

Filipe Miguel Figueiredo Murtinheira

Reabilitação estrutural de pavimentos rodoviários.  
Correcção do módulo de deformabilidade das  
camadas betuminosas

**Tese de Mestrado**

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor António Miguel Costa Baptista





## RESUMO

O objectivo desta dissertação é o estudo do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas em pavimentos flexíveis, mais concretamente, no que respeita à influência da temperatura nesta mesma propriedade. Procura-se estudar os diversos métodos de correcção do módulo de deformabilidade existentes para diferentes temperaturas.

Para isso, desenvolvem-se e calibram-se novos métodos com o objectivo de permitir uma correcção expedita e simples do módulo de deformabilidade em função da temperatura, tendo-se desenvolvido novas abordagens ao nível da estrutura do método e ao nível dos pressupostos em que o método se baseia. Todos os métodos desenvolvidos foram implementados num *software* intuitivo.

Inclui-se ainda neste trabalho uma análise crítica às diversas vantagens e desvantagens de cada método de correcção apresentado, tendo em conta não só a precisão, mas também a consistência e simplicidade.

Estuda-se ainda a influência da correcção do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil de diversos pavimentos em diferentes condições. Isto permite investigar a relevância dos erros inerentes à correcção do módulo para a obtenção de tempos de vida útil mais fiáveis.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO  
DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

## **ABSTRACT**

The objective of this dissertation is the study of the modulus of bituminous layers in flexible pavements, and mainly the influence of temperature in this property. Several existing methods of temperature adjustment of the modulus are studied.

To that end, new methods are developed and calibrated with the purpose of providing an easy and quick adjustment of the modulus based on the temperature. Several new approaches were studied regarding the structure of the adjustment methods and the conjectures they are based upon. All developed methods were implemented in an intuitive software.

Also included in the present work is a critical analysis of the various advantages and disadvantages of each adjustment method presented, taking into consideration not only their precision, but also their consistency and simplicity.

Additionally, the influence of the temperature adjustment of the modulus on the useful lifetime of pavements under different conditions is studied. This allows the investigation of the relevance of errors inherent to the adjustment of the modulus in the calculation of more reliable useful lifetimes.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO  
DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

## **PALAVRAS CHAVE**

Módulo de deformabilidade

Temperatura

Pavimentos flexíveis

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO  
DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

## **KEY WORDS**

Modulus  
Temperature  
Flexible pavements

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO  
DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

## **AGRADECIMENTOS**

A execução deste trabalho foi possível graças ao apoio e colaboração de várias pessoas. Gostaria de expressar os meus agradecimentos e reconhecimento pelo auxílio que me ofereceram, particularmente:

Ao Professor Doutor António Miguel Baptista, orientador da presente tese, pelos seus conselhos, apoio e disponibilidade ao longo da execução deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas pela amizade e encorajamento que nunca deixaram de demonstrar.

E finalmente, à minha família pelo seu constante apoio e compreensão ao longo de toda a minha vida.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO  
DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

# ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	iii
PALAVRAS CHAVE .....	v
KEY WORDS .....	vii
AGRADECIMENTOS .....	ix
ÍNDICE GERAL .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
ÍNDICE DE QUADROS .....	xv
NOTAÇÃO.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1 Justificação da escolha do tema .....	1
1.2 Objectivos .....	2
1.3 Organização da dissertação.....	3
2. Características fundamentais das misturas betuminosas .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Composição das misturas betuminosas.....	5
2.3 Propriedades do ligante.....	8
2.4 Características de deformabilidade .....	10
2.4.1 Propriedades que influenciam a deformabilidade de misturas betuminosas .....	13
2.4.2 Avaliação experimental das características de deformabilidade .....	16
2.4.3 Leis de previsão do módulo de deformabilidade.....	18
2.5 Resistência à fadiga .....	29
2.5.1 Avaliação experimental da resistência à fadiga.....	30
2.5.2 Leis de previsão da resistência à fadiga.....	31
2.6 Resistência à deformação permanente .....	32
2.6.1 Avaliação experimental da resistência à deformação permanente .....	32
2.6.2 Leis de previsão da resistência à deformação permanente .....	34
3. Conservação e reabilitação de pavimentos .....	35
3.1 Introdução .....	35

# REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

3.2	Procedimento baseado nas deflexões reversíveis .....	36
3.2.1	Campanha de ensaios .....	37
3.2.2	Cálculo inverso do módulo de deformabilidade .....	42
3.2.3	Correcção do módulo de deformabilidade .....	44
3.2.4	Análise estrutural .....	47
3.2.5	Verificação da vida útil do pavimento .....	49
3.2.6	Dimensionamento da camada de reforço .....	49
3.3	Procedimento baseado nas espessuras efectivas .....	50
3.4	Avaliação do efeito da correcção do módulo .....	53
4.	Métodos de correcção do módulo de deformabilidade .....	59
4.1	Introdução.....	59
4.2	Descrição dos métodos de correcção existentes.....	59
4.2.1	Métodos directos .....	60
4.2.2	Métodos indirectos .....	62
4.3	Desenvolvimento e calibração de métodos de correcção .....	63
4.3.1	Método geral .....	65
4.3.2	Método simplificado .....	84
4.3.3	Método com optimização.....	87
4.3.4	Método com Redes Neurais Artificiais .....	88
4.4	Desenvolvimento da aplicação CMod.....	91
5.	Estudo comparativo dos métodos de correcção do módulo.....	93
5.1	Introdução.....	93
5.2	Exemplos de aplicação .....	93
5.3	Comparação da precisão dos resultados dos diversos métodos .....	98
6.	Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros.....	101
6.1	Síntese do trabalho e conclusões gerais .....	101
6.2	Desenvolvimentos futuros .....	102
	APÊNDICE A.....	105
	APÊNDICE B .....	109
	ANEXO A.....	115
	REFERÊNCIAS.....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Composição de uma mistura betuminosa (Baptista, 2006) .....	6
Figura 2-2: Representação esquemática do ensaio de penetração (Branco et al., 2008).....	9
Figura 2-3: Representação esquemática do ensaio de determinação da temperatura de anel e bola (Branco et al., 2008) .....	9
Figura 2-4: Representação vectorial das componentes do módulo complexo (adaptado de Vale, 2004) .....	12
Figura 2-5: Ensaio laboratoriais para a determinação do módulo de deformabilidade (adaptado de Capitão, 2003).....	16
Figura 2-6: Ábaco de Van der Poel (adaptado de SHELL, 1977).....	19
Figura 2-7: Relação entre $E_m$ e $Sb$ para as classes S1 e S2 do manual de dimensionamento da SHELL (adaptado de SHELL, 1977) .....	23
Figura 2-8: Ábaco de cálculo da deformabilidade de misturas betuminosas da SHELL (adaptado de SHELL, 1977).....	24
Figura 2-9: Relação entre o módulo de deformabilidade da mistura e a rigidez do betume (adaptado de Brown e Brunton, 1986).....	26
Figura 2-10: Relação entre o módulo de distorção e o módulo reduzido (Francken, 1977) ....	28
Figura 2-11: Extensões relevantes à verificação dos critérios de ruína (Baptista, 1999).....	29
Figura 2-12: Ensaio laboratoriais para a determinação da resistência à deformação permanente (adaptado de Capitão, 2003) .....	33
Figura 3-1: Evolução do nível de serviço de pavimentos ao longo do tempo (Batista, 2004) .	35
Figura 3-2: Metodologia de análise do estado de conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis .....	36
Figura 3-3: Deflectómetro de impacto do LNEC (Antunes, 2008).....	37
Figura 3-4: Esquema de um ensaio de carga com deflectómetro de impacto e respectivo deflectograma (Antunes, 2008) .....	38
Figura 3-5: Deflectograma típico em pavimentos de elevada espessura betuminosa (Branco et al., 2008).....	39
Figura 3-6: Deflectograma típico em pavimentos de elevada espessura granular (Branco et al., 2008).....	39
Figura 3-7: Método das diferenças acumuladas (AASHTO, 2001) .....	41
Figura 3-8: Representação esquemática da estrutura de pavimento a utilizar para o cálculo inverso do módulo de deformabilidade .....	43
Figura 3-9: Funções seno com ciclo de 18 horas (adaptado de FHWA, 2008).....	45
Figura 3-10: Esquemática da acção de um eixo padrão sobre um pavimento (Branco et al., 2008).....	48
Figura 3-11: Extensões a calcular durante a análise estrutural do pavimento.....	50

# REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

Figura 3-12: Ábaco do Asphalt Institute para cálculo da espessura de um pavimento só com camadas de betão betuminoso (AI, 1983).....	52
Figura 3-13: Impacto da variação do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil em pavimentos sem reforço .....	55
Figura 3-14: Impacto da variação do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil em pavimentos com um reforço de 4 cm .....	56
Figura 3-15: Impacto da variação do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil em pavimentos com um reforço de 6 cm .....	56
Figura 3-16: Média dos percentis 85 dos pavimentos em análise.....	57
Figura 4-1: $E_T/E_{25}$ em função da temperatura e penetração .....	66
Figura 4-2: Constante $K$ em função da penetração .....	68
Figura 4-3: Comportamento do rácio $\frac{v_t}{T}$ em função da temperatura .....	69
Figura 4-4: Rácio mínimo e máximo em função da velocidade de tráfego .....	71
Figura 4-5: Temperatura de transição em função da penetração e da velocidade de tráfego ..	72
Figura 4-6: Constantes da regressão de $T_t$ em função da velocidade de tráfego .....	73
Figura 4-7: Comportamento do rácio $R_T^{va}$ em função da temperatura.....	75
Figura 4-8: Variação de $R_{máx}$ em função da percentagem volumétrica de agregados .....	76
Figura 4-9: Variação da inclinação $m$ média em função da percentagem volumétrica de agregados .....	77
Figura 4-10: Translação do gráfico do rácio $R_T^{va}$ em função da temperatura.....	78
Figura 4-11: Variação do factor de correcção $C_{TVB}^{pen25=40}$ com a temperatura para uma penetração de $40 \cdot 10^{-1}$ mm .....	79
Figura 4-12: Variação das constantes de regressão de $C_{TVB}$ com o TVB.....	80
Figura 4-13: Gráfico genérico de $C_{TVB}^{pen25}$ em função da temperatura .....	81
Figura 4-14: Variação de $m$ em função da penetração .....	82
Figura 4-15: Variação das constantes de regressão de $m$ em função do TVB .....	83
Figura 4-16: Estrutura genérica de uma rede neural artificial .....	88
Figura 4-17: Neurónio genérico de uma rede neural artificial.....	88
Figura 4-18: Rede neural artificial utilizada na calibração .....	89
Figura B-1: Escolha da linguagem.....	109
Figura B-2: Instalação do VCREDIST .....	110
Figura B-3: Instalação do MCR – 1.º passo.....	110
Figura B-4: Instalação do MCR – 2.º passo.....	111
Figura B-5: Instalação do MCR – 3.º passo.....	111
Figura B-6: Instalação do MCR – 4.º passo.....	112
Figura B-7: Instalação do MCR – 5.º passo.....	112
Figura B-8: Programa CMod .....	113

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Ensaio <i>in situ</i> para determinação do módulo de deformabilidade (adaptado de Branco et al., 2008).....	17
Quadro 3-1: Correção da temperatura IR de acordo com a nebulosidade (adaptado de Stubstad, 1998).....	45
Quadro 3-2: Parâmetros $L$ , $p$ e $r$ para definição de acções .....	48
Quadro 3-3: Factores de conversão $C$ (adaptado de AI, 1983) .....	51
Quadro 3-4: Características dos diversos pavimentos em análise.....	54
Quadro 3-5: Relação entre a variação dos módulos e variação da temperatura.....	54
Quadro 3-6: Intervalos de precisão de acordo com o erro do módulo .....	57
Quadro 3-7: Intervalos de precisão de acordo com o erro da temperatura.....	58
Quadro 4-1: Limitação do domínio do método em desenvolvimento .....	64
Quadro 4-2: Condições de ensaio (Baptista, 2006) .....	64
Quadro 4-3: Constantes das regressões de $f(T, pen25)$ .....	67
Quadro 4-4: $R_{mín}$ e $R_{máx}$ .....	70
Quadro 4-5: Temperaturas de transição.....	72
Quadro 4-6: Constantes das regressões de $T_t$ .....	73
Quadro 4-7: $R_{máx}$ .....	75
Quadro 4-8: Variação do declive $m$ com $va$ .....	76
Quadro 4-9: Constantes da regressão de $C_{TVB}^{pen25=40}$ .....	79
Quadro 4-10: Valores de $m$ .....	81
Quadro 4-11: Valores das constantes de regressão de $m$ .....	82
Quadro 4-12: Relevância dos factores $C_{vt}$ , $C_{va}$ e $C_{TVB}$ .....	84
Quadro 4-13: Amostras de treino, validação e teste da rede neural .....	90
Quadro 5-1: Casos analisados.....	94
Quadro 5-2: Exemplos dos métodos propostos por outros autores .....	95
Quadro 5-3: Exemplos dos métodos desenvolvidos (calibração numérica).....	96
Quadro 5-4: Exemplos dos métodos desenvolvidos (calibração experimental).....	97
Quadro 5-5: Avaliação dos erros relativos de cada método .....	98
Quadro 5-6: Limitação do domínio da amostra para cálculo do erro.....	99
Quadro A-1: Parâmetros e coeficiente de correção do modelo de previsão da temperatura de serviço (Baptista et al. 2002) .....	115
Quadro A-2: Temperaturas médias máximas mensais e temperaturas ponderadas (Baptista et al. 2002).....	116

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO  
DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

## NOTAÇÃO

### a) Maiúsculas latinas

$ATAF$	Factor de correcção do método BELLS3
$B'$	Susceptibilidade da penetração no tempo $t$
$Bm$	Baridade da mistura ou massa volúmica da mistura
$Bt$	Baridade máxima teórica
$CBR$	<i>Californian Bearing Ratio</i>
$CPOND_m$	Coefficiente de ponderação do mês $m$
$C_v$	Concentração volumétrica de agregados
$C_{va}$	Factor de correcção da percentagem volumétrica de agregados (método geral)
$C_{vt}$	Factor de correcção da velocidade de tráfego (método geral)
$C_{TVB}$	Factor de correcção da percentagem volumétrica de betume (método geral)
$D$	Dano
$\bar{D}$	Deflexão média
$D_m$	Deflexão medida
$D_n$	Deflexão normalizada
$E$	Módulo de deformabilidade real
$E^*$	Módulo de deformabilidade complexo
$E_1$	Componente real (elástica) do módulo de deformabilidade
$E_2$	Componente imaginária (viscosa) do módulo de deformabilidade
$E_\infty$	Máximo valor da rigidez da mistura betuminosa
$E_T$	Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa à temperatura $T$
$E_m$	Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa
$E_{sb}$	Módulo de deformabilidade da sub-base
$E_{sf}$	Módulo de deformabilidade do solo de fundação
$E_m(T, f)$	Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa em função da temperatura e frequência
$F_m$	Força de impacto medida
$F_n$	Força de impacto nominal
$G$	Módulo de distorção
$G_f$	Módulo de distorção para uma frequência de carregamento $f$
$G^*$	Módulo de distorção complexo
$GSB$	Grau de saturação em betume
$IPen$	Índice de penetração do betume
$IPen_r$	Índice de penetração do betume após endurecimento
$IR$	Temperatura da superfície do pavimento medida por infra-vermelhos
$L$	Afastamento entre áreas de rodas gémeas

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

$N_{80}$	Número de eixos padrão de 80 kN
$N_a$	Número de eixos padrão admissível
$N_s$	Número de eixos padrão que solicitam o pavimento na sua vida útil
$P_{85}$	Percentil 85
$R^*$	Módulo reduzido
$S_b$	Rigidez do betume
$T$	Temperatura (símbolo genérico)
$T_0$	Espessura da camada de reforço
$Tab$	Temperatura de amolecimento do betume
$Tab_r$	Temperatura de amolecimento do betume após endurecimento
$T_d$	Temperatura do pavimento à profundidade $d$
$T_e$	Espessura efectiva do pavimento
$TE$	Temperatura de ensaio
$TMXA_m$	Temperatura média máxima mensal do mês $m$ do local
$T_n$	Espessura necessária para que o pavimento suporte o tráfego considerado
$TPOND$	Temperatura ponderada do local
$TRb$	Taxa de reciclagem do betume
$TS$	Temperatura de serviço equivalente
$T_t$	Temperatura de transição (método geral)
$TVB$	Teor volumétrico de betume ou percentagem volumétrica de betume
$V_a$	Volume de agregados
$V_b$	Volume de betume
$VMA$	Volume de vazios no esqueleto do agregado
$V_t$	Volume total
$V_v$	Volume de vazios

### b) Minúsculas latinas

$d$	Profundidade
$f(T, pen25)$	Função da temperatura e penetração (método geral)
$f$	Frequência de carregamento ou de ensaio
$fr$	Factor de indução de assentamento
$ma$	Massa de agregados
$mb$	Massa de betume
$mt$	Massa total
$n$	Porosidade
$n_b$	Parâmetro de Boyce
$p$	Pressão de contacto
$pa$	Percentagem de agregado
$pa_i$	Percentagem de agregado $i$
$pb$	Percentagem de betume

$pen_{25}$	Penetração do betume a uma temperatura de 25 °C
$pen_{25,r}$	Penetração do betume a uma temperatura de 25 °C após o endurecimento
$pen_F$	Penetração do ligante envelhecido a 25 °C
$pen_N$	Penetração do ligante novo a 25 °C
$pen_r$	Penetração do ligante total da mistura reciclada a 25 °C
$r$	Raio
$t$	Tempo
$tb$	Teor em betume
$tc$	Tempo de carregamento
$va$	Percentagem volumétrica de agregado
$vt$	Velocidade média da corrente de tráfego

#### d) Minúsculas gregas

$\alpha$	Teor de asfaltenos do betume
$\varepsilon(t)$	Extensão no instante $t$
$\varepsilon_0$	Amplitude de extensão num ciclo de carga
$\varepsilon_{dp}$	Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação
$\varepsilon_t$	Extensão de tracção
$\phi$	Ângulo de fase
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho_a$	Massa volúmica de agregado
$\rho_{a_i}$	Massa volúmica de agregado $i$
$\rho_b$	Massa volúmica de betume
$\sigma_D$	Desvio padrão
$\sigma(t)$	Tensão no instante $t$
$\sigma_0$	Amplitude de tensão num ciclo de carga
$\omega$	Frequência angular de carregamento

#### e) Índices inferiores gerais

$TE$	À temperatura de ensaio $TE$
$TS$	À temperatura de serviço $TS$

$máx$	Máximo
$méd$	Médio
$mín$	Mínimo

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

### f) Índices superiores gerais

*SHELL* Obtido pelo método da SHELL

*TVB* Para uma percentagem volumétrica de betume igual a *TVB*

*pen25* Para uma penetração a 25 °C igual a *pen25*

*va* Para uma percentagem volumétrica de agregados igual a *va*

*vt* Para uma velocidade de tráfego igual a *vt*

### g) Símbolos

1 – *day* Média de temperatura do ar no dia anterior ao ensaio

# **1. Introdução**

## **1.1 Justificação da escolha do tema**

A rede rodoviária é essencial para o funcionamento da sociedade Portuguesa, uma vez que são as vias rodoviárias que possibilitam o deslocamento de pessoas e mercadorias entre as diversas zonas do país.

