensaio de wheel tracking R_{Dm} e a extensão axial permanente acumulada do ensaio de compressão uniaxial cíclico ϵ_{3600}

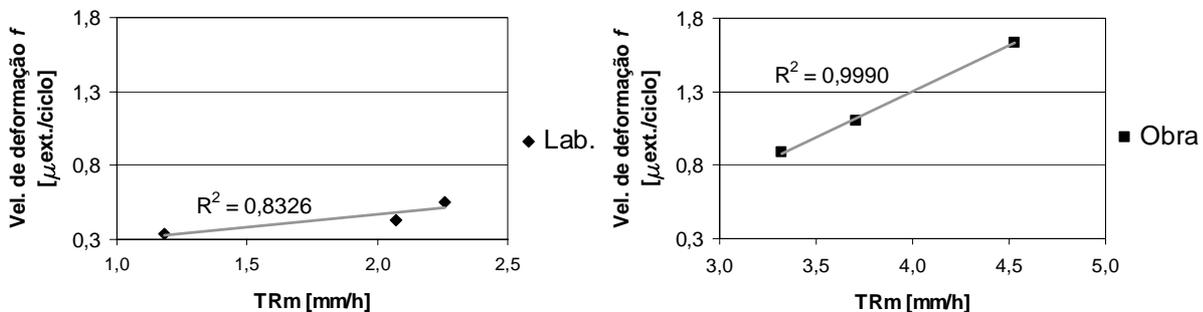


Figura 5.35 - Relação entre a velocidade de deformação do ensaio de wheel tracking TR_m , e a velocidade de deformação do ensaio de compressão uniaxial cíclico f

A extensão permanente total no ensaio e a velocidade de deformação apresentam boas correlações prefigurando-se bons indicadores para avaliar a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas. Estes bons valores de correlação verificam-se para os provetes de laboratório e de obra.

No início do ensaio de compressão uniaxial cíclico e de wheel tracking existe alguma densificação da mistura, pelo que, a velocidade de deformação poderá ser um parâmetro mais fiável uma vez que é mais insensível a este fenómeno. Os bons resultados obtidos com a extensão axial permanente não são alheios a uma boa homogeneidade conseguida no fabrico dos provetes.

Os resultados obtidos com o ensaio de compressão uniaxial cíclico confirmam os obtidos no ensaio de wheel tracking, observando-se excelentes correlações entre eles.

5.5.2 Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico

Apresentam-se em seguida as relações entre a extensão axial permanente total e a velocidade de deformação obtidas no ensaio triaxial cíclico, para os diferentes níveis de tensão, com os parâmetros análogos obtidos no ensaio de wheel tracking. Na Figura 5.36 e na Figura 5.37 apresentam-se graficamente estas relações.

Pela análise dos gráficos pode observar-se que a extensão axial permanente total e a velocidade de deformação obtidas no ensaio de compressão triaxial cíclico apresentam boas correlações com os parâmetros análogos do ensaio de wheel tracking. Isto verifica-se para os provetes de obra e de laboratório.

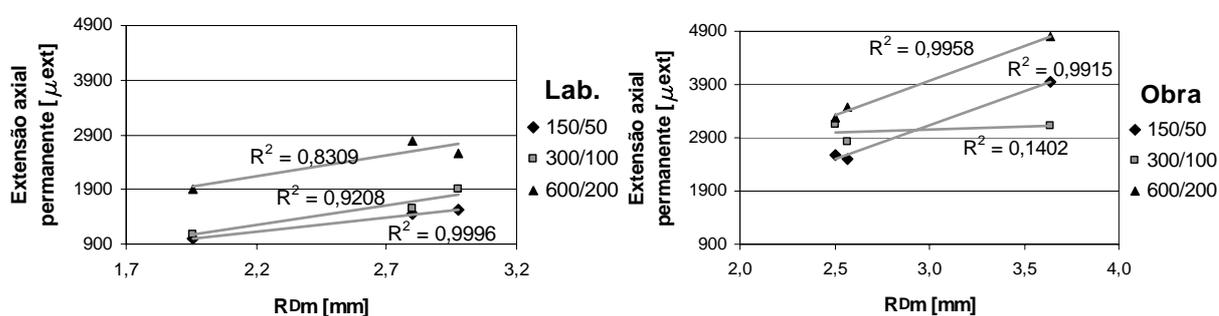


Figura 5.36 - Relação entre a deformação total do ensaio de wheel tracking, R_{DM} e extensão axial permanente acumulada do ensaio de compressão triaxial cíclico, ϵ_{3600}