Dada a importância dos pavimentos rodoviários, é essencial que estes sejam mantidos em boas condições de funcionamento. Sendo assim, o foco principal desta área da engenharia civil no futuro deixará de ser a construção de novas vias rodoviárias para dar lugar à conservação e reabilitação das vias já existentes.

Por estes motivos torna-se evidente a importância do estudo da reabilitação de pavimentos. Das diversas soluções de pavimentação existentes, os pavimentos flexíveis são os predominantes em Portugal, razão pela qual são a solução de base considerada nesta dissertação.

Em qualquer projecto de reabilitação é necessário inicialmente caracterizar e avaliar o estado de conservação do pavimento. Por outras palavras, procura-se verificar se as condições de segurança, conforto e economia exigidas aos pavimentos rodoviários são respeitadas. Caso todas as condições se verifiquem, é ainda necessário estimar o tempo de vida útil restante do pavimento, ou seja, o tempo ao longo do qual o pavimento continua a cumprir as suas exigências de funcionamento sem que seja necessária a manutenção deste.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

Esta avaliação consiste em muitos casos na determinação de algumas características físicas cuja interpretação fornece ao projectista os dados necessários para que seja tomada uma decisão quanto à necessidade de conservação ou reabilitação. Adicionalmente, as propriedades físicas encontradas podem ser úteis no processo de dimensionamento das soluções de reabilitação, caso estas sejam necessárias.

Entre as diversas propriedades das misturas betuminosas, o módulo de deformabilidade tem especial relevância na definição do comportamento do material. No âmbito da reabilitação, esta propriedade é normalmente obtida por análise de resultados de ensaios realizados *in situ*. No entanto, quando se obtém o módulo de deformabilidade deste modo é necessário ter em conta que o valor obtido corresponde à temperatura que se fez sentir no pavimento durante o ensaio.

Sendo assim, e tendo em conta que o módulo de deformabilidade de misturas betuminosas varia com a temperatura, conclui-se que o valor do módulo obtido por ensaio não é apropriado para o processo de análise de pavimentos flexíveis, uma vez que durante esta análise se considera o pavimento sujeito a uma temperatura de serviço normalmente diferente da temperatura de ensaio.

Torna-se então necessário o desenvolvimento do conhecimento relativo a esta característica e de técnicas de estimativa do módulo de deformabilidade correspondente a uma temperatura de serviço a partir do módulo de deformabilidade relativo a temperaturas de ensaio.

### **1.2 Objectivos**

Este trabalho tem como objectivo contribuir para o estudo do módulo de deformabilidade e, sobretudo, dos métodos de correcção desta propriedade de acordo com a temperatura. Pretende-se ainda sintetizar os diversos métodos existentes para a correcção do módulo de deformabilidade.

Além disso analisam-se os factores que influenciam o processo de correcção do módulo de deformabilidade. Pretende-se também avaliar o efeito da variação do módulo sobre a resistência e durabilidade de pavimentos flexíveis existentes.

Inserem-se também no escopo deste trabalho o desenvolvimento de novos métodos de correcção do módulo de deformabilidade baseados em resultados numéricos e experimentais. Estes métodos deverão ser fiáveis, versáteis, universais e de fácil aplicação e compreensão. Finalmente, os resultados dos métodos desenvolvidos serão comparados com os dos métodos existentes.

### 1.3 Organização da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, dois apêndices e um anexo, cuja organização se descreve nesta secção.

O Capítulo 1 tem uma função introdutória. Neste apresenta-se o enquadramento do tema em análise, os objectivos do trabalho realizado e a descrição da organização do mesmo.

O Capítulo 2 apresenta noções básicas relativas a misturas betuminosas necessárias à compreensão dos Capítulos subsequentes. Define-se ainda o conceito de módulo de deformabilidade e estudam-se as variáveis que o condicionam. Além disso, expõem-se os diversos métodos que o permitem determinar. Finalmente, é abordado o tema da resistência de pavimentos flexíveis à fadiga e à deformação permanente.

O Capítulo 3 incide sobre a conservação e reabilitação de pavimentos. Descrevem-se duas metodologias de avaliação do estado de conservação de pavimentos e dimensionamento de camadas de reforço. Finalmente é feita uma avaliação do impacto da correcção do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil de pavimentos e no dimensionamento de camadas de reforço. A partir deste estudo definem-se intervalos de erros máximos relativos ao processo de correcção do módulo de deformabilidade que correspondem a um determinado grau de precisão na determinação do tempo de vida útil.

No Capítulo 4 apresentam-se os vários métodos existentes para a correcção do módulo de deformabilidade. Seguidamente expõem-se os novos métodos de correcção desenvolvidos e calibrados no âmbito desta dissertação.

No Capítulo 5 é feito um estudo estatístico da eficácia dos métodos descritos no Capítulo 4 com base nos limites de erro estabelecidos no Capítulo 3. Comparam-se ainda as vantagens e desvantagens de cada método.

O Capítulo 6 contém as conclusões do trabalho desenvolvido assim como algumas sugestões para futuros desenvolvimentos relativos a este tema.

No Apêndice A apresenta-se um exemplo prático da aplicação do método geral desenvolvido no Capítulo 5.

No Apêndice B apresenta-se o manual relativo ao programa *CMod* desenvolvido no âmbito desta dissertação, cuja função é a correcção do módulo de deformabilidade de acordo com a temperatura e considerando os diversos métodos estudados.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

No Anexo A apresentam-se as temperaturas ponderadas e os parâmetros a utilizar no modelo de previsão da temperatura de serviço desenvolvido por Baptista et al. (2002).

## **2. Características fundamentais das misturas betuminosas**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo é feita uma breve revisão dos conceitos básicos relativos à composição de misturas betuminosas e às suas principais propriedades, cuja compreensão é essencial para a interpretação deste documento. Desenvolve-se com ênfase a noção de módulo de deformabilidade e os múltiplos métodos existentes para a sua determinação. Além disso aborda-se o tema da resistência à fadiga e à deformação permanente nos pavimentos.

### **2.2 Composição das misturas betuminosas**

Para que seja possível a compreensão das características das misturas betuminosas é inicialmente necessário compreender a sua constituição. A Figura 2-1 mostra os três elementos existentes numa mistura betuminosa típica.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

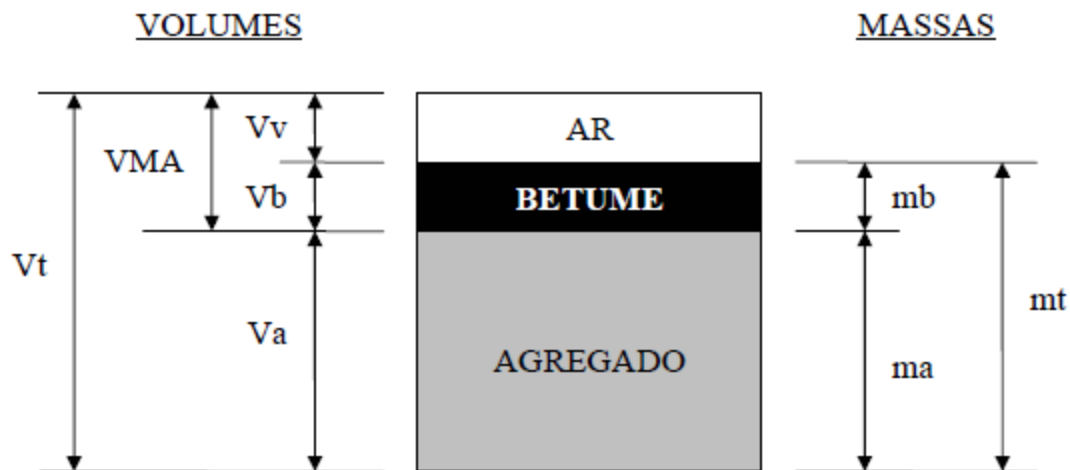


Figura 2-1: Composição de uma mistura betuminosa (Baptista, 2006)

sendo:

$Vv$  – volume de vazios ( $\text{cm}^3$ );

$Vb$  – volume de betume ( $\text{cm}^3$ );

$Va$  – volume de agregado ( $\text{cm}^3$ );

$Vt$  – volume total ( $\text{cm}^3$ );

$VMA$  – volume de vazios no esqueleto de agregado ( $\text{cm}^3$  ou %);

$mb$  – massa de betume (g);

$ma$  – massa de agregados (g);

$mt$  – massa total (g).

A partir destas grandezas é possível definir diversas propriedades úteis ao estudo de misturas betuminosas. Enuncia-se de seguida cada uma destas propriedades, tomando como referência a descrição de Baptista (2006).

$\rho_a$  – Massa volúmica do agregado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$$\rho_a = \frac{ma}{Va} \quad (2-1)$$

$\rho_b$  – Massa volúmica do betume ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$$\rho_b = \frac{mb}{Vb} \quad (2-2)$$

$Bm$  – Baridade da mistura ou massa volúmica da mistura ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$$Bm = \frac{mt}{Vt} \quad (2-3)$$

## 2. Características fundamentais das misturas betuminosas

$\rho a$  – Percentagem de agregado (%)

$$\rho a = \frac{ma}{Va} \quad (2-4)$$

$pb$  – Percentagem de betume (%)

$$pb = \frac{mb}{mt} \quad (2-5)$$

$tb$  – Teor em betume (%)

$$tb = \frac{mb}{ma} \quad (2-6)$$

$n$  – Porosidade (%)

$$n = \frac{Vv}{Vt} \quad (2-7)$$

$TVB$  – Teor volumétrico de betume ou percentagem volumétrica de betume (%)

$$TVB = \frac{Vb}{Vt} \quad (2-8)$$

$va$  – Percentagem volumétrica de agregado (%)

$$va = \frac{Va}{Vt} \quad (2-9)$$

$VMA$  – Volume de vazios no esqueleto de agregado (%)

$$VMA = \frac{Vv + Vb}{Vt} \quad (2-10)$$

Uma vez que o esqueleto das misturas betuminosas é constituído por uma mistura de agregados é importante conhecer a massa volúmica desta mistura. Esta massa volúmica pode ser obtida a partir da percentagem de cada agregado na mistura ( $pa_i$ ) e as respectivas massas volúmicas ( $\rho a_i$ ) de acordo com a equação (2-11).

$$\rho a = \frac{pa}{\sum \frac{pa_i}{\rho a_i}} \quad (2-11)$$

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

Considera-se ainda a massa volúmica máxima, ou baridade máxima teórica  $Bt$  expressa em  $\text{g/cm}^3$  que pode ser obtida de acordo com a expressão (2-12) ou, alternativamente, com recurso ao picnómetro de vácuo, de acordo com a norma ASTM D 2041 ou EN 12697-5.

$$Bt = \frac{1}{\frac{pb}{\rho b} + \sum \frac{pa_i}{\rho a_i}} \quad (2-12)$$

A porosidade das misturas betuminosas pode ser obtida com base na baridade máxima teórica e a baridade da mistura compactada segundo a equação (2-13). Por sua vez a baridade da mistura pode ser determinada de acordo com a norma ASTM D 2726 ou EN 12697-6.

$$n = \frac{Bt - Bm}{Bt} \quad (2-13)$$

Finalmente, é possível calcular a percentagem volumétrica de betume, o volume de vazios no esqueleto do agregado e o grau de saturação do betume através das seguintes equações:

$$TVB = \frac{pb \times Bm}{\rho b} \quad (2-14)$$

$$VMA = TVB + n \quad (2-15)$$

$$GSB = \frac{TVB}{VMA} \quad (2-16)$$

### 2.3 Propriedades do ligante

Como é evidente, as características do ligante têm um grande impacto nas propriedades da mistura betuminosa que o incorpora. As propriedades mais importantes dos ligantes são a penetração a 25 °C e a temperatura de anel e bola.

A penetração a 25 °C corresponde à profundidade de penetração (em décimos de milímetro) que uma agulha de dimensões específicas e com 100 gf de peso consegue atingir numa amostra de betume ao fim de 5 segundos e a uma temperatura de 25 °C. As normas relativas a esta propriedade são a ASTM D 5 e a EN 1426. Esta característica pode ser utilizada como indicador indirecto do grau de viscosidade do betume. A Figura 2-2 mostra uma representação esquemática do ensaio descrito.

## 2. Características fundamentais das misturas betuminosas

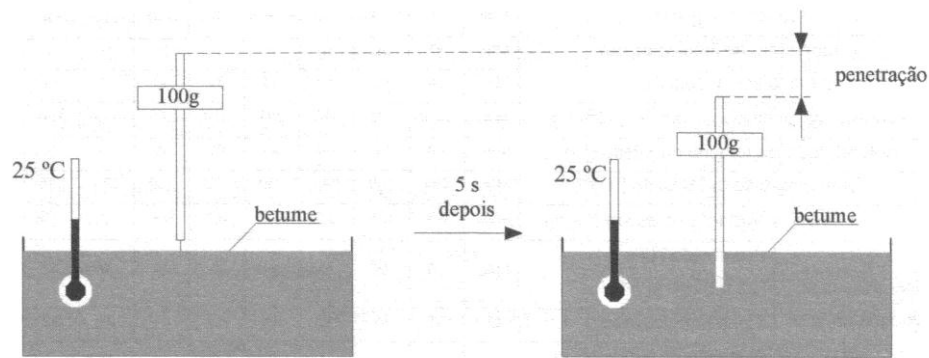


Figura 2-2: Representação esquemática do ensaio de penetração (Branco et al., 2008)

A temperatura de anel e bola pode ser determinada de acordo com o procedimento descrito nas normas ASTM D 36 e EN 1427. De modo resumido, a técnica utilizada consiste na colocação de uma esfera de aço com um determinado peso sobre uma amostra de betume contida num anel de latão. A amostra encontra-se imersa em água que é aquecida 5 °C por minuto. Este aumento de temperatura vai provocar o amolecimento do ligante e consequentemente a esfera de aço vai deformar a amostra. No momento em que o betume e a esfera tocam na base do suporte metálico (a 2,5 cm da posição inicial da esfera) regista-se a temperatura da água. Normalmente são ensaiadas duas amostras de betume em simultâneo, sendo a temperatura de anel e bola a média das duas temperaturas obtidas. A Figura 2-3 mostra uma representação esquemática do ensaio descrito:

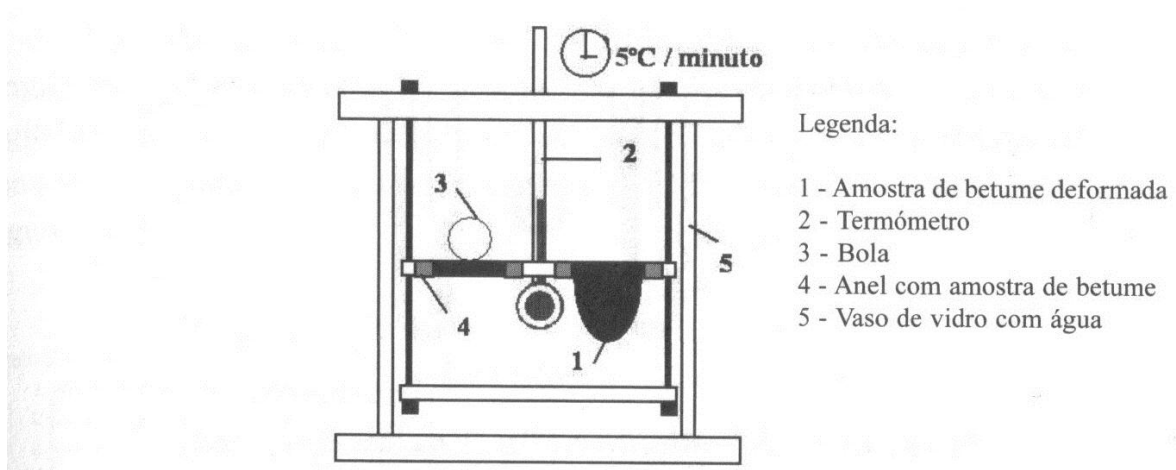


Figura 2-3: Representação esquemática do ensaio de determinação da temperatura de anel e bola (Branco et al., 2008)

Além destas duas características utiliza-se por vezes a viscosidade como forma de quantificar a consistência do ligante a uma determinada temperatura.

## 2.4 Características de deformabilidade

A definição de módulo de Young, sobre a qual se constrói a teoria da elasticidade é normalmente aplicada a materiais como o aço e o betão que se encontram usualmente sujeitos a cargas estáticas e que apresentam características de deformabilidade bem definidas (Severi et al., 1999). Um exemplo destas características é a deformação de rotura do betão que corresponde a 2,5%.

Uma vez que as deformações em misturas betuminosas têm grandezas muito superiores às deformações de outros materiais (como o betão, o aço e o vidro) e devido à natureza cíclica e repetitiva das cargas que instigam fenómenos de fadiga nas estruturas de pavimentos rodoviários, o conceito de “módulo de Young” não é o mais adequado para a descrição do comportamento do material. Por estes motivos recorre-se ao conceito de módulo de deformabilidade (também conhecido como módulo dinâmico e módulo de rigidez).

O módulo de deformabilidade, tal como o módulo de Young, corresponde à tensão necessária para provocar no material uma deformação unitária. Por outras palavras, é a relação entre a tensão a que um material está sujeito e a deformação correspondente. Esta definição só é válida no domínio do comportamento elástico dos materiais.

Assumindo que as misturas betuminosas são isotrópicas (simplificação usualmente considerada) e que têm um comportamento elástico linear, o módulo de deformabilidade em conjunto com qualquer das outras constantes elásticas (módulo de distorção, módulo de compressibilidade volumétrica ou coeficiente de Poisson) pode ser utilizado para definir o comportamento mecânico da mistura. O coeficiente de Poisson apresenta variações com a temperatura. No entanto normalmente assumem-se para este coeficiente valores da ordem dos 0,35 a 0,40 (Branco et al., 2008), uma vez que este factor não tem um grande impacto na análise do comportamento mecânico das misturas betuminosas.