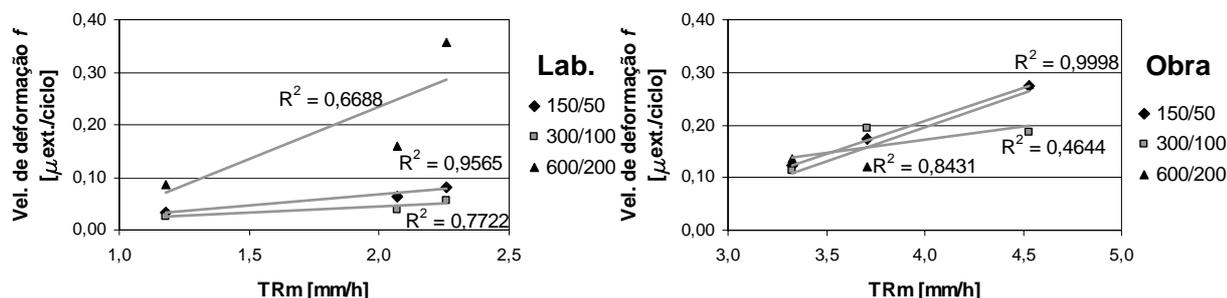


Figura 5.37 - Relação entre a velocidade de deformação do ensaio de wheel tracking, TRm e a velocidade de deformação do ensaio de compressão triaxial cíclico, f

O nível de tensão 150/50 oferece sempre as correlações mais elevadas e o nível 300/100 as correlações mais baixas. Apesar de se diferenciar de forma mais nítida as diferentes percentagens em betume utilizando níveis de tensão mais elevados, uma maior dispersão dos resultados conduz a valores do coeficiente de correlação mais baixos. Estes resultados permitem inferir que para condições correntes não existe vantagem em utilizar níveis de tensão muito elevados pois podem não conduzir a melhores resultados sendo, no entanto, mais exigentes para os equipamentos.

Este ensaio apresenta grande potencial na classificação de misturas betuminosas à deformação permanente obtendo resultados similares aos obtidos nos ensaios anteriores. O equipamento e os procedimentos de ensaio são no entanto mais complexos que os utilizados no ensaio de compressão uniaxial cíclico e no de wheel tracking.

5.5.3 Ensaio de Corte a Altura Constante

Apresentam-se na Figura 5.38 e na Figura 5.39 as correlações entre os resultados do ensaio de corte a altura constante e os obtidos no wheel tracking.

As séries obtidas por vibro-compressão não foram caracterizadas de forma evidente, este facto pode dever-se a terem apresentado uma rigidez elevada, logo apresentando deformações muito baixas. Assim, não foi possível diferenciar o comportamento e classificar as misturas das séries VA e VB neste ensaio, pelo que, apesar de se apresentarem os seus resultados nos gráficos não são apresentados os valores das correlações obtidos para estas séries.

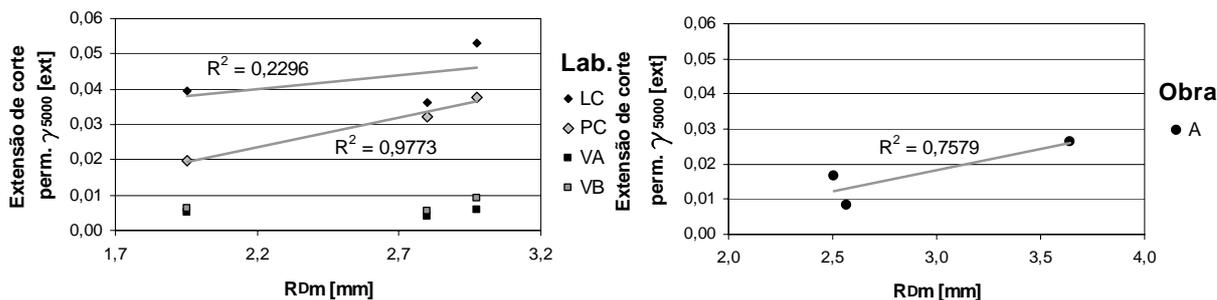


Figura 5.38 - Relação entre a deformação total do ensaio de wheel tracking, R_{Dm} e a extensão de corte permanente acumulada do ensaio de corte a altura constante, γ_{5000}