Por este motivo, o único obstáculo à completa definição do comportamento mecânico das misturas betuminosas é a determinação do módulo de deformabilidade. Torna-se então importante fazer uma análise detalhada desta característica e dos seus métodos de cálculo.

O cálculo do módulo de deformabilidade pode ser alcançado através da execução de um ensaio de cargas repetidas a temperatura constante (Pais et al., 2004). Este ensaio consiste na aplicação de uma tensão variável cíclica ao longo do tempo sobre um provete (normalmente com uma forma prismática).

A tensão descrita pode ser definida através da equação (2-17):

$$\sigma(t) = \sigma_0 \times \text{sen}(\omega t) \quad (2-17)$$

sendo:

- $\sigma(t)$  – tensão em função do tempo;
- $\sigma_0$  – amplitude de tensão num ciclo de carga;
- $\omega$  – frequência angular de carregamento;
- $t$  – tempo.

Sujeita a esta tensão sinusoidal, a mistura betuminosa apresenta uma extensão (similarmente sinusoidal) com frequência igual à da carga. Esta extensão pode ser obtida através da equação (2-18):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \times \text{sen}(\omega t - \phi) \quad (2-18)$$

sendo:

- $\varepsilon(t)$  – extensão no instante  $t$ ;
- $\varepsilon_0$  – amplitude de extensão correspondente a  $\sigma_0$ ;
- $\phi$  – ângulo de fase.

Como se evidencia na equação apresentada, pode existir um desfasamento da deformação relativamente à tensão aplicada. A este desfasamento chama-se ângulo de fase (Neves e Correia, 2006).

É possível garantir a existência deste desfasamento (histerese) se a frequência dos ciclos utilizados no ensaio for um valor próximo ao inverso da constante viscoelástica do material betuminoso (Courtney, 2000).

O ângulo de fase é um indicador do tipo de comportamento do material. Para valores próximos de  $0^\circ$ , o material tem um comportamento elástico. Para valores próximos de  $90^\circ$ , o material tem um comportamento viscoso.

Para pequenas deformações (enquanto o material tem comportamento linear) o módulo complexo obtém-se através da equação (2-19):

$$E^* = E \times e^{i\phi} \quad (2-19)$$

sendo:

- $E^*$  – módulo de deformabilidade complexo;
- $E$  – módulo de deformabilidade real que pode ser obtido de acordo com a equação (2-20):

$$E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2-20)$$

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

O módulo de deformabilidade complexo pode ainda ser representado pelas suas componentes real e imaginária como apresentado nas equações (2-21) e (2-22):

$$E^* = |E^*| \times (\cos \phi + i \times \sin \phi) \quad (2-21)$$

$$E^* = E_1 + i \times E_2 \quad (2-22)$$

sendo:

$|E^*|$  – norma do módulo de deformabilidade complexo obtido de acordo com a equação (2-23):

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2-23)$$

$\phi$  – ângulo de fase obtido de acordo com a equação (2-24):

$$\phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (2-24)$$

$E_1$  – parte real do módulo de deformabilidade;

$E_2$  – parte imaginária do módulo de deformabilidade.

Na Figura 2-4 faz-se uma representação vectorial das equações descritas:

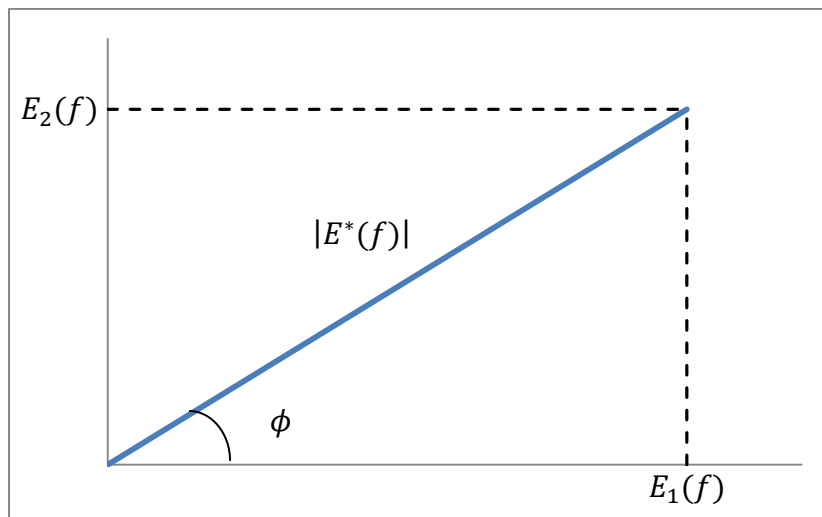


Figura 2-4: Representação vectorial das componentes do módulo complexo (adaptado de Vale, 2004)

A componente real do módulo complexo representa a parte elástica do comportamento do material, uma vez que está relacionada com o máximo de armazenamento de energia possível num ciclo. A componente imaginária relaciona-se com a energia dissipada num ciclo (Diogo et al., 2002).

A componente imaginária tem, em geral, valores muito reduzidos, pelo que se pode considerar que a componente real do módulo complexo é aproximadamente igual ao módulo complexo em si.

De acordo com estudos desenvolvidos na Universidade de Nottingham (1986) as frequências de carga utilizadas neste tipo de ensaios podem ser traduzidas em tempos de carregamento ou velocidades de tráfego através das equações (2-25) e (2-26).

$$vt = \frac{f}{0,15} \quad (2-25)$$

$$tc = \frac{0,15}{f} \quad (2-26)$$

sendo:

$vt$  – velocidade média da corrente de tráfego em quilómetros por hora;

$f$  – frequência de carregamento ou de ensaio em Hertz;

$tc$  – tempo de carregamento em segundos.

Estas equações permitem a comparação de resultados obtidos por ensaio e por diferentes metodologias que recorrem não a frequências mas sim a velocidades de tráfego ou tempos de carregamento para o cálculo do módulo de deformabilidade (como por exemplo o método da SHELL). A obtenção destas relações foi conseguida por análise do ábaco de Van der Poel (Figura 2-6).

### **2.4.1 Propriedades que influenciam a deformabilidade de misturas betuminosas**

Como indicado anteriormente, a deformabilidade de uma mistura betuminosa pode ser definida através do seu módulo de deformabilidade e ângulo de fase. Há diversos factores que condicionam estas propriedades mecânicas. Di Benedetto et al. (1998) propôs a separação destes factores em duas categorias:

- Parâmetros relacionados com as condições de ensaio;
- Parâmetros relacionados com a composição da mistura.

Descrevem-se de seguida os parâmetros relativos a cada categoria.

### **2.4.1.1 Parâmetros relacionados com as condições de ensaio**

O primeiro parâmetro a considerar nesta categoria é o tipo de ensaio. Ensaio diferentes podem conduzir a resultados bastante distintos para a mesma amostra. A desigualdade deve-se aos diferentes pressupostos dos vários ensaios. Exemplificando, num ensaio de deflectómetro de impacto são ensaiadas camadas totalmente apoiadas em camadas subjacentes, que se podem considerar infinitas horizontalmente e a carga é aplicada por intermédio de uma placa circular. Assim, o cálculo do módulo de deformabilidade é executado de acordo com um modelo de camadas horizontais, homogéneas e isotrópicas, considerando materiais de comportamento elástico linear sujeitos a uma carga estática. Esta análise não passa de uma simplificação da realidade, pelo que existem erros inerentes. Considerando agora um ensaio em laboratório, os provetes analisados têm pequenas dimensões e diferentes condições de confinamento e carga (Gomes, 2005).

A frequência e temperatura de ensaio são parâmetros bastante influentes desta categoria. Para temperaturas altas observa-se que a frequência tem um maior impacto nas características de deformabilidade. Por outro lado, frequências baixas ampliam a significância da temperatura. Estas conclusões são válidas para temperaturas entre -10 °C e 50 °C e frequências entre 1 e 40 Hz. A relevância da temperatura depende também da constituição da mistura betuminosa em questão. Assim, de acordo com Kim et al. (1995):

- Para temperaturas inferiores a 10 °C o comportamento da mistura é influenciado principalmente pelo betume, com interacção do agregado;
- Para temperaturas entre 10 °C e 50 °C tanto o agregado como o betume influenciam o comportamento da mistura;
- Para temperaturas superiores a 50 °C o comportamento depende predominantemente do agregado.

Por último, deve-se considerar o efeito do nível de carga utilizado para solicitar as amostras. O objectivo será conseguir um comportamento linear do material, motivo pelo qual as extensões não devem exceder  $50 \times 10^{-6}$ . Além disso, é importante notar que a zona de comportamento linear do material diminui com o aumento da temperatura (Soleimani, 1965). Sendo assim, é conveniente sujeitar os provetes a valores mínimos de extensão sem prejuízo da qualidade de medição.

### **2.4.1.2 Parâmetros relacionados com a composição da mistura**

O primeiro factor a considerar nesta categoria é o tipo de betume. Usualmente, betumes mais duros originam misturas com maior módulo de deformabilidade e menor ângulo de fase. Por outro lado, a utilização de betumes modificados pode diminuir o impacto da temperatura nas características de deformabilidade (sendo este o objectivo da escolha destes tipo de materiais na maioria dos casos).

## 2. Características fundamentais das misturas betuminosas

Outro factor a considerar é a quantidade de betume utilizada na produção da mistura. Para além da ligação ao efeito da temperatura mencionada anteriormente, é necessário ter em conta a ligação entre a dosagem de betume e a porosidade da mistura.

O efeito dos agregados grossos é outro parâmetro a ter em conta. Este parâmetro é de particular importância em situações de carregamentos de baixa frequência e/ou altas temperaturas (para as quais o betume amolece e a resistência é condicionada principalmente pelo agregado). A granulometria utilizada é também um critério relevante, visto que está directamente ligada à porosidade. A superfície dos agregados é outro factor importante, uma vez que superfícies roladas diminuem o atrito interno das partículas da mistura e, consequentemente diminuem o módulo de deformabilidade.

A quantidade e tipo de filer são também parâmetros significativos. Uma maior percentagem de filer conduz a um maior módulo de deformabilidade. No entanto, se a porção de filer exceder a quantidade máxima que o betume consegue absorver haverá uma diminuição do módulo.

Um outro factor a ter em conta é a porosidade. Quanto menor for esta variável, maiores são as características mecânicas. Como é evidente, esta variável encontra-se directamente relacionada com as proporções de betume e agregados e com processo de compactação da mistura. Para porosidades reduzidas o efeito da temperatura sobre as características mecânicas das misturas diminui.

Outro factor a considerar é a humidade dos provetes. De acordo com Fwa et al. (1995), provetes sujeitos a ciclos de molhagem-secagem apresentam uma diminuição do módulo de deformabilidade. No entanto, em provetes imersos em água durante longos períodos verifica-se um aumento do módulo. Após a secagem destes provetes o módulo de deformabilidade é semelhante ao módulo de provetes nunca sujeitos a humidade.

Finalmente, é necessário ter em conta a origem e a idade dos provetes. Caso uma amostra de material fabricada em laboratório não seja representativa dos provetes desse mesmo material obtidos *in situ* (a nível da composição e compactação), observam-se características de deformabilidade distintas consoante a origem do material. A idade dos provetes está relacionada com o processo de envelhecimento do material, através do qual a rigidez aumenta. De acordo com Nunn et al. (1992), este aumento de rigidez deixa de ser significativo ao fim de um ano.

## 2.4.2 Avaliação experimental das características de deformabilidade

Existem diversos ensaios laboratoriais compatíveis com esta metodologia. Usualmente, estes ensaios consistem na aplicação de cargas ciclicamente. De acordo com Di Benedetto et al. (1998) estes ensaios podem ser separados em três categorias:

- Ensaios de flexão;
- Ensaios de tracção-compressão;
- Ensaios de corte.

Na Figura 2-5 representam-se esquematicamente os principais ensaios utilizados na avaliação das características de deformabilidade.

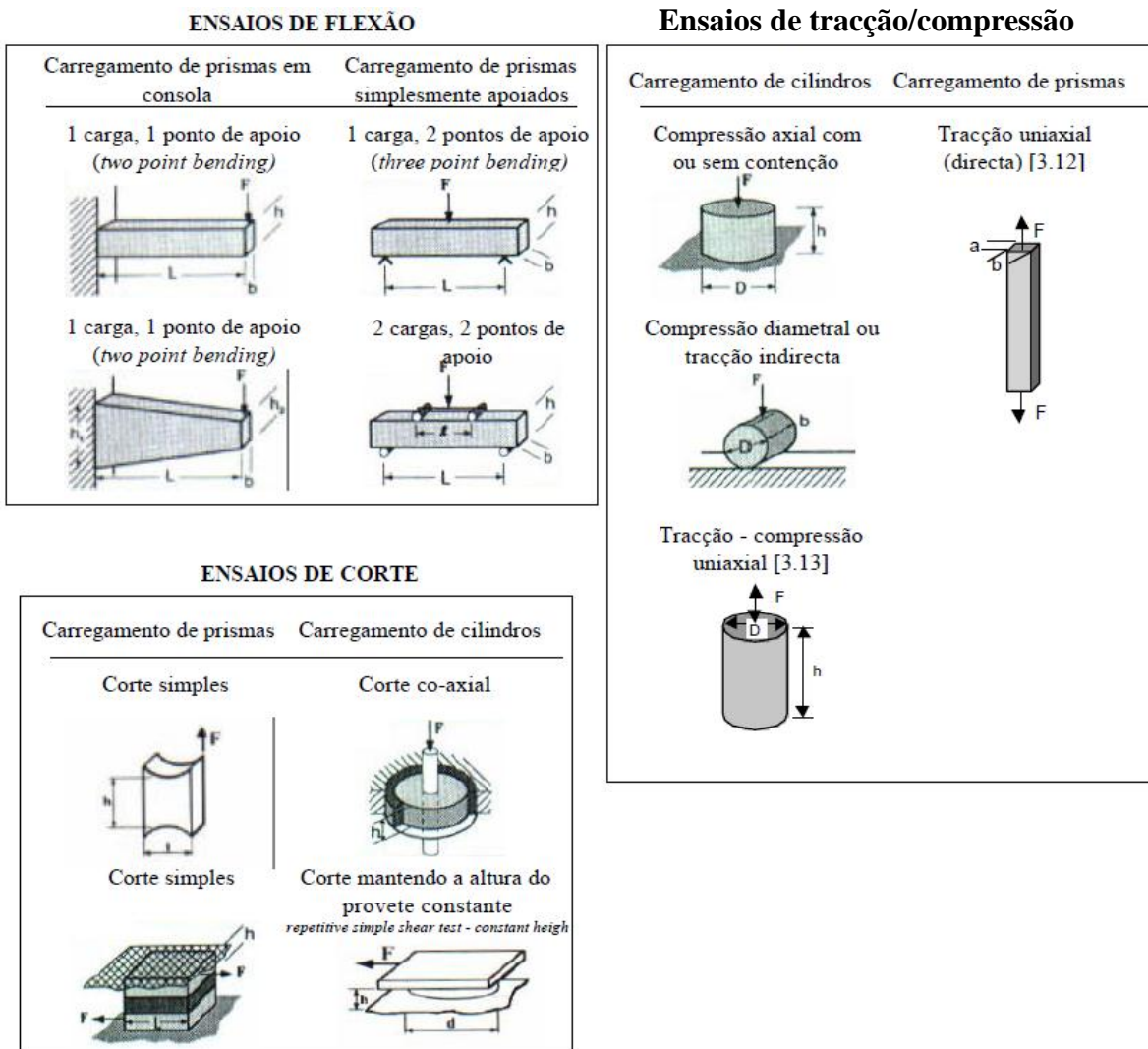


Figura 2-5: Ensaios laboratoriais para a determinação do módulo de deformabilidade (adaptado de Capitão, 2003)

## 2. Características fundamentais das misturas betuminosas

De acordo com Assi (1981) existe uma forma de classificação alternativa a esta, que divide os ensaios em duas categorias: ensaios homogéneos, nos quais é feita a medição directa de tensões e extensões, permitindo a obtenção da lei constitutiva do material e ensaios não homogéneos que se baseiam na postulação prévia da lei constitutiva do material, pelo que são úteis apenas quando o comportamento do material é simples (isotrópico linear elástico ou isotrópico linear visco-elástico).

Por outro lado existem ensaios *in situ*. É particularmente relevante conhecer a velocidade de observação destes ensaios, uma vez que maiores velocidades oferecem a possibilidade de obter um maior número de leituras num troço de pavimento. Outra grande vantagem é a diminuição do impacto da execução dos ensaios na circulação de trânsito. Como se referiu no ponto anterior, um dos factores que influenciam o módulo de deformabilidade é o tempo de carregamento. É importante considerar a influência deste factor (que se relaciona com a velocidade de tráfego) no módulo de deformabilidade. Deve-se tentar aproximar as condições do ensaio às condições de serviço do pavimento, pelo que é conveniente que o tempo de carregamento dos ensaios seja semelhante ao que se irá verificar em projecto. Apresentam-se no Quadro 2-1 os diversos ensaios *in situ* de acordo com as suas velocidades de observação:

Quadro 2-1: Ensaios *in situ* para determinação do módulo de deformabilidade (adaptado de Branco et al., 2008)

Velocidade de observação	Ensaio
Ensaios estacionários	Viga de Benkleman
	Ensaio de deflectómetro de impacto (FWD – falling weight deflectometer)
Entre 3 km/h e 18 km/h	Deflectómetro FLASH
	Curviâmetro
90 km/h (em fase de protótipo)	High Speed Deflectograph (HSD)
	Road deflection tester (RDT)

Estes ensaios têm a vantagem de ser de carácter não destrutivo contrariamente aos ensaios laboratoriais que implicam a extracção de amostras do pavimento em análise. Como se pode observar no Quadro 2-1, estão a ser desenvolvidas novas ferramentas de ensaio que permitem velocidades de observação bastante semelhantes às velocidades normais de trânsito (que como se demonstrou são vantajosas).

### 2.4.3 Leis de previsão do módulo de deformabilidade

Estes métodos de estimativa do módulo de deformabilidade socorrem-se de expressões ou ábacos, definidos por diversos autores, que eliminam a necessidade de realização de ensaios laboratoriais demorados e complexos. Na maioria dos casos, estas metodologias foram concebidas por regressão dos resultados de inúmeros ensaios de modo a permitirem um cálculo simplificado do módulo de deformabilidade.