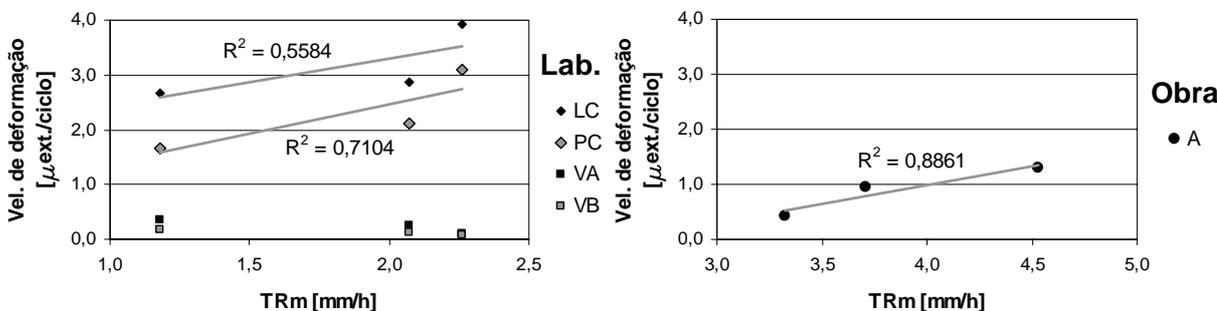


Figura 5.39 - Relação entre a velocidade de deformação do ensaio de wheel tracking, TRm e a velocidade de deformação do ensaio de corte a altura constante

Os provetes de obra, série A, apresentaram para ambos os parâmetros bons resultados. Em laboratório, a série PC oferece as melhores correlações.

Os resultados obtidos mostram que este ensaio permite caracterizar as misturas confirmando as tendências obtidas nos ensaios anteriores. Contudo este ensaio é aquele cujas correlações com os resultados do wheel tracking apresentam valores inferiores.

A velocidade de deformação confirma as observações já realizadas, isto é, apesar de não ser um parâmetro utilizado correntemente apresenta valores de correlação interessantes e representativos do potencial para a caracterização à deformação permanente.

5.6 Considerações Finais

Os valores obtidos para os provetes de laboratório foram consistentemente melhores que os obtidos com os provetes de obra. Este facto contraria o que seria expectável pois em laboratório e em obra foi realizada a mesma mistura de agregados com as mesmas

percentagens em betume, no entanto, em obra foi utilizado um betume da classe 35/50 e em laboratório um betume 50/70. Seria de esperar melhores resultados nos provetes de obra, o que não sucedeu. Este facto torna-se mais evidente no ensaio de wheel tracking em que se utilizou um pequeno cilindro para realizar a compactação, simulando da melhor forma a compactação de obra (Figura 5.4). A explicação pode derivar de um melhor controlo de execução em laboratório, essencialmente devido às diferentes escalas presentes. Assim, a execução de provetes em laboratório é mais cuidada o que pode permitir obter melhores valores.

A existência de provetes com valor de volume de vazios inferior ao habitualmente considerado como valor crítico, 3%, não pareceu afectar os resultados. A não obtenção de resistências muito inferiores nestes provetes pode ser devida a não se ter, para as misturas utilizadas, atingido aquele que seria o volume de vazios crítico, em que o betume começaria a ter uma influência nefasta na mistura.

Outra questão prende-se com o método de compactação, os provetes obtidos por vibro-compressão obtiveram sempre melhores resultados que os de obra em todos os ensaios. No ensaio de corte a altura constante verificou-se ainda que os provetes obtidos por vibro-compressão no laboratório obtiveram melhores resultados que os obra e estes últimos obtiveram melhores resultados que os obtidos por compactação com cilindro em laboratório. O processo de compactação influencia decisivamente os resultados, pelo que é conveniente as normas definirem com exactidão qual o processo de fabrico dos provetes.

Devido ao anteriormente exposto, os resultados obtidos em obra e em laboratório podem diferir mesmo utilizando misturas iguais. Este facto coloca obstáculos na definição de valores limite em normas para aceitação de misturas. Uma mistura pode cumprir o valor limite com ensaios realizados em laboratório não os cumprindo com provetes de obra e vice versa. Esta situação exige cuidados particulares na definição de valores limite para aceitação de misturas. Este facto realça a importância da definição exacta das condições de realização dos provetes.