Este género de método deve ser aplicado ponderadamente uma vez que métodos diferentes têm por vezes resultados muito diferentes para condições iguais. Isto deve-se a diferenças de interpretação dos resultados experimentais em que se baseiam e diferenças de adaptação desses mesmos resultados ao que acontece na realidade (Branco et al., 2008). Apresentam-se a seguir alguns métodos deste tipo.

#### 2.4.3.1 Determinação da rigidez do betume

A rigidez do betume define-se como a relação entre as tensões e extensões do material para condições de temperatura e tempo de carregamento específicas.

Alguns métodos de cálculo do módulo de deformabilidade implicam a determinação prévia da rigidez do betume. Como tal é necessário primeiro fazer uma análise dos vários métodos de cálculo desta variável.

Existem três metodologias para o cálculo da rigidez do betume (Vale, 2004):

- Por medição directa da tensão e deformação de amostras;
- Por cálculo inverso recorrendo a um módulo de deformabilidade da mistura obtido experimentalmente;
- Por aplicação do ábaco de Van der Poel, ou expressões equivalentes ao mesmo.

De acordo com a SHELL (1990), o primeiro método pode ser implementado socorrendo-se de um ensaio de corte a tensão constante ou cíclica sinusoidal. As equações (2-27) e (2-28) são necessárias ao cálculo com apoio em ensaios de tensão constante:

$$G = \frac{\textit{tensão de corte}}{\textit{deformação de corte}} \quad (2-27)$$

$$Sb = 2(1 + \nu)G \quad (2-28)$$

sendo:

- $G$  – módulo de distorção;
- $\nu$  – coeficiente de Poisson;
- $Sb$  – rigidez do betume.

## 2. Características fundamentais das misturas betuminosas

Para ensaios de tensão cíclica com uma frequência  $f$  deve-se usar as equações (2-29) e (2-30):

$$G_f = \frac{\text{tensão de corte}}{\text{deformação de corte}} \quad (2-29)$$

$$Sb = 3G_f \quad (2-30)$$

sendo:

$G_f$  – módulo de distorção para a frequência de carregamento  $f$ ;

O segundo método mencionado consiste na execução de ensaios sobre misturas betuminosas que contêm o betume em análise. O objectivo destes ensaios é a determinação do módulo de deformabilidade da mistura. A partir deste valor é possível utilizar as expressões empíricas ou ábacos descritos nos subcapítulos seguintes para obter o valor da rigidez do betume.

De acordo com o terceiro método descrito, a rigidez do betume pode ser obtida com a consulta do ábaco de Van der Poel, exposto na Figura 2-6, que relaciona o tempo de carregamento (frequência), a temperatura de serviço da camada betuminosa, a temperatura de amolecimento e o índice de penetração do betume com a rigidez do ligante.

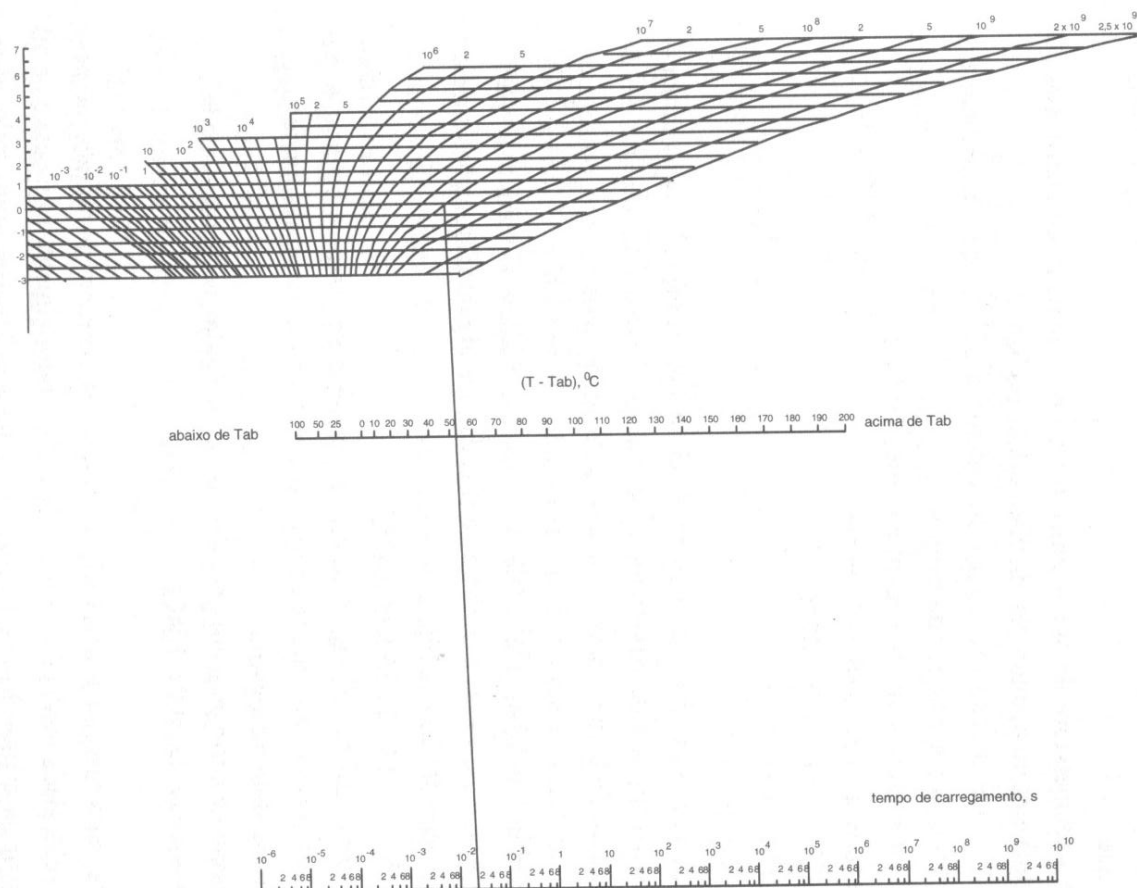


Figura 2-6: Ábaco de Van der Poel (adaptado de SHELL, 1977)

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

Como se pode ver, a utilização do ábaco segue este procedimento:

- Encontrar o tempo de carregamento e o valor da diferença entre a temperatura e a temperatura de amolecimento, nos respectivos eixos;
- Unir estes dois pontos com uma recta que se deve prolongar até esta atingir o índice de penetração adequado (que se mede no eixo vertical);
- O módulo de rigidez em Pascal é o correspondente ao final da recta obtida, medido relativamente às diversas curvas do ábaco.

O ábaco não permite o cálculo do ângulo de fase, ou seja, não permite ao utilizador a caracterização do comportamento viscoelástico do material. Em alternativa à utilização do ábaco, podem ser empregues diversas expressões baseadas nele. Estas expressões têm as seguintes vantagens sobre o ábaco:

- Permitem a obtenção de resultados precisos, o que nem sempre é fácil de conseguir no ábaco;
- Permitem a programação do cálculo, eliminando a dificuldade e a lentidão do cálculo manual.

Apresentam-se a seguir três equações alternativas ao ábaco de Van der Poel. A primeira equação, proposta por Ullidtz e Peattie (Branco et al., 2008) é a seguinte:

$$Sb = 1,157 \times 10^{-7} \times tc^{-0,368} \times 2,718^{-IPen_r} \times (Tab_r - T)^5 \quad (2-31)$$

válida para:

- $0,01 < tc < 0,1s$ ;
- $-1,0 < IPen_r < 1,0$ ;
- $20 < Tab_r - T < 60^\circ C$ .

A segunda expressão, proposta por Shahin (Groenendijk, 1998) é a seguinte:

$$\log(Sb) = -1,35927 - 0,06743 \times Tab - 0,90251 \times \log(tc) + 0,00038 \times Tab^2 + 0,00138 \times Tab \times \log(tc) + 0,006611 \times IPen \times Tab \quad (2-32)$$

válida para:

- $10^{-8} < Sb < 1 MPa$ ;

## 2. Características fundamentais das misturas betuminosas

A terceira expressão, proposta por Mollenar (Groenendijk, 1998) é a seguinte:

$$\begin{aligned} \log(Sb) = & -1,00972 - 0,11485 \times (Tab_r - T) - 0,38423 \times IPen_r \\ & - 0,94259 \times \log(tc) - 0,0879 \times (Tab_r - T) \times \log(tc) \\ & - 0,05643 \times IPen_r \times \log(tc) - 0,02915 \times \log(tc)^2 \\ & - 0,51873 \times 10^{-3} \times (Tab_r - T)^2 + 0,00113 \times IPen_r^3 \\ & \times (Tab_r - T) - 0,01403 \times (IPen_r \times Tab_r - T)^3 \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (2-33)$$

válida para:

- $1 < Sb < 2000 \text{ MPa}$ ;
- $10^{-2} < tc < 10^5 \text{ s}$ ;
- $-1,5 < IPen_r < 2,0$ ;
- $-100 < Tab_r - T < 50^\circ\text{C}$ .

As variáveis utilizadas nestas três expressões têm os seguintes significados:

$Sb$  – rigidez do betume em MPa;

$tc$  – tempo de carregamento em segundos, que pode ser obtido através da equação (2-34):

$$tc = \frac{1}{vt} \quad (2-34)$$

$vt$  – velocidade média do tráfego de veículos pesados em km/h. Em situação de tráfego “para-arranca” o tempo de carregamento pode tomar valores entre 0,1 e 1,0 segundos.

Em parques de estacionamento usam-se valores entre 1 minuto e 10 horas;

$T$  – temperatura de serviço;

$IPen$  – índice de penetração do betume obtido pela expressão de Pfeiffer e Van Dormal exposta na equação (2-35):

$$IPen = \frac{20 \times Tab + 500 \times \log(pen25) - 1955,55}{Tab - 50 \times \log(pen25) + 120,15} \quad (2-35)$$

$pen25$  – penetração do betume a uma temperatura de 25 °C em  $10^{-1}$  mm;

$Tab$  – temperatura de amolecimento em °C de acordo com o método de anel e bola.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

Os valores de  $Tab$  e  $pen25$  devem ser corrigidos de modo a contabilizar o envelhecimento (endurecimento) a curto prazo que está ligado ao processo de produção e aplicação *in situ* das misturas betuminosas. Os valores corrigidos assinalam-se com o índice  $r$  (que se refere a betume recuperado de misturas em serviço) e são calculados de acordo com as equações (2-36) e (2-37):

$$pen25_r = 0,65 \times pen25 \quad (2-36)$$

$$Tab_r = 99,13 - 26,35 \times \log(pen25_r) \quad (2-37)$$

### 2.4.3.2 Método da SHELL

De acordo com esta metodologia, o cálculo do módulo de deformabilidade depende da rigidez do betume. Para betumes de rigidez inferior a 5 MPa ou superior a 3000 MPa considera-se que a mistura terá um comportamento não linear. Por este motivo, a forma mais apropriada de conduzir o cálculo do módulo de deformabilidade para os intervalos de rigidez de betume em questão seria o recurso a ensaios.

Para valores de rigidez de betume entre 5 MPa e 1000 MPa e entre 1000 MPa e 3000 MPa utilizam-se as expressões (2-38) e (2-39), respectivamente:

$$E_m = 10^A \quad (2-38)$$

$$E_m = 10^B \quad (2-39)$$

sendo:

$$A = \frac{S89 + S68}{2} \times (\log(Sb) - 8) + \frac{S89 - S68}{2} \times |\log(Sb) - 8| + Sm108 \quad (2-40)$$

$$B = (Sm3109 - Sm108 - S89) \times \frac{\log(Sb) - 9}{\log(3)} + Sm108 + S89 \quad (2-41)$$

$$S89 = 1,12 \times \frac{(Sm3109 - Sm108)}{\log(30)} \quad (2-42)$$

$$S68 = 0,6 \times \log\left(\frac{1,37 \times TVB^2 - 1}{1,33 \times TVB - 1}\right) \quad (2-43)$$

$$Sm3109 = 10,82 - \frac{1,342 \times (100 - va)}{va + TVB} \quad (2-44)$$

## 2. Características fundamentais das misturas betuminosas

$$Sm108 = 8 + 5,68 \times 10^{-3} \times va + 2,135 \times 10^{-4} \times va^2 \quad (2-45)$$

$va$  – percentagem volumétrica de agregados;

$TVB$  – percentagem volumétrica de betume;

$E_m$  – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa em Pa;

$Sb$  – rigidez do betume em Pa.

O ábaco apresentado na Figura 2-7 relaciona a rigidez do betume e o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas. A construção do ábaco tem por base a experiência da SHELL e é válido apenas para as classes S1 (misturas densas com teor em betume maior que 4,5%) e S2 (misturas abertas com teor em betume inferior a 4%) descritas no seu manual de dimensionamento.

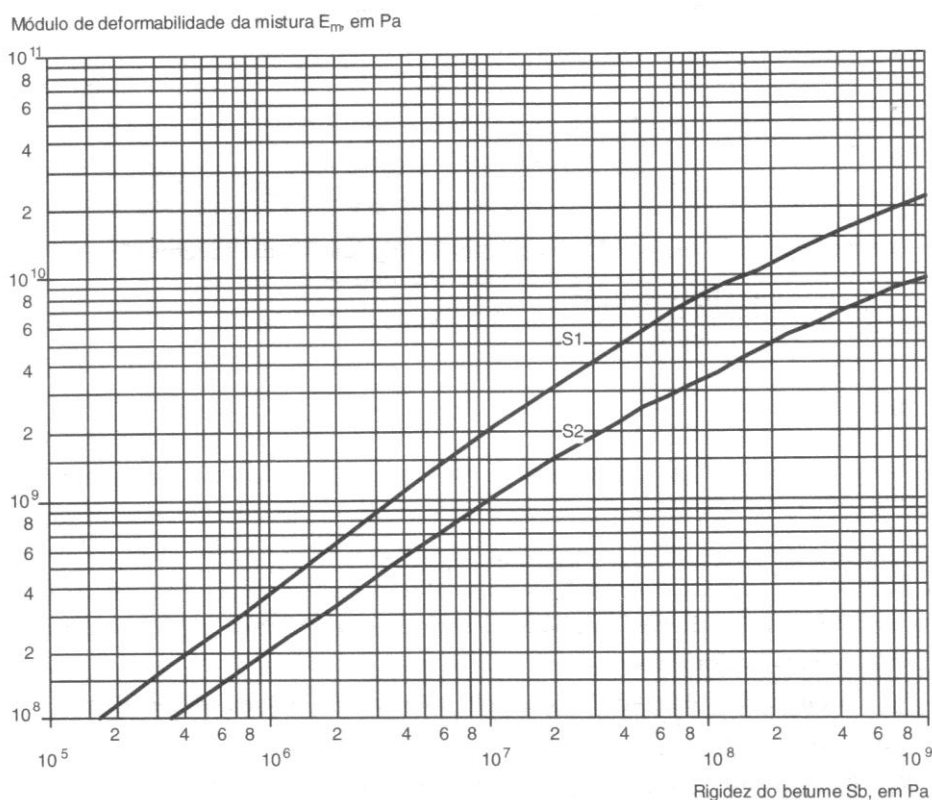


Figura 2-7: Relação entre  $E_m$  e  $S_b$  para as classes S1 e S2 do manual de dimensionamento da SHELL (adaptado de SHELL, 1977)

Neste ábaco evidencia-se que, considerando uma escala bilogarítmica, a variação do módulo de deformabilidade com a rigidez do betume é linear para valores de rigidez de betume inferiores a 10 MPa. Isto possibilita a determinação do módulo de deformabilidade para uma rigidez de betume inferior a 5MPa, uma vez que é possível obter a equação da recta em questão.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

Em alternativa às equações (2-38) e (2-39) pode-se recorrer ao ábaco proposto pelo manual de dimensionamento da SHELL que se apresenta na Figura 2-8:

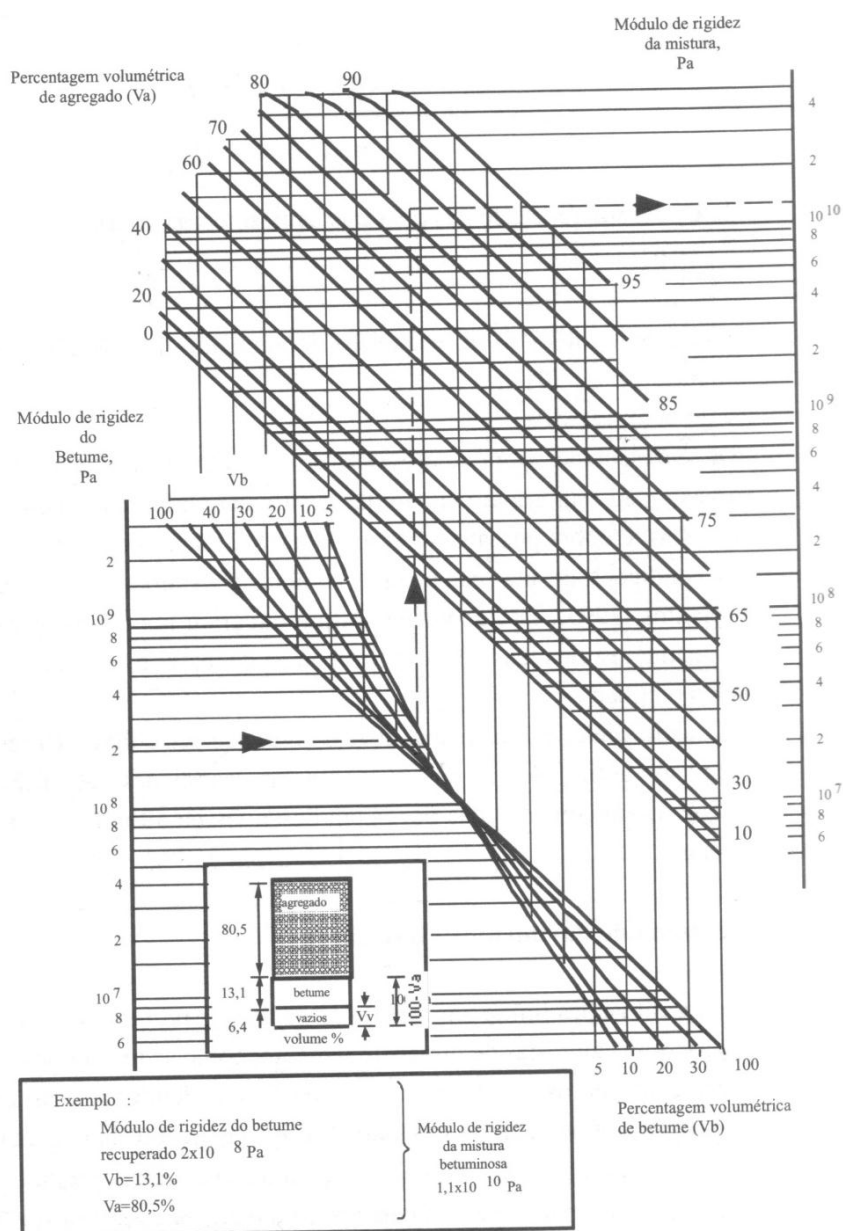


Figura 2-8: Ábaco de cálculo da deformabilidade de misturas betuminosas da SHELL (adaptado de SHELL, 1977)

Este ábaco utiliza-se do modo seguinte:

- Primeiro traça-se um segmento de recta horizontal com início na rigidez do betume apropriada e fim na recta correspondente à percentagem volumétrica de betume em questão;
- Seguidamente deve-se traçar um segmento de recta vertical com início no ponto final da recta anterior e fim na sua intersecção com a recta correspondente à percentagem volumétrica de agregados;

- Finalmente traça-se uma recta horizontal com início no ponto final da recta anterior e fim no eixo do módulo de rigidez da mistura, onde é possível encontrar o resultado desejado.

### 2.4.3.3 Método da Universidade de Nottingham

De acordo com Brown e Brunton (1986) o método da universidade de Nottingham, tal como o método da SHELL é válido apenas para valores de rigidez de betume superiores a 5 MPa (para os quais a mistura se pode considerar com comportamento linear).

O cálculo do módulo de deformabilidade de acordo com este método é baseado nas expressões de Brown e Brunton:

$$E_m = Sb \times \left[ 1 + \frac{257,5 - 2,5 \times VMA}{N \times (VMA - 3)} \right]^N \quad (2-46)$$

$$N = 0,83 \times \log \frac{4 \times 10^4}{Sb} \quad (2-47)$$

sendo:

*VMA* – volume de vazios no esqueleto do agregado da mistura em percentagem, cujo valor deve respeitar os limites mínimo e máximo de 12% e 30%.

*E<sub>m</sub>* – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa em MPa;

*Sb* – rigidez do betume em MPa.

Este método só é válido para misturas de porosidade superior a 3%. Em alternativa às equações (2-46) e (2-47) pode-se aplicar o ábaco da Figura 2-9.

Os módulos de deformabilidade calculados por este método são em geral superiores aos obtidos pelo método da SHELL, sendo a diferença bastante significativa. O motivo para tal incoerência entre os resultados dos diferentes métodos é por um lado a importância da interpretação dos resultados experimentais que são o suporte de cada uma das metodologias e por outro lado o método de transposição do contexto dos resultados experimentais para o contexto das situações reais.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

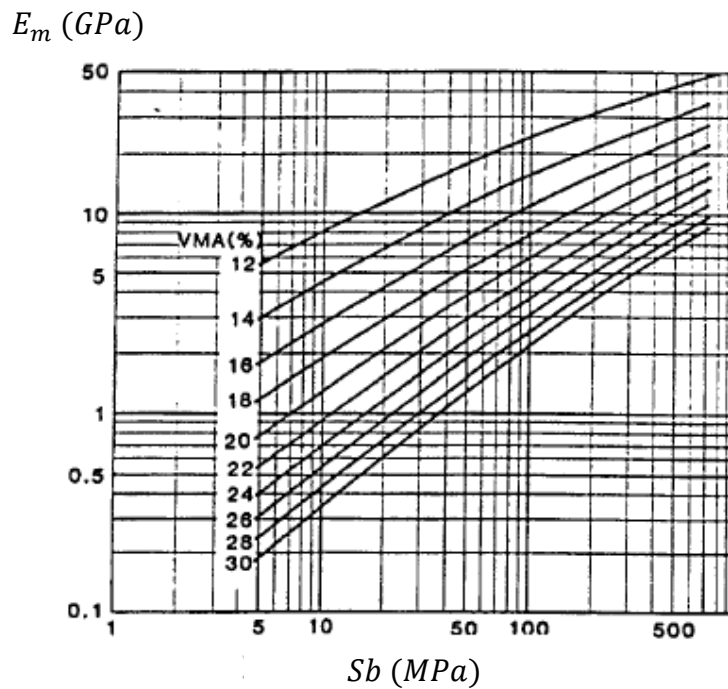


Figura 2-9: Relação entre o módulo de deformabilidade da mistura e a rigidez do betume (adaptado de Brown e Brunton, 1986)

**2.4.3.4 Método de Heukelom e Klomp**

Este método é baseado na seguinte expressão:

$$E_m = S_b \times \left( 1 + \frac{2,5}{N} \times \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^N \tag{2-48}$$

sendo:

$$N = 0,83 \times \log \frac{4 \times 10^4}{S_b} \tag{2-49}$$

$C_v$  – concentração volumétrica de agregados, que pode ser calculada por:

$$C_v = \frac{va}{va + TVB} \text{ para uma porosidade de 3\%;}$$

$$C'_v = \frac{C_v}{1 + \frac{n-3}{100}} \text{ para qualquer valor de porosidade (expressão corrigida por Fijn van}$$

Draat e Sommer);

$E_m$  – módulo de deformabilidade em MPa;

$S_b$  – rigidez do betume em Mpa;

$n$  – porosidade em percentagem;

$va$  – percentagem volumétrica de agregados;

*TVB* – percentagem volumétrica de betume.

### 2.4.3.5 Método de Francken

As expressões sugeridas por este método têm por base resultados experimentais alcançados por ensaio de provetes trapezoidais de misturas betuminosas com diferentes formulações, compactados estaticamente e sobre o efeito de cargas sinusoidais.

A expressão de cálculo do módulo de deformabilidade é a seguinte:

$$E_m(T, f) = E_\infty(va, TVB) \times R^*(T, f) \quad (2-50)$$

sendo:

$E_\infty$  – valor máximo da rigidez da mistura betuminosa em MPa obtido pela equação (2-51):

$$E_\infty(va, TVB) = 3,56 \times 10^4 \times \frac{TVB + n_b}{TVB} \times e^{(-0,1n_b)} \quad (2-51)$$

$E_m$  – módulo de deformabilidade em MPa;

$n_b$  – parâmetro de Boyce, que de acordo com Baptista (1999) normalmente toma valores entre 0,30 e 0,60;

$R^*$  – módulo reduzido cujo valor se encontra no intervalo de 0 a 1 e cujo cálculo socorre-se da equação (2-52):

$$\log R^* = \log \frac{G^*}{G_\infty} - 1,351 \times e^{-0,13 \frac{va}{n}} \times \log \frac{G^*}{G_\infty} \times \left( 1 + 0,11 \times \log \frac{G^*}{G_\infty} \right) \quad (2-52)$$

O módulo reduzido é uma variável relacionada com a consistência do betume para determinadas condições de temperatura, frequência e razão  $\frac{va}{TVB}$ . A equação (2-52) é válida apenas nas seguintes condições:

- $n$  deve estar compreendido entre 1,5% e 32%;
- $\frac{va}{TVB}$  deve estar compreendido entre 3 e 12;
- $G_\infty$  igual a 1000 MPa;
- $Sb$  deve ter valores entre 0,3 MPa e 3000 MPa;
- O módulo de distorção complexo  $G^*$  deve ser calculado de acordo com a equação (2-53):

$$G^* = \frac{Sb}{2 \times (1 + \nu)} \quad (2-53)$$

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS

Em alternativa a esta equação, pode-se implementar o ábaco apresentado na Figura 2-10 para conseguir o mesmo objectivo.

$$(R^*) = |S_m^*| / E_\infty$$

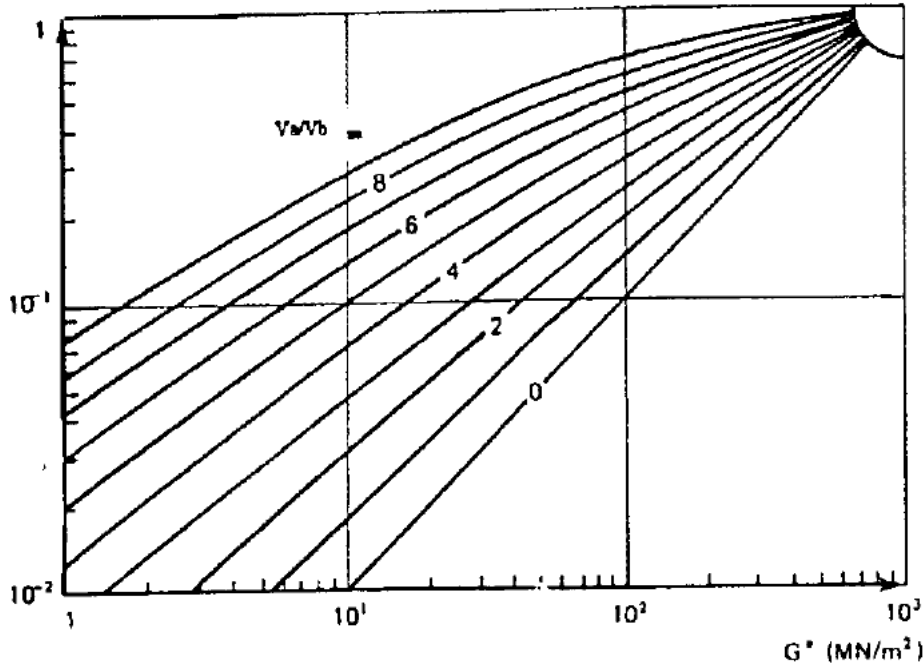


Figura 2-10: Relação entre o módulo de distorção e o módulo reduzido (Francken, 1977)

Caso o módulo de distorção não seja conhecido, o módulo reduzido pode ser obtido de acordo com o conjunto de expressões seguintes:

$$R^*(X) = \begin{cases} R_{pen}^* \times \exp \left[ \frac{H}{0,4343} (X + 1,672) \right] & \text{para } X < X_L \\ 0,4343 \frac{P}{H} + P(X - X_L) & \text{para } X_L < X < X_S \\ 1 - 0,25 \times \exp \left[ -\frac{P(X - X_S)}{0,25} \right] & \text{para } X > X_S \end{cases} \quad (2-54)$$

sendo:

$X$  – logaritmo da frequência de referência;

$$X_L = \frac{1}{H} \log \frac{0,4343P}{HR_{pen}^*} - 1,672 \quad (2-55)$$

$$X_S = X_L - \frac{0,4343}{H} + \frac{0,75}{P} \quad (2-56)$$

$$R_{pen}^* = 6,55 \times pen25^{-1,313} \quad (2-57)$$

$$H = -9,27 \times 10^{-2} + 1,352 \times B' = 0,583 - 3 \times 10^{-4} \alpha^2 \quad (2-58)$$

$$P = 6,28 \times 10^{-2} + 0,219 \times B' = 0,0172 - 4,86 \times 10^{-5} \alpha^2 \quad (2-59)$$

$\alpha$  – teor de asfaltenes do betume;

$B'$  – susceptibilidade da penetração no tempo t dada por:

$$B' = \frac{\log pen_{25}}{\log t} \quad (2-60)$$

## 2.5 Resistência à fadiga

De acordo com os métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento de pavimentos, um dos critérios a verificar é a resistência do pavimento à fadiga. O critério de fadiga descreve uma situação de fendilhamento na zona traccionada das camadas ligadas do pavimento. Normalmente, a avaliação deste critério é feita de acordo com a extensão radial de tracção provocada pelas acções na base das camadas betuminosas. A Figura 2-11 ilustra esquematicamente a extensão mencionada.

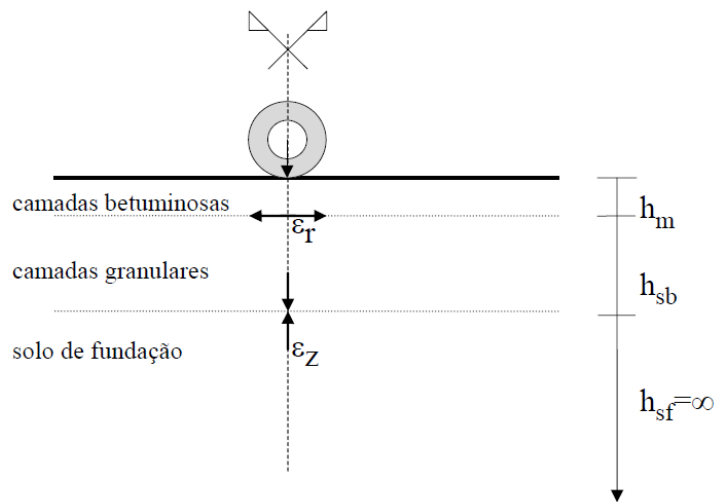


Figura 2-11: Extensões relevantes à verificação dos critérios de ruína (Baptista, 1999)

### **2.5.1 Avaliação experimental da resistência à fadiga**

Existem diversos ensaios que permitem a avaliação da resistência à fadiga. Os ensaios mais frequentemente usados neste contexto são os ensaios de flexão e de tracção/compressão definidos na Figura 2-5. Contrariamente, os ensaios de corte são utilizados com menor frequência.

Além destes ensaios é possível recorrer a ensaios de fractura que, resumidamente, consistem na aplicação de cargas cíclicas ao longo do tempo sobre provetes previamente fendilhados. A fenda desses provetes irá desenvolver-se levando, eventualmente, à rotura completa do provete.

Durante os ensaios de carga cíclica para avaliação da resistência à fadiga observa-se um gradual aumento dos danos dos provetes. Esta progressão de dano é normalmente dividida nas seguintes fases:

- Fase I que corresponde ao início do fendilhamento, observando-se o aparecimento de fendas do tipo “cabelo”;
- Fase II que corresponde à propagação do fendilhamento, observando-se um aumento do número de fendas e alargamento das mesmas;
- Fase III que corresponde à rotura do material.

Em ensaios de extensão controlada, a maior dificuldade é a definição do instante em que ocorre a rotura do provete. Normalmente considera-se que este instante é assinalado por uma determinada redução do módulo de deformabilidade da amostra. Em ensaios de força controlada a identificação do momento de rotura é mais acessível uma vez que usualmente observa-se a rotura completa dos provetes (atinge-se a Fase III). No entanto deve-se ter em conta que numa situação de dimensionamento de pavimentos o fim de vida deve ser considerado durante a Fase II.

Outra complicação será o cálculo do módulo de deformabilidade inicial das amostras que pode ser influenciado pelas variações iniciais de amplitude da carga características dos equipamentos utilizados. Este problema pode ser resolvido através da aplicação de um pequeno número de carregamentos antes da medição do módulo de deformabilidade inicial.

## 2.5.2 Leis de previsão da resistência à fadiga

### 2.5.2.1 Método da Universidade de Nottingham

Neste método consideram-se duas tipologias de estado limite do pavimento: o estado de ruína que corresponde a rodeiras de 20 mm de profundidade ou fendilhamento generalizado no rasto das rodas (para condições inglesas) e o estado crítico correspondente a rodeiras de 10 mm de profundidade ou fendilhamento ramificado no rasto das rodas. A possibilidade de escolha entre o estado de ruína ou o estado crítico para o dimensionamento permite um maior controlo sobre a probabilidade que o pavimento terá de desempenhar a sua função até ao fim da sua vida útil sem necessidade de reforço. Além disso, considera-se que uma vez atingido o estado de ruína o pavimento deixa de ser recuperável. Contrariamente, o estado crítico corresponde à última oportunidade de recuperação do pavimento (Branco et al., 2008).

O critério de fadiga é verificado de acordo com a equação (2-61):

$$\log \varepsilon_t = \frac{14,38 \log TVB + 24,2 \log Tab - c - \log N_{80}}{5,13 \log TVB + 8,63 \log Tab - 15,8} \quad (2-61)$$

sendo:

- $\varepsilon_t$  – extensão de tracção em micro unidades ( $\times 10^{-6}$ );
- $N_{80}$  – número de eixos padrão de 80 kN em milhões ( $\times 10^6$ );
- $TVB$  – percentagem volumétrica de betume;
- $Tab$  – temperatura de amolecimento de anel e bola ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $c$  – constante igual a 46,82 para o estado crítico e 46,06 para o estado de ruína.

Uma vez que esta expressão foi desenvolvida para o contexto laboratorial é necessário aplicar factores correctivos de modo a que esta seja válida no contexto de projecto. Os factores a aplicar são relativos a:

- Períodos de repouso entre carregamentos: 20 para ambos os estados (de ruína e crítico);
- Tempo real de propagação da fissuração através das camadas betuminosas: 20 para o estado de ruína e 3,5 para o estado crítico;
- Distribuição lateral dos rodados: 1,1 para ambos os estados;

Assim, o valor de  $N_{80}$  obtido pela equação (2-61) deve ser multiplicado por 440 ou 77 para o estado crítico e estado de ruína, respectivamente.

### 2.5.2.2 Método da SHELL

Contrariamente ao método da Universidade de Nottingham, este método não considera dois tipos de estado limite do pavimento. A equação (2-62) é o meio através do qual se quantifica o critério de fadiga.

$$\varepsilon_t = \frac{0,856 \times TVB + 1,08}{E_m^{0,36} \times N_{80}^{0,2}} \quad (2-62)$$

sendo:

$\varepsilon_t$  – extensão de tracção adimensional;

$N_{80}$  – número de eixos padrão de 80 kN;

$v_b$  – percentagem volumétrica de betume;

$E_m$  – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa em Pa.

A vida útil obtida a partir desta equação deve ser corrigida por diversos factores. Os factores a aplicar são relativos a:

- Repouso entre carregamentos e o tempo de recuperação da deformação: 10 (para misturas densas com grande teor em betume) a 1,25 (para misturas abertas e baixo teor em betume). Normalmente considera-se uma situação intermédia (factor igual a 5);
- Distribuição lateral dos rodados: factor igual a 2,5;
- Gradiente de temperatura na espessura total das camadas: 0,5 para temperaturas elevadas e/ou camadas de betão betuminoso espessas.

## 2.6 Resistência à deformação permanente

A resistência à deformação permanente é o segundo critério utilizado no dimensionamento de pavimentos através de métodos empírico-mecanicistas. Este critério descreve uma situação de assentamento excessivo à superfície do pavimento. A avaliação deste critério recorre à extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (que se encontra representada esquematicamente na Figura 2-11).