A opção de reproduzir o melhor possível as condições de fabrico em obra não garante por si só resultados semelhantes. As condições de execução em obra podem também ser determinantes, isto é, uma boa formulação em laboratório não é condição suficiente (embora indispensável) para a obtenção de bons resultados em obra. É necessário que exista um bom controlo na execução, garantindo que se está a realizar a mistura nas condições pretendidas.

Este melhor controlo poderá ser alcançado sobretudo com a introdução de ensaios de controlo de qualidade mais adequados. Os ensaios de caracterização das misturas betuminosas à deformação permanente devem incluir-se neste grupo.

Conforme esperado todos os ensaios permitiram caracterizar da mesma forma as diferentes misturas, isto é, 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. Os ensaios permitiram caracterizar os provetes de obra e de laboratório de forma correcta, distinguindo globalmente de forma nítida o comportamento das misturas com diferentes percentagens em betume.

O facto de a percentagem em betume das misturas apenas variar de 0,5%, aliado às características da mistura e temperatura de ensaio, revela que os ensaios, nas condições em que foram realizados, apresentam uma boa sensibilidade e um elevado potencial na caracterização à deformação permanente. Foi possível, em todos os ensaios, diferenciar de forma clara o comportamento das diferentes misturas. Verificou-se a existência de boas correlações entre os resultados dos diferentes ensaios.

A escolha do parâmetro para caracterização à deformação permanente é de grande importância, pois existem ensaios que permitem determinar vários parâmetros oferecendo resultados diversos. Para todos os ensaios a velocidade de deformação e a extensão total são os parâmetros que apresentaram melhores resultados. Estes parâmetros têm vantagens numa utilização prática pois são simples de determinar e facilmente compreensíveis. A utilização de parâmetros mais complexos, como por exemplo os módulos não se mostra muito interessante. A velocidade de deformação apresenta-se como o melhor parâmetro para a classificação de misturas no ensaio de wheel tracking e nos ensaios de compressão uniaxial cíclico e triaxial cíclico. Este parâmetro obteve bons resultados no ensaio de corte a altura constante, embora não seja habitualmente determinado. Para este ensaio, dos parâmetros correntemente utilizados, a extensão de corte permanente total no ensaio foi o que obteve melhores resultados.

A comparação de resultados entre os diversos ensaios mostra existirem boas correlações, nomeadamente, para os parâmetros extensão permanente total e velocidade de deformação. Estas boas correlações indicam que utilização de ensaios mais simples apresenta-se vantajosa, pois são menos onerosos e mais fáceis de realizar fornecendo resultados semelhantes aos mais complexos. A velocidade de deformação apresenta-se como o parâmetro mais interessante para ser utilizado na caracterização à deformação permanente. A utilização de ensaios simples, e dentro destes, de parâmetros simples apresenta-se como uma solução eficiente permitindo reduzir custos e obter resultados fiáveis.

O ensaio de wheel tracking apresenta-se como uma boa escolha e é aquele que tem sido mais utilizado na Europa. Para além de ser extremamente intuitivo, o equipamento é simples e

acessível. Apresenta ainda uma boa versatilidade para ensaiar diferentes tipos de misturas. A velocidade de deformação obtida configura um excelente parâmetro para a caracterização à deformação permanente. Como principais desvantagens apresenta a obtenção de provetes mais complexa, em laboratório e em obra.

O ensaio de compressão uniaxial cíclico apresenta resultados satisfatórios, neste caso também a velocidade de deformação e a extensão total se mostram como os parâmetros mais interessantes. Este ensaio tem a vantagem da obtenção mais simples dos provetes, embora se deva analisar a forma como estes são fabricados em laboratório. A vantagem deste ensaio está em se poder utilizar o mesmo equipamento que é utilizado na caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas. No entanto este é um equipamento mais complexo e dispendioso que o de wheel tracking.

O ensaio de compressão triaxial cíclico, embora permita simular melhor um estado de tensão complexo, exige um equipamento dispendioso e apresenta igualmente procedimentos de ensaio mais morosos. Este ensaio tem a vantagem de ser simples o fabrico ou recolha de provetes. Os resultados obtidos, são similares aos obtidos no ensaio de wheel-tracking e de compressão uniaxial cíclico. Assim, para utilização diária no controle de qualidade este ensaio não se apresenta como a melhor solução.

O ensaio de corte a altura constante também forneceu resultados satisfatórios, essencialmente nas séries obtidas por compactação com cilindro. No entanto, utiliza um equipamento dispendioso e não é comum a sua utilização fora dos EUA. Assim, não parece existir um motivo forte para a sua introdução generalizada na prática portuguesa.

Em resumo, para uma utilização corrente, o ensaio de wheel tracking e o ensaio de compressão uniaxial cíclico são os mais interessantes, embora este último dependa da existência do equipamento necessário porque a sua aquisição só para este fim é muito onerosa. O ensaio de compressão triaxial cíclico tem a vantagem de poder fazer uma simulação mais comparável ao estado de tensão real, mas os resultados obtidos não justificam o investimento generalizado no equipamento ao que acresce a morosidade de realização do ensaio. O ensaio de corte a altura constante embora apresente resultados satisfatórios, não justifica a sua introdução, também pelo custo de aquisição do equipamento e principalmente por não ser um ensaio de uso generalizado na Europa.

Nos ensaios realizados obtiveram-se boas caracterizações das misturas com um número de repetições, ou seja do número de provetes semelhantes ensaiados com as mesmas condições, de dois ou três provetes. As pré-normas indicam, para os ensaios de wheel tracking e de compressão uniaxial ou triaxial cíclicos, a realização de séries com um número de provetes

superior, o que torna a análise e o controlo de qualidade em obra muito trabalhosos. Estes resultados mostram que o número de provetes a ensaiar pode ser reduzido sem se colocar em causa a validade de resultados.

5.7 Referências Bibliográficas

AASHTO (2001). “Standard Test Method for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Test (SST)”. *AASHTO TP7-01*, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.

CEN (2002). “Test methods for hot mix asphalt – Wheel Tracking”. *PrEN 12697-22*, European Committee for Standardization, Bussels.

CEN (2001). “Bituminous mixtures – Test methods for mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test”. *PrEN 12697-25*, European Committee for Standardization, Bussels.

COST 333 (1999). “COST 333 Development of New Bituminous Pavement Design Method, Final Report of the Action”. European Commission, Directorate General Transport, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

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.

JAE, (1998). “Caderno de Encargos da Junta Autónoma de Estradas”. Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.

SHRP (1994). “Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool”. *SHRP-A-698*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C..

6 CONCLUSÕES

A deformação permanente em misturas betuminosas é uma patologia que pode levar à ruína do pavimento, manifesta-se através da formação de rodeiras de pequeno raio que diminuem drasticamente a segurança e comodidade dos utentes. Esta patologia tende a manifestar-se no início da vida útil dos pavimentos podendo levar a uma saída bastante prematura de serviço destes. Este facto agrava a percepção negativa dos utentes relativamente a estes insucessos.

A deformação permanente das misturas betuminosas resulta essencialmente de uma insuficiente resistência destas, por exemplo, devido a uma incorrecta formulação. No entanto, na prática a formulação ainda é realizada unicamente com base em “receitas” dos cadernos de encargos e o método de formulação corrente, método de Marshall, apenas contém um ensaio empírico, ensaio de Marshall. Este ensaio não permite avaliar o desempenho de misturas betuminosas, nomeadamente, o desempenho à deformação permanente.

É assim fundamental a introdução de um ensaio que permita caracterizar as misturas betuminosas à deformação permanente.

A caracterização à deformação permanente não garante por si só uma mistura betuminosa bem formulada. Para a correcta formulação de misturas betuminosas outras características da mistura devem ser avaliadas, a resistência à fadiga, resistência à desagregação e acção da água, etc. Assim, os ensaios de caracterização à deformação permanente devem estar englobados num programa mais amplo que permita uma formulação mais eficiente de misturas betuminosas.

Esta linha de pensamento é reforçada pelos resultados obtidos neste trabalho. Os ensaios na generalidade indicam que a mistura com 3,7% de percentagem em betume é a mais resistente à deformação permanente. No entanto, esta mistura apresentou uma resistência conservada inferior ao limite especificado no caderno de encargos. Assim, a durabilidade da mistura poderia estar comprometida se esta fosse utilizada. A escolha de uma mistura com menor resistência à deformação permanente, mas que garantisse uma maior durabilidade seria a opção correcta. A avaliação das diversas características das misturas através de ensaios de desempenho assume-se fundamental, esperando-se que a evolução dos métodos de formulação de misturas betuminosas inclua forçosamente este tipo de ensaios.