### 2.6.1 Avaliação experimental da resistência à deformação permanente

De acordo com Sousa (1993) para simular correctamente o processo de formação de rodeiras é necessário ter em conta dois fenómenos: a densificação e a deformação por corte a volume constante. Assim, os ensaios utilizados devem simular simultaneamente variações volumétricas e deformações por corte ou, alternativamente, devem-se usar ensaios em que a variação volumétrica seja mínima e o corte seja máximo.

## 2. Características fundamentais das misturas betuminosas

De acordo com Capitão (2003), os ensaios que cumprem as condições descritas são os seguintes:

- Ensaio de compressão;
- Ensaio de corte simples;
- Ensaio de tracção indirecta;
- Ensaio de compressão e corte;
- Ensaio com simulador de tráfego.

Na Figura 2-12 apresentam-se esquematicamente os vários tipos de ensaios e as formas mais comuns de provetes utilizados:

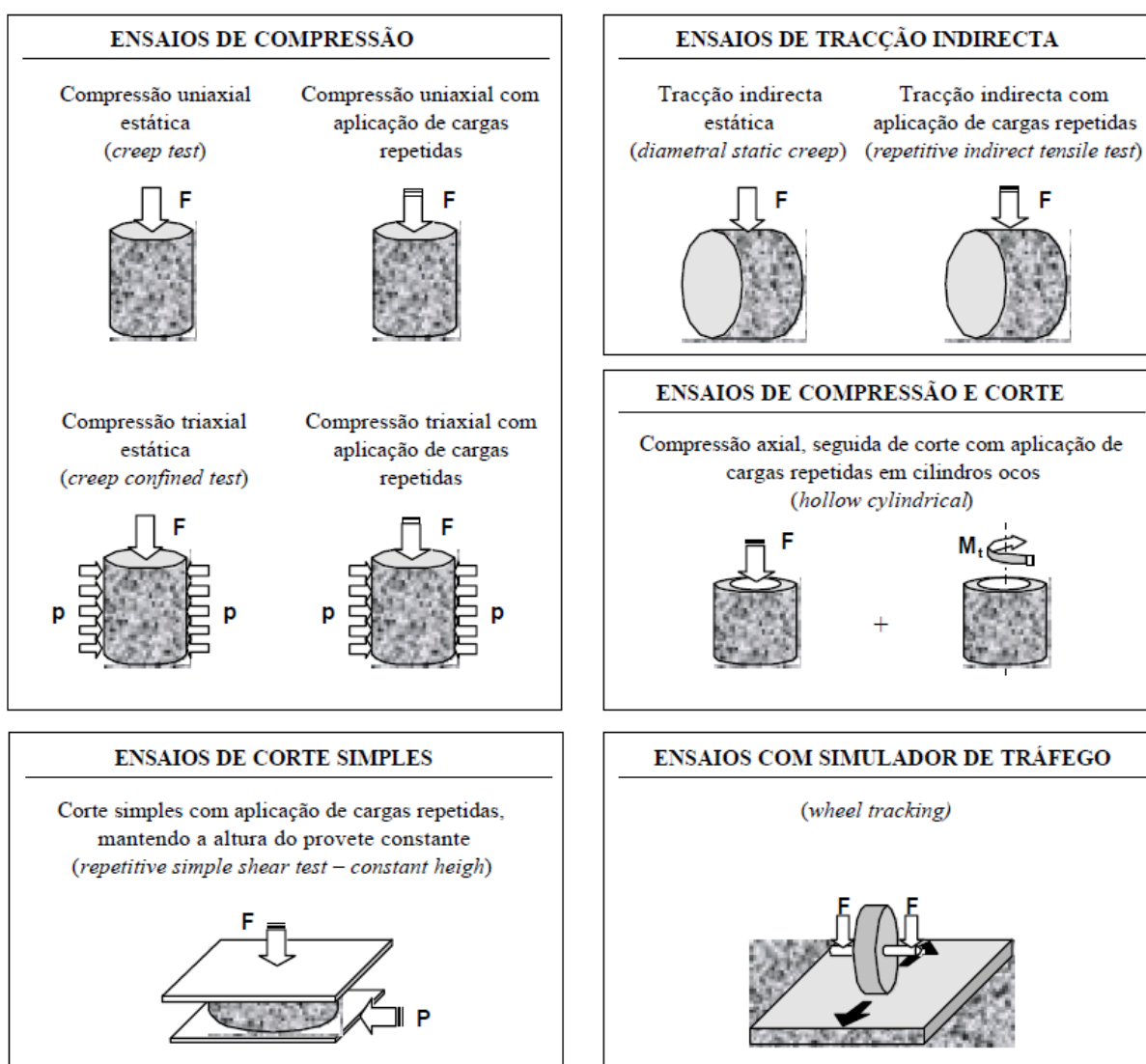


Figura 2-12: Ensaio laboratoriais para a determinação da resistência à deformação permanente (adaptado de Capitão, 2003)

## 2.6.2 Leis de previsão da resistência à deformação permanente

### 2.6.2.1 Método da Universidade de Nottingham

Tal como na lei de previsão da resistência à fadiga proposta por este método, consideram-se as duas hipóteses de estado crítico e estado de ruína. O critério de deformação permanente é verificado de acordo com a equação (2-63):

$$\varepsilon_{dp} = \frac{A}{\left(\frac{N_{80}}{fr}\right)^{c1}} \quad (2-63)$$

Sendo:

$\varepsilon_{dp}$  – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação em micro unidades ( $\times 10^{-6}$ );

$N_{80}$  – número de eixos padrão de 80 kN em milhões ( $\times 10^6$ );

$fr$  – factor de indução de assentamento dependente do tipo de mistura betuminosa (em Portugal utiliza-se 1,5 para macadames betuminosos, 1,3 para misturas betuminosas densas para camada de regularização e 1,0 para betão betuminoso para camada de desgaste);

$A$  – constante igual a 250 ou 451,29 para o estado crítico ou estado de ruína, respectivamente;

$c1$  – constante igual a 0,27 ou 0,28 para o estado crítico ou estado de ruína, respectivamente.

### 2.6.2.2 Método da SHELL

O critério de deformação permanente pode ser quantificado de acordo com a equação (2-64):

$$\varepsilon_{dp} = \frac{k_s}{N_{80}^{0,25}} \quad (2-64)$$

Sendo:

$\varepsilon_{dp}$  – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional);

$N_{80}$  – número de eixos padrão de 80 kN;

$k_s$  – constante igual a:

- $2,8 \times 10^{-2}$  para uma probabilidade de sobrevivência de 50%;
- $2,1 \times 10^{-2}$  para uma probabilidade de sobrevivência de 85%;
- $1,8 \times 10^{-2}$  para uma probabilidade de sobrevivência de 95%.

## 3. Conservação e reabilitação de pavimentos

### 3.1 Introdução

Ao longo do seu tempo de vida útil os pavimentos rodoviários são sujeitos a diversas acções que os danificam. Por este motivo, é necessário avaliar periodicamente o estado de conservação dos pavimentos e, dependendo dos resultados, conduzir obras de reabilitação ou conservação do pavimento. A Figura 3-1 representa genericamente a evolução do indicador do estado de desempenho de pavimentos ao longo do tempo e o impacto de obras de reabilitação e conservação.

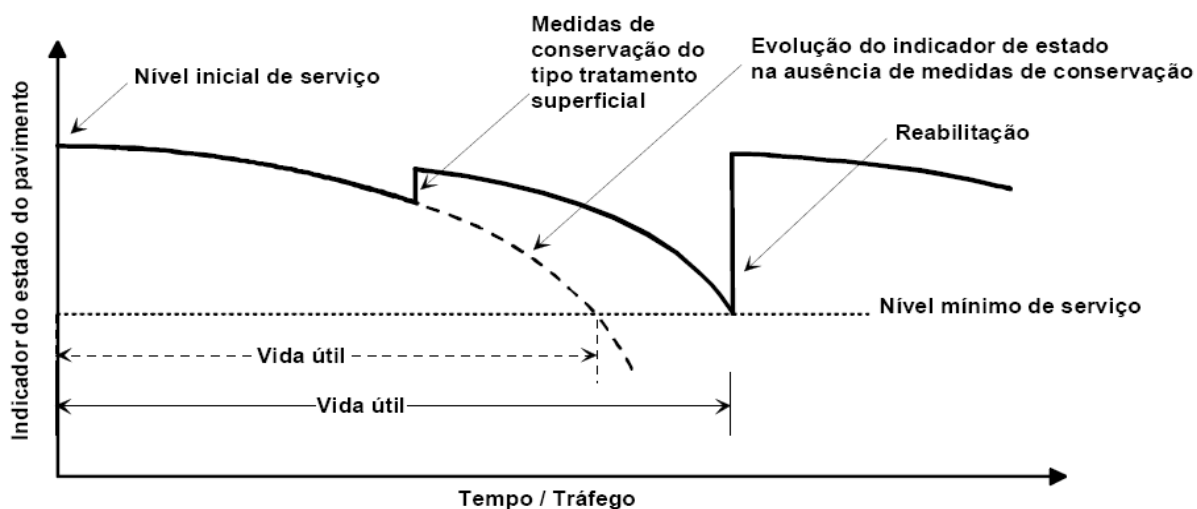


Figura 3-1: Evolução do nível de serviço de pavimentos ao longo do tempo (Batista, 2004)

# REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Neste capítulo são analisados dois métodos de dimensionamento de camadas de reforço em pavimentos flexíveis: o procedimento baseado nas deflexões reversíveis (utilizado com maior frequência) e o procedimento baseado nas espessuras efectivas.

## 3.2 Procedimento baseado nas deflexões reversíveis

O organograma da Figura 3-2 descreve a metodologia a seguir para desenvolver todo o processo de análise do estado de conservação e reabilitação do pavimento.

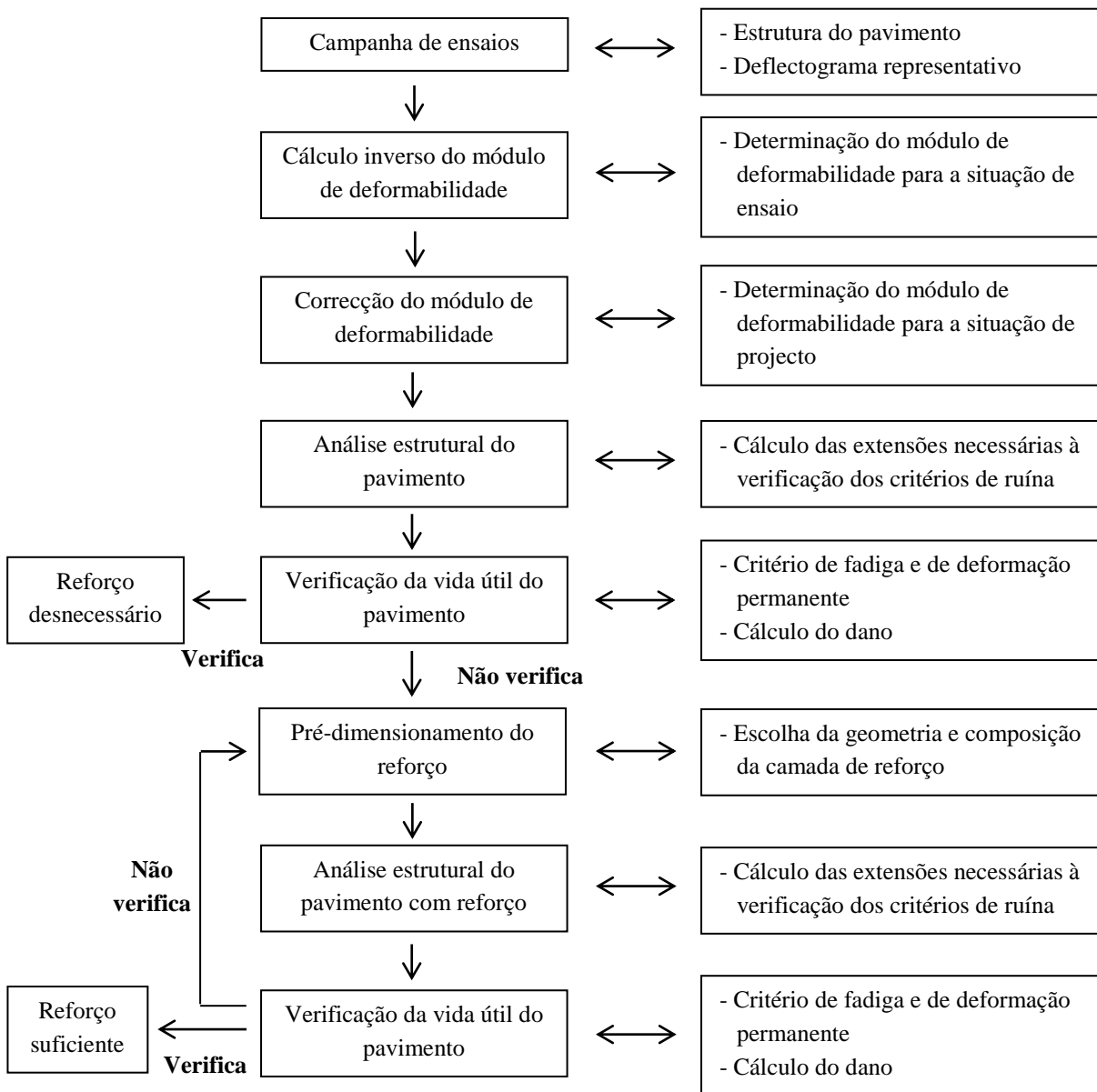


Figura 3-2: Metodologia de análise do estado de conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis

Cada um dos passos desta metodologia é descrito com mais detalhe nos subcapítulos seguintes.

#### 3.2.1 Campanha de ensaios

A campanha de ensaios tem dois objectivos. O primeiro é a caracterização da estrutura do pavimento existente, a qual pode ser conseguida através da execução de sondagens à rotação em locais representativos de cada trecho do pavimento. O segundo objectivo é a obtenção de resultados de ensaios de avaliação estrutural, normalmente com deflectómetro de impacto que, posteriormente, vão permitir a avaliação das propriedades mecânicas do pavimento.

O deflectómetro de impacto é um instrumento que permite a medição da deformação provocada pelo impacto de uma carga num pavimento em diversos pontos. Este tipo de equipamento é adequado para a simulação da acção induzida pela passagem de veículos a uma velocidade entre 60 e 80 km/h (Branco et al., 2008).

O engenho consiste num atrelado equipado com um sistema de geração de carga como apresentado na Figura 3-3 e dispositivos de medição de deflexões (geofones ou transdutores de deslocamento).



Figura 3-3: Deflectómetro de impacto do LNEC (Antunes, 2008)

A aquisição de dados e controlo do sistema é efectuado por equipamentos informáticos e electrónicos que se encontram no veículo rebocador.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

O ensaio em si é descrito nas normas ASTM D 4694-96 e EN 13036-1 e consiste nos seguintes passos:

- Posicionamento do veículo no ponto a ensaiar. Os ensaios devem ser efectuados nos pontos mais desfavoráveis do pavimento. Estes pontos normalmente correspondem ao alinhamento das rodéiras externas de cada sentido de circulação de trânsito, uma vez que nestes alinhamentos há uma grande proximidade à descontinuidade longitudinal entre o pavimento e a berma não pavimentada;
- Colocação da placa de ensaio (cujo diâmetro pode variar entre 300 e 450 mm) no pavimento. É boa prática a execução de um primeiro impacto sobre a placa de ensaio cujo objectivo é garantir o ajuste da placa à superfície do pavimento;
- Elevação da massa. Esta elevação é dependente da carga de impacto pretendida, sendo esta regulada pelo utilizador mediante um sistema hidráulico que faz parte do sistema. Só é possível a aplicação de cargas entre aproximadamente 30 kN e 250 kN, dependendo estes limites do aparelho utilizado;
- Colocação dos geofones ou transdutores de deslocamentos. Estes dispositivos devem ter uma precisão de medição de deflexões entre 1  $\mu\text{m}$  e 2200  $\mu\text{m}$  (MASTRAD, 2008). O número de sensores utilizados pode variar entre 7 e 9. O primeiro sensor deve ser colocado no ponto de aplicação da carga e os restantes colocados a distâncias pré-definidas ao longo do eixo de simetria do veículo, não excedendo os 2,5 m de distância ao ponto de impacto. A Figura 3-4 demonstra uma possível configuração do equipamento. Nesta figura, os transdutores encontram-se a distâncias do ponto de impacto de: 0 m; 0,30 m; 0,45 m; 0,6 m; 0,9 m; 1,2 m; 1,5 m; 1,8 m e 2,1 m.
- Impacto da massa no pavimento;
- Interpretação do deflectograma obtido.

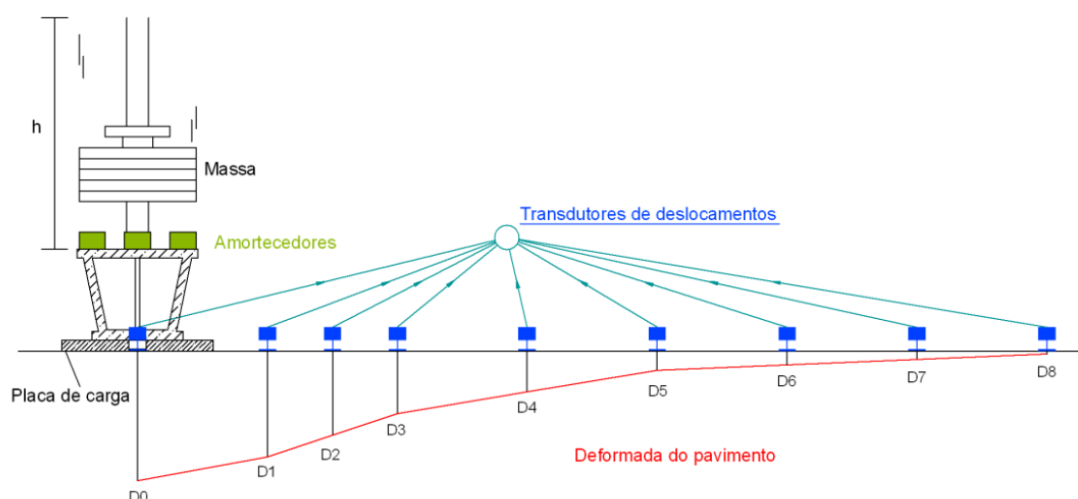


Figura 3-4: Esquema de um ensaio de carga com deflectómetro de impacto e respectivo deflectograma (Antunes, 2008)

Durante o ensaio o equipamento regista a temperatura da superfície do pavimento, para que seja possível proceder posteriormente à correcção do módulo de deformabilidade.