A mistura ideal não existe, devendo-se das propriedades caracterizadas procurar qual a mistura que apresenta melhor compromisso nas propriedades desejadas. Este compromisso poderá incluir não só as propriedades intrínsecas da mistura mas factores como custos, protecção ambiental, etc.

A caracterização das misturas à deformação permanente merece uma análise aprofundada pois o aumento do tráfego de pesados, o aumento das cargas por eixo e a utilização de rodados simples com pneus de pressão de enchimento elevada são factores que contribuem para a deformação permanente em misturas betuminosas. Estes factores têm-se agravado ano após ano prevendo-se que esta evolução continue.

O progresso tecnológico disponibiliza também um número cada vez maior de soluções para a realização de misturas betuminosas. A realização de camadas betuminosas não tradicionais, a utilização crescente de betumes modificados com polímeros ou com borracha e a reciclagem de misturas betuminosas têm um uso crescente em Portugal. Assim, a caracterização do comportamento destas misturas torna-se crucial, nomeadamente, a caracterização à deformação permanente.

Neste trabalho foram realizados ensaios com os quatro procedimentos laboratoriais mais utilizados na caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente. Foram realizados provetes com uma mistura tradicional corrente em Portugal e de utilização generalizada. Foram realizadas três misturas utilizando a mesma granulometria mas variando a percentagem em betume de 0,5%, de forma a obter comportamentos à deformação permanente diferenciados. A temperatura utilizada para a realização dos ensaios foi de 45°C, esta temperatura considera-se representativa para as condições portuguesas e adequada ao tipo de mistura. Além disso, a utilização da temperatura de 45°C permitiu realizar os ensaios abaixo da temperatura de amolecimento anel-bola, de forma a avaliar melhor a contribuição do betume.

As condições escolhidas, que se consideram representativas, conduziram a um comportamento das misturas bastante rígido e as diferentes misturas apresentaram comportamentos semelhantes. Deste modo foi possível avaliar a sensibilidade dos ensaios na diferenciação e classificação destas.

Os processos de fabrico de provetes de laboratório foram os que correntemente são utilizados ou que podem vir a ser adoptados para uso corrente em laboratório. Nos troços experimentais foram utilizadas condições de execução semelhantes às utilizadas correntemente em obra.

Verifica-se ser possível obter provetes de laboratório com características e comportamento semelhantes aos de obra. No entanto, o processo de fabrico dos provetes pode ser determinante na sua resistência à deformação permanente.

O facto de se obterem sistematicamente melhores resultados com os provetes de laboratório, quando estes foram fabricados com um betume de menor viscosidade reveste-se de alguma surpresa. Para alguns ensaios este facto pode ter sido influenciado pelo processo de compactação, como no caso do ensaio de compressão uniaxial cíclico, ensaio de compressão triaxial cíclico e do ensaio de corte a altura constante. No ensaio de wheel tracking apenas se pode explicar por em laboratório existir um melhor controlo de qualidade nomeadamente na mistura de agregados e quantidade de betume. Assim, esta maior homogeneidade dos provetes pode ter conduzido à obtenção de melhores resultados.

O processo de fabrico dos provetes e a sua compactação revelam uma importância crucial, influenciando severamente o comportamento da mistura. As normas devem assim referir explicitamente o modo de obtenção dos provetes.

Os resultados mostram que os ensaios utilizados neste trabalho, wheel tracking, compressão uniaxial cíclico, compressão triaxial cíclico e corte a altura constante mostram capacidade para caracterizar o comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente. Os ensaios mostram ter uma excelente sensibilidade e versatilidade permitindo obter classificações satisfatórias para os provetes de obra e de laboratório.

Os resultados dos diferentes ensaios fornecem excelentes correlações quando se comparam parâmetros como a extensão permanente ou a velocidade de deformação. A utilização na prática de ensaios mais simples, como o wheel tracking e o ensaio de compressão uniaxial cíclico, parece ser mais apropriada. Assim, estes ensaios obtiveram resultados qualitativamente semelhantes aos mais complexos, mas apresentam procedimentos de ensaio e equipamentos mais simples.

Numa apreciação para utilização em análise e controlo de qualidade na prática, o ensaio de wheel tracking apresenta-se como o mais indicado, seguido pelo ensaio de compressão uniaxial cíclico. Este último ensaio pode ter um argumento interessante se puder ser realizado com o equipamento utilizado nos ensaios de fadiga, o que é possível e desejável.

O ensaio de compressão triaxial cíclico apresenta procedimentos de ensaio mais complexos e um equipamento mais complexo e dispendioso, não parece ser indicado para uma utilização quotidiana. O ensaio de corte a altura constante, apesar de apresentar potencial na caracterização à deformação permanente, não está prevista a sua introdução na generalidade

dos países europeus, o que representa uma enorme desvantagem para introdução na prática portuguesa.

Cada ensaio permite determinar dois ou mais parâmetros que permitem a caracterização à deformação permanente. Verifica-se que os parâmetros mais simples como a extensão ou deformação total e a velocidade de deformação apresentam uma melhor caracterização de misturas à deformação permanente, com classificações mais claras e nítidas que as obtidas com parâmetros mais complexos. Assim, recomenda-se a utilização destes parâmetros. A velocidade de deformação apresenta-se como o parâmetro mais interessante para a caracterização à deformação permanente, tanto associado ao ensaio de wheel tracking como aos de compressão uniaxial e triaxial cíclicos.

6.1 Perspectivas Futuras

A definição exacta das condições de ensaio para as condições portuguesas (como sejam a temperatura de ensaio e condições de carregamento) e a definição de valores limite que as misturas devem respeitar (considerando as condições da sua utilização, como sejam a temperatura e o tráfego) são crucial para a introdução destes ensaios na prática corrente.

Estes ensaios não se devem destinar só a poder comparar misturas betuminosas permitindo escolher aquela que mostre o melhor comportamento à deformação permanente. A introdução na prática deste tipo de ensaios deve ser acompanhada, como se disse, pela definição de valores limite que as misturas devem respeitar, os quais devem ter em consideração as solicitações a que estas estarão sujeitas durante a sua vida útil. Desta forma é possível analisar das várias formulações possíveis quais poderão ser aplicadas e entre estas escolher uma, que mesmo não tendo o melhor comportamento à deformação permanente, cumpra os valores limite e ser mais interessante sob outros pontos de vista.

A definição destes limites incorpora algumas questões relevantes. Não é lógico que se imponha a mesma resistência à deformação permanente a uma mistura que irá ser utilizada numa estrada com um volume de tráfego baixo ou a uma estrada com um volume de tráfego elevado. O mesmo pode aplicar-se a misturas que serão colocadas em estradas situadas em regiões frias ou em regiões mais quentes. Assim, de facto, a definição dos limites a obedecer pelas misturas deve ser condicionado pelas solicitações a que esta estará sujeita.

Pode também inferir-se que este facto poderá influenciar as condições de ensaio, isto é, o ensaio de misturas com exigências de serviço baixas utilizando condições de ensaio demasiado severas (por exemplo utilizando temperaturas elevadas), pode resultar na rotura prematura destas, podendo ser difícil estabelecer valores limite e realizar uma conveniente

seriação de misturas. Para misturas que necessitem de ser muito resistentes e trabalhar em condições difíceis, se o ensaio for pouco exigente pode tornar-se difícil a comparação e seriação de misturas relativamente ao seu comportamento à deformação permanente.

A introdução de novas misturas betuminosas no mercado utilizando novas tecnologias, tanto em termos de ligante (betume borracha, betume espumado, novos aditivos, etc.) bem como a crescente utilização misturas não tradicionais (misturas betuminosas recicladas, misturas de alto módulo, misturas betuminosas fabricadas a frio, etc.) condiciona e põe a nu muitas fragilidades dos métodos de formulação correntemente utilizados na prática. Assim, para analisar as características destas misturas e verificar as possibilidades da sua aplicação novos métodos de formulação são necessários. Prevê-se que estes métodos incluam ensaios de desempenho, nomeadamente, um ensaio de desempenho à deformação permanente. É necessário para estas novas misturas verificar se os ensaios existentes são adequados à sua análise.

Este trabalho carece de continuação no sentido de definir as melhores condições de ensaio, independentemente do ensaio específico a ser adoptado na prática. Adequar estas condições à realidade portuguesa em termos de temperatura e tráfego. Relacionar valores obtidos em laboratório com o comportamento das misturas no pavimento. Esta correlação permitirá definir valores limites de ensaio para aceitação de misturas. Verificar a sua adequação aos novos materiais de pavimentação. Analisar a implementação destes ensaios na prática e a sua incorporação numa metodologia mais avançada de formulação, análise de qualidade e controlo de qualidade de misturas betuminosas.