Os deflectogramas típicos obtidos a partir deste ensaio variam com o tipo de pavimento em análise e com a estação do ano em que foi realizado o ensaio em si. De facto, num pavimento em que as camadas betuminosas têm uma influência predominante no comportamento estrutural (espessura elevada de camadas betuminosas) os deflectogramas de Verão e Inverno são semelhantes aos apresentados na Figura 3-5:

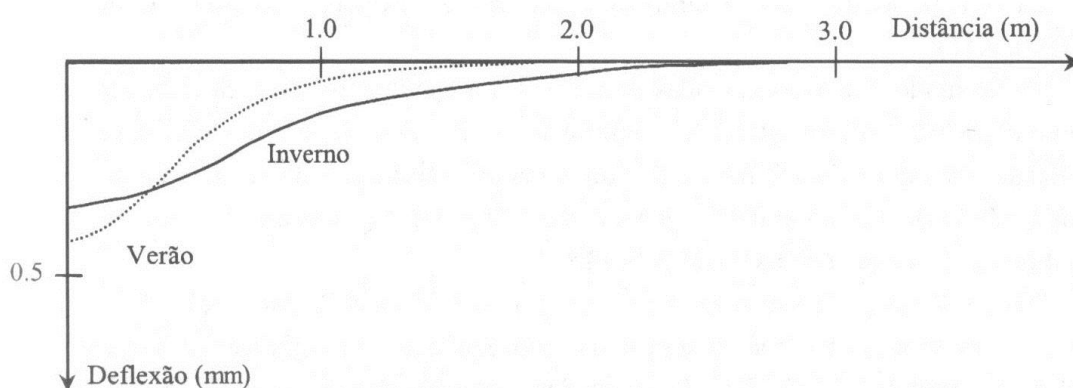


Figura 3-5: Deflectograma típico em pavimentos de elevada espessura betuminosa (Branco et al., 2008)

Na situação oposta, em que o comportamento estrutural do pavimento é definido predominantemente pelas camadas granulares (espessura elevada de camadas granulares) os deflectogramas de Verão e Inverno típicos são representados na Figura 3-6.

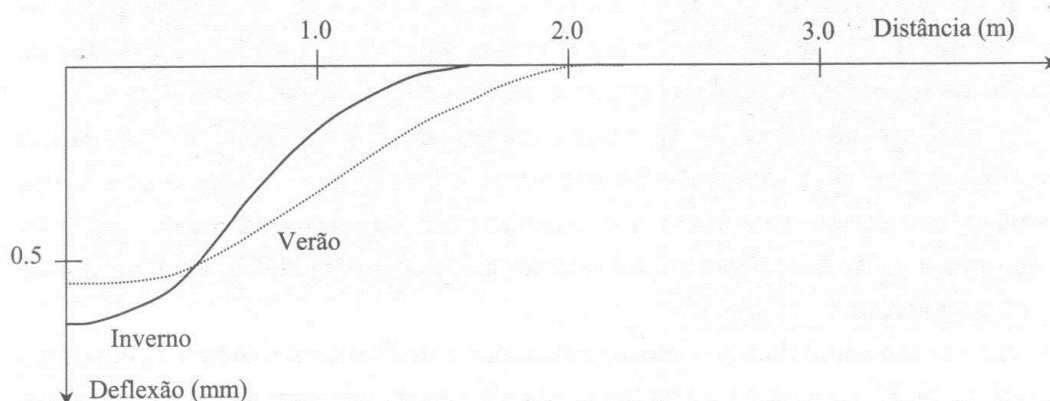


Figura 3-6: Deflectograma típico em pavimentos de elevada espessura granular (Branco et al., 2008)

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Como se pode observar, em pavimentos de espessura betuminosa elevada há uma menor área de bacia de deflexão e uma maior deflexão máxima na situação de Verão, o que implica que a resistência do pavimento é menor durante esta estação. Esta perda de resistência é provocada pelas altas temperaturas que se verificam durante o Verão, diminuindo a rigidez das camadas betuminosas. Por outro lado, em pavimentos de elevada espessura granular a situação de menor resistência corresponde à estação de Inverno. Esta situação é justificada pelo aumento do teor de água que se verifica durante esta estação nas camadas não ligadas do pavimento (camadas granulares e solo de fundação), diminuindo significativamente a resistência das mesmas.

Após a realização dos ensaios de deflectómetro de impacto é necessário proceder à normalização das deflexões obtidas. A normalização consiste numa correcção necessária devido à possível desigualdade entre a força de impacto desejada e a força de impacto medida durante o ensaio. A equação (3-1) traduz o método de normalização das deflexões:

$$D_n = F_n \times \frac{D_m}{F_m} \quad (3-1)$$

sendo:

- $D_n$  – deflexão normalizada;
- $D_m$  – deflexão medida;
- $F_n$  – força de impacto nominal;
- $F_m$  – força de impacto medida.

Como se pode observar, a equação (3-1) traduz-se na adopção de uma relação de proporcionalidade directa entre forças de impacto e deflexões. Por análise dos deflectogramas obtidos de um conjunto de ensaios, procede-se à divisão do pavimento em análise em diversas zonas com características estruturais semelhantes, que são alvo de diferentes medidas de conservação ou reabilitação. A existência de diferenças de propriedades estruturais em diferentes zonas de um pavimento é previsível pelos seguintes motivos (Batista, 2009):

- Condições de fundação;
- Data de construção do pavimento;
- Materiais utilizados na sua construção;
- Intervenções durante o funcionamento do pavimento (como por exemplo a execução de obras de reabilitação);
- Acção do tráfego;
- Condições de drenagem.

Este processo designa-se por zonamento e é executado de acordo com o método das diferenças acumuladas proposto pela AASHTO (2001). O método das diferenças acumuladas é exemplificado na Figura 3-7.

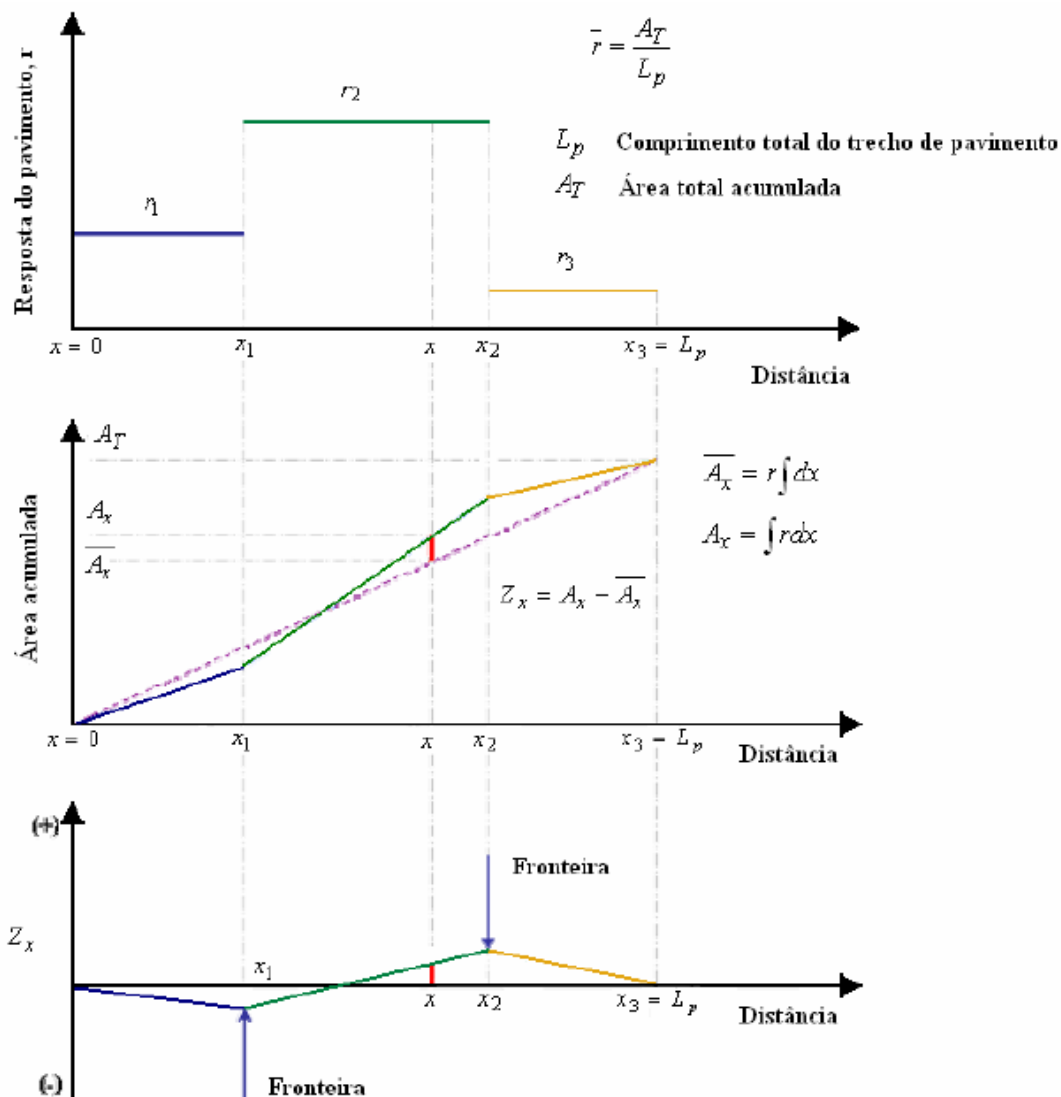


Figura 3-7: Método das diferenças acumuladas (AASHTO, 2001)

Como se pode observar, o algoritmo deste método é o seguinte:

- Cálculo do valor médio das deflexões (resposta do pavimento) para todo o trecho. Este passo é realizado dividindo a área total acumulada sob o gráfico das deflexões ao longo da distância pelo comprimento total do trecho do pavimento;
- Cálculo da diferença entre cada valor individual e o valor médio. Este passo é exemplificado no segundo gráfico da Figura 3-7. A tracejado foi representada a área  $\bar{A}_x$  que corresponde ao valor médio das deflexões obtido no passo anterior. A traço contínuo representa-se a área  $A_x$  que representa a área sob o gráfico das deflexões ao longo da distância. Expõe-se ainda a diferença desejada para um ponto genérico  $x$ . Este cálculo recorre à equação (3-2):

$$Z_x = A_x - \bar{A}_x \quad (3-2)$$

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

- Representação gráfica da variação dos valores acumulados das diferenças ao longo do troço do pavimento. Esta representação é exemplificada no terceiro gráfico da Figura 3-7. Como se observa neste gráfico, os valores mínimos e máximos da função indicam a posição das fronteiras a considerar na delimitação das várias zonas.

Uma vez estabelecidas as várias zonas e obtidos os deflectogramas normalizados é necessário determinar o deflectograma correspondente ao percentil 85. Para isso recorre-se habitualmente à equação (3-3):

$$P_{85} = \bar{D} + 1,04 \times \sigma_D \quad (3-3)$$

Sendo:

$P_{85}$  – percentil 85;

$\bar{D}$  – deflexão média em cada zona;

$\sigma_D$  – desvio padrão em cada zona.

Este percentil permite encontrar as deflexões para as quais existe um grau de confiança de 85%, ou seja, as deflexões que são excedidas apenas em 15% dos casos. A partir do percentil 85 é possível encontrar o deflectograma representativo de cada zona do pavimento. O deflectograma representativo será a deformada normalizada mais próxima do percentil 85 pelo lado da segurança. Conhecido o deflectograma representativo torna-se finalmente possível o cálculo inverso do módulo de deformabilidade das várias camadas. A principal dificuldade deste procedimento é a incerteza do grau de correspondência entre os deflectogramas obtidos para os locais ensaiados e o comportamento do pavimento no geral.

### 3.2.2 Cálculo inverso do módulo de deformabilidade

O cálculo inverso do módulo de deformabilidade é um processo iterativo através do qual se podem estimar os módulos de deformabilidade de cada camada do pavimento a partir do deflectograma representativo da zona em análise e da estrutura do pavimento em si.

O processo pode ser resumido nos seguintes passos:

- Estimativa inicial dos módulos de deformabilidade com base na experiência;
- Análise estrutural do pavimento em questão com recurso a *software* adequado (como por exemplo o ELSYM5). Todas as condições introduzidas no programa deverão assemelhar-se às condições do ensaio de deflectómetro de impacto a partir do qual foi obtido o deflectograma representativo. Os módulos de deformabilidade das camadas devem ser os estimados no passo anterior. É usual nesta simulação subdividir o solo de fundação em duas camadas: uma camada superior mais deformável com uma determinada espessura  $h$  e uma camada inferior de espessura semi-infinita mais rígida. Baptista (2006) e Batista (2009) sugerem espessuras  $h$  de 2 m e 2,5 m,

respectivamente. Baptista (2006) sugere ainda o uso de um módulo de deformabilidade igual a 1000 MPa na camada semi-infinita. A Figura 3-8 representa genericamente o esquema da estrutura de pavimento descrita.

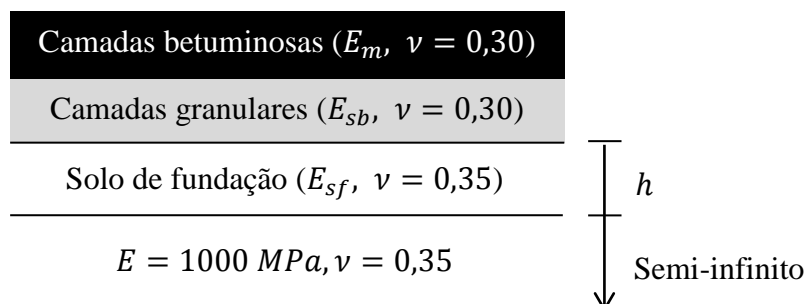


Figura 3-8: Representação esquemática da estrutura de pavimento a utilizar para o cálculo inverso do módulo de deformabilidade

Esta subdivisão do solo de fundação permite uma simulação mais fiel à realidade, uma vez que é bastante provável a existência de solos com melhores características de deformabilidade ou camadas de rocha com maior resistência a partir de uma determinada profundidade (Batista, 2009). Mesmo nas situações em que as características do solo não melhorem com a profundidade haverá sempre uma maior tensão de confinamento nas camadas inferiores devido ao peso próprio do solo em si, justificando assim esta modelação. Além disso, esta medida permite contrabalançar o erro de cálculo do módulo de deformabilidade intrínseco à utilização de um ensaio estático. O objectivo deste passo será obter as extensões nos pontos onde foram colocados os transdutores de deslocamentos durante o ensaio;

- Representação do deflectograma obtido no passo anterior e comparação com o deflectograma de ensaio. Se os deflectogramas coincidirem significa que os módulos de deformabilidade estimados são próximos dos valores reais e, portanto, o processo foi concluído. Se os deflectogramas forem bastante distintos é necessário repetir todo o processo com uma nova estimativa dos módulos de deformabilidade. Como é evidente, um aumento dos módulos provocará uma diminuição das deformações obtidas e uma diminuição dos módulos terá o efeito contrário. Alterar o módulo de deformabilidade das camadas betuminosas influencia principalmente a deflexão máxima e as deflexões até à zona central do deflectograma. A alteração do módulo do solo de fundação influencia todo o deflectograma, com ênfase na zona mais afastada do ponto de aplicação da carga;

### 3.2.3 Correção do módulo de deformabilidade

O módulo obtido no cálculo inverso é o correspondente à temperatura de ensaio. No entanto, o processo de análise do estado de conservação do pavimento e o dimensionamento de camadas de reforço é executado tendo em conta uma temperatura de serviço ou de projecto. Torna-se assim evidente a necessidade de proceder à correcção do módulo de deformabilidade obtido por cálculo inverso de modo a obter um módulo correspondente à situação de serviço. O Capítulo 4 aborda os diversos métodos de correcção existentes bem como o desenvolvimento de novos métodos. Seguidamente analisam-se os conceitos de temperatura de ensaio e de temperatura de serviço.

#### 3.2.3.1 Temperatura de ensaio

Para que seja possível a correcção do módulo de deformabilidade é necessário conhecer a temperatura do pavimento no instante em que são executados os ensaios.

A temperatura importante para o cálculo não é a temperatura da superfície do pavimento mas sim uma temperatura em profundidade. Esta temperatura deve ser representativa do conjunto de temperaturas que se verificam nas diversas camadas betuminosas. Normalmente considera-se que o valor da temperatura a meio da espessura das camadas betuminosas cumpre este critério.

Esta temperatura pode ser obtida directamente durante o ensaio (por medição) ou estimada numericamente a partir da espessura das camadas betuminosas, da temperatura à superfície do pavimento e da temperatura do ar.

Para o cálculo da temperatura de ensaio, podem ser implementados os modelos BELLS2 e BELLS3. O método BELLS2 é calibrado para protocolos de teste do desempenho a longo prazo de pavimentos. Por outro lado, o método BELLS3 é calibrado para métodos de teste rotineiros. O procedimento de cálculo é descrito em FHWA (2008) e baseia-se no uso das equações (3-4) e (3-5), para os métodos BELLS2 e BELLS3, respectivamente:

$$\begin{aligned} Td = & 2,78 + 0,912 \times IR + (\log d - 1,25) \times \\ & \times (-0,428 \times IR + 0,553 \times (1 - day) + 2,63 \times \sin(hr_{18} - 15,5)) + \\ & + 0,027 \times IR \times \sin(hr_{18} - 13,5) \end{aligned} \quad (3-4)$$

$$\begin{aligned} Td = & 0,95 + 0,892 \times IR + (\log d - 1,25) \times \\ & \times (-0,45 \times IR + 0,62 \times (1 - day) + 1,83 \times \sin(hr_{18} - 15,5)) + \\ & + 0,042 \times IR \times \sin(hr_{18} - 13,5) \end{aligned} \quad (3-5)$$

sendo:

$Td$  – temperatura do pavimento à profundidade  $d$  em °C;

$IR$  – temperatura da superfície do pavimento medida por infra-vermelhos em °C. É importante proceder à correcção da temperatura encontrada neste tipo de ensaio, uma vez que os resultados dependem das condições meteorológicas. O Quadro 3-1 indica as correcções a aplicar de acordo com a nebulosidade do céu:

Quadro 3-1: Correcção da temperatura IR de acordo com a nebulosidade (adaptado de Stubstad, 1998)

Condições de nebulosidade	Correcção da temperatura IR (°C)
Céu limpo	+4,0
Céu parcialmente nublado	+3,0
Céu nublado	+1,5

$d$  – profundidade a que se pretende calcular a temperatura em mm;

$1 - day$  – média de temperatura do ar no dia anterior ao ensaio em °C;

$\sin$  – função seno para um período de 18 horas;

$hr_{18}$  – hora do dia num sistema de 24 horas calculada com base num ciclo de 18 horas em que há variação de temperatura da camada betuminosa, como se indica na Figura 3-9.

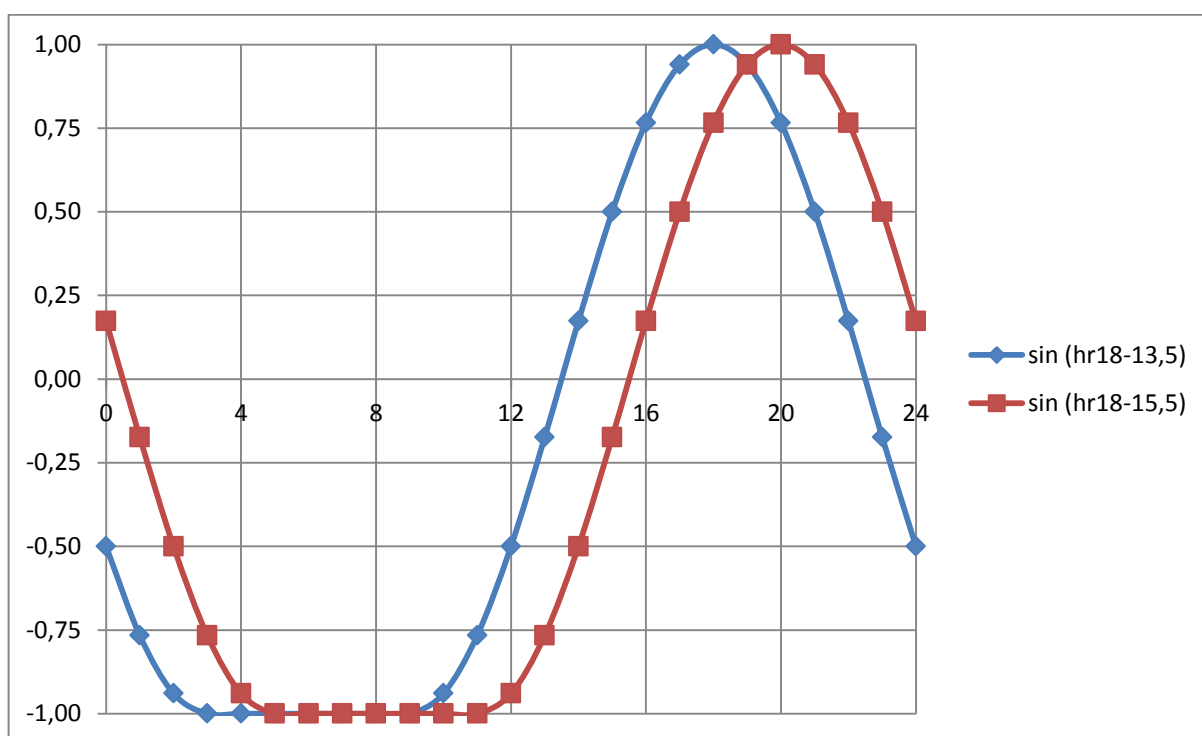


Figura 3-9: Funções seno com ciclo de 18 horas (adaptado de FHWA, 2008)

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Como se evidencia no gráfico, a curva relativa a  $\sin(hr_{18} - 15,5)$  só tem forma sinusoidal entre as 11:00 e as 05:00 horas do dia seguinte. Para valores entre as 05:00 e as 11:00 horas considera-se  $\sin(hr_{18} - 15,5) = -1$ . Se a hora utilizada pertencer ao intervalo das 00:00 às 05:00 horas é necessário adicionar 24 ao valor decimal de  $hr_{18}$ . Por outras palavras, transpõe-se este intervalo do gráfico para o final, dando origem a uma função contínua. A função  $\sin(hr_{18} - 13,5)$  deve ter um tratamento semelhante, embora os intervalos de tempo a considerar se alterem. Sendo assim, considera-se  $\sin(hr_{18} - 13,5) = -1$  para o intervalo das 03:00 às 09:00 horas e soma-se 24 a  $hr_{18}$  se este valor se encontra entre as 00:00 e as 03:00 horas. Para que o ciclo de ambas as funções corresponda a 18 horas, basta multiplicar o argumento do seno por  $2\pi/18$  (Batista, 2009).

### 3.2.3.2 Temperatura de serviço

A temperatura de serviço é a temperatura a que o pavimento está sujeito durante o seu funcionamento. Uma vez que esta temperatura é variável, para efeitos de dimensionamento normalmente considera-se uma temperatura de serviço equivalente anual que provoca efeitos na estrutura do pavimento equivalentes ao que seria previsto da acção do conjunto de temperaturas de serviço ao longo de um ano. Existem diversos métodos de cálculo desta temperatura equivalente.

Picado-Santos (1996) propõe dois processos: o método das temperaturas equivalentes (PTE) e o método do espectro de temperaturas no pavimento (PETP). Estes métodos são aplicados do seguinte modo:

- Para os meses de Verão (Abril a Outubro) quando as temperaturas são mais altas e, conseqüentemente, os pavimentos sofrem mais danos obtém-se as temperaturas médias mensais do ar relevantes a cada mês, obtém-se uma distribuição horária típica de temperaturas do ar, por mês e calcula-se a temperatura de serviço no pavimento a partir da temperatura do ar horária e da equação adequada;
- Para os meses de Inverno (Novembro a Março) obtém-se as temperaturas mensais do ar relevantes para cada mês e calcula-se a temperatura de serviço no pavimento a partir da temperatura do ar horária e da equação adequada.

A principal diferença entre os dois métodos é o facto do método das temperaturas equivalentes considerar uma temperatura equivalente e constante para todas as camadas, contrariamente ao método do espectro de temperaturas no pavimento permite o cálculo de temperaturas diferentes em profundidade. Além disso, o método de temperaturas equivalentes é influenciado pelo método de dimensionamento, critério de ruína e tipo de fundação utilizados, o que não acontece no método do espectro de temperaturas no pavimento.

Apresenta-se de seguida o processo proposto por Baptista et al. (2002). De acordo com este método, a temperatura de serviço equivalente pode ser obtida através de uma temperatura ponderada que depende da localização em Portugal Continental. Para isso utiliza-se a equação (3-6):

$$TE = A \times TPOND + B \quad (3-6)$$

sendo:

$TE$  – temperatura de serviço equivalente em °C;

$TPOND$  – temperatura ponderada do local em °C;

$A$  e  $B$  – parâmetros calibrados para as diversas classes de fundação e tipo de base (betuminosa ou granular).

Os valores de  $A$  e  $B$  podem ser consultados em anexo no Quadro A-1. As temperaturas ponderadas de cada local em Portugal foram obtidas de acordo com a seguinte expressão:

$$TPOND = \sum_{m=1}^7 TMXA_m \times CPOND_m \quad (3-7)$$

sendo:

$TMXA_m$  – temperatura média máxima mensal do mês  $m$  do local;

$CPOND_m$  – coeficiente de ponderação do mês  $m$ .

Os coeficientes de ponderação permitem ajustar a proporção de danos médios mensais por deformação permanente durante os diversos meses em análise. O Quadro A-2 apresenta as diferentes temperaturas ponderadas para vários locais em Portugal de acordo com o tipo de pavimento: pavimento flexível de base betuminosa (PFBB) ou pavimento flexível de base granular (PFBG).

### 3.2.4 Análise estrutural

Uma vez concluído o cálculo e correcção do módulo de deformabilidade é possível proceder à análise estrutural do pavimento em estudo. Para isso recorre-se mais uma vez a *software* adequado. Inicialmente, deve-se definir a estrutura do pavimento no programa. Note-se que, ao contrário do que é feito durante o cálculo inverso, tal como num pavimento novo, deve-se considerar uma única camada semi-infinita para a representação do solo de fundação. As cargas a que o pavimento deve ser sujeito na simulação do programa seguem a esquematização apresentada na Figura 3-10.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

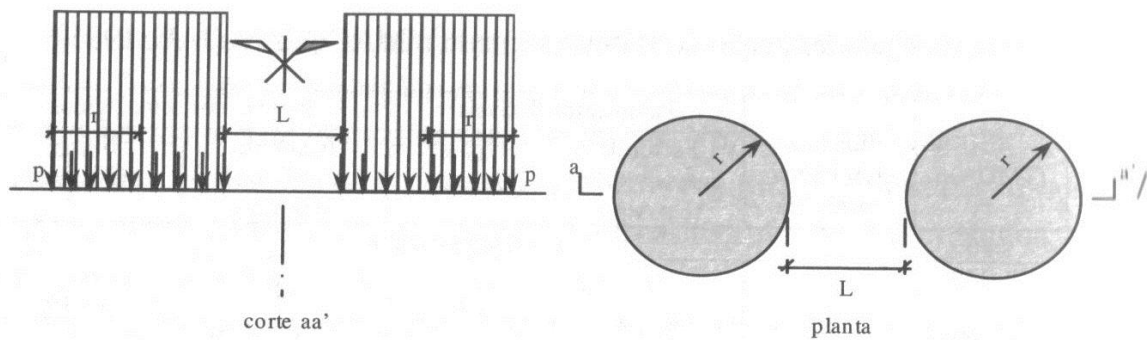


Figura 3-10: Esquemática da acção de um eixo padrão sobre um pavimento (Branco et al., 2008)

Como se pode observar, considera-se uma área de contacto circular de raio  $r$  entre cada roda e o pavimento. O afastamento entre as duas áreas das rodas gêmeas é designado pela letra  $L$ . Considera-se ainda uma pressão de contacto  $p$  igual à pressão de enchimento dos pneus.

Os valores de  $L$ ,  $p$  e  $r$  encontram-se discriminados no Quadro 3-2 em função do eixo padrão considerado e do método de dimensionamento que será aplicado na fase seguinte.

Quadro 3-2: Parâmetros  $L$ ,  $p$  e  $r$  para definição de acções

Método	Eixo padrão	Afastamento (mm)	Pressão de contacto (MPa)	Raio (mm)
SHELL	80 kN	105	0,6	105
Nottingham		150	0,5	113
	130 kN	125	0,662	125

Após a introdução das acções no programa deve ser calculada a extensão radial de tracção na base das camadas betuminosas e a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação. Normalmente estas extensões são calculadas em dois locais distintos: abaixo de uma das rodas e a meio das duas rodas, uma vez que as extensões máximas normalmente ocorrem num destes dois pontos. Calculadas as extensões, será então possível verificar se os critérios de ruína são cumpridos e determinar o tempo de vida útil restante do pavimento.

### 3.2.5 Verificação da vida útil do pavimento

Recorrendo às leis de previsão da resistência à fadiga e à deformação permanente descritas anteriormente e às extensões obtidas na análise estrutural do pavimento é possível determinar o número de eixos padrão que o pavimento tem capacidade de suportar. Este valor, pode ser interpretado como um indicador do tempo de vida útil do pavimento e será igual ao valor mínimo entre o  $N_{80}$  calculado pela lei de previsão da resistência à fadiga e o  $N_{80}$  calculado pela lei de previsão da resistência à deformação permanente.

Torna-se então possível calcular o dano do pavimento através da equação (3-8):

$$D = \frac{N_s}{N_a} \times 100 \quad (3-8)$$

Sendo:

$N_s$  – número de eixos padrão de 80 kN que solicitarão o pavimento durante o tempo de vida desejado;

$N_a$  – número de eixos padrão admissível de acordo com os dois critérios de ruína;

$D$  – dano em percentagem.

O dano do pavimento permite concluir a análise do estado de conservação do pavimento. Se o dano for menor que 100% o pavimento encontra-se em condições de cumprir a sua função sem necessidade de reforço. Caso contrário, haverá necessidade de aplicar camada de reforço.

### 3.2.6 Dimensionamento da camada de reforço

O processo de dimensionamento de camadas de reforço de acordo com o método das deflexões reversíveis é de tentativa e erro.

O primeiro passo será estabelecer as características da nova mistura betuminosa a utilizar na camada de reforço. De seguida calcula-se o módulo de deformabilidade desta mistura, recorrendo a expressões empíricas ou ábacos. A seguir é necessário arbitrar uma espessura para a nova camada.

O passo seguinte do procedimento é a análise estrutural do pavimento. Este processo é semelhante ao descrito anteriormente. No entanto, neste caso acrescenta-se a camada de reforço arbitrada à estrutura do pavimento. Além disso, é necessário calcular-se uma nova extensão radial de tracção na base da camada de reforço colocada (ver Figura 3-11).

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

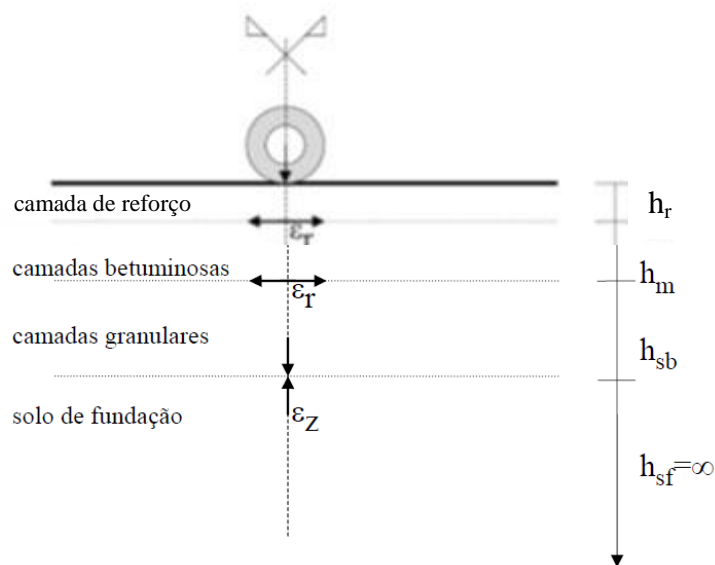


Figura 3-11: Extensões a calcular durante a análise estrutural do pavimento

De seguida é necessário verificar os critérios de ruína. Note-se que o aparecimento da nova extensão radial na base da camada de reforço terá como consequência a necessidade de uma verificação adicional da resistência à fadiga neste local.

Finalmente torna-se possível o cálculo do dano do pavimento. Caso o dano continue a exceder os 100% é necessário repetir o processo de dimensionamento da camada de reforço, arbitrando uma nova espessura ou uma mistura de características diferentes. O processo repete-se até que o dano seja inferior a 100%. Refira-se novamente que um dano inferior a 80% pode ser indicativo de um sobredimensionamento, e portanto, a solução considerada pode não ser a melhor opção a nível económico.

### 3.3 Procedimento baseado nas espessuras efectivas

Neste processo considera-se que os danos sofridos pelo pavimento ao longo do seu tempo de vida útil podem ser equiparados a uma diminuição da sua espessura. Assim, para efeitos do dimensionamento do reforço do pavimento, a espessura a considerar para o pavimento existente não será a real mas sim uma espessura efectiva que representa a sua capacidade resistente reduzida. Este procedimento pode dividir-se nas seguintes fases:

- Determinação das características de resistência do solo de fundação;
- Determinação da espessura e composição de cada camada de pavimento;
- Cálculo do tráfego solicitante e da espessura efectiva;
- Cálculo da espessura da vida útil restante ou da espessura da camada de reforço.

### 3. Conservação e reabilitação de pavimentos

A estrutura do pavimento pode ser determinada por execução de sondagens à rotação em locais representativos de cada subtrecho do pavimento.

A espessura efectiva das diversas camadas é obtida através da aplicação de um factor de conversão à espessura real das camadas. Posteriormente é possível obter a espessura efectiva total do pavimento através do somatório das espessuras efectivas das camadas. A espessura efectiva total será referente a uma espessura de betão betuminoso. Assim, todas as camadas são representadas por uma única camada equivalente. Os factores de conversão são definidos no Quadro 3-3 de acordo com os materiais que constituem as camadas.

Quadro 3-3: Factores de conversão C (adaptado de AI, 1983)

Tipo	Descrição do material	Factor de conversão C
I	Leito do pavimento qualquer que seja.	0,0
II	Base ou sub-base granulares britadas de granulometria extensa e CBR>20. (C=0,1 se IP>6).	0,1-0,2
III	Base ou sub-base de solos com IP<10 e estabilizados com cal ou cimento.	0,2-0,3
IV	a) Misturas betuminosas a frio em bases, muito fendilhadas e com rodeiras de grande expressão.	0,3-0,5
	b) Pavimento rígido (mesmo com camada de desgaste em mistura betuminosa) e que vai ser partido antes de reforço em pedaços com 0,5 metros ou menos. Usar C= 0,3 quando a laje tiver sido directamente aplicada sobre o solo de fundação.	
	c) Base ou sub-base granulares britadas estabilizadas com cimento, que se apresentem com fendilhamento de contracção extensa (usar C=0,3 quando as fissuras tiverem 1 cm de espessura ou mais e o material se apresentar instabilizado.	
V	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base que exibam fendilhamento apreciável e interligado	0,5-0,7
	b) Misturas betuminosas a frio em bases, com fendilhamento fino e com rodeiras de pequena expressão.	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento apreciável que será partido em bocados de 1 a 4 m <sup>2</sup> antes de reforço.	
VI	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base que exibam fendilhamento fino, com pequena interligação e com rodeiras pequenas.	0,7-0,9
	b) Misturas betuminosas a frio em bases, sem fendilhamento e com rodeiras de muito pequena expressão.	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento pequeno, em que os pedaços formados não são de dimensão inferior a 1 m <sup>2</sup> .	
VII	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base sem fendilhamento e com rodeiras praticamente inexistentes.	0,9-1,0
	b) Pavimento rígido com camada de desgaste em mistura betuminosa, completamente estável e exibindo fendilhamento de reflexão desprezável.	
	c) Pavimento rígido praticamente novo.	

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Uma vez obtida a espessura efectiva do pavimento torna-se possível o cálculo da espessura da camada de reforço necessária através da equação (3-9):

$$T_0 = T_n - T_e \quad (3-9)$$

sendo:

$T_0$  – espessura da camada de reforço necessária;

$T_n$  – espessura de pavimento constituído apenas por betão betuminoso necessária para suportar o tráfego considerado;

$T_e$  – espessura efectiva do pavimento.

Para calcular  $T_n$  é necessário conhecer o número de eixos-padrão de 80 kN a que o pavimento será sujeito e o módulo de deformabilidade do solo de fundação. Com estes dados recorre-se ao ábaco representado na Figura 3-12.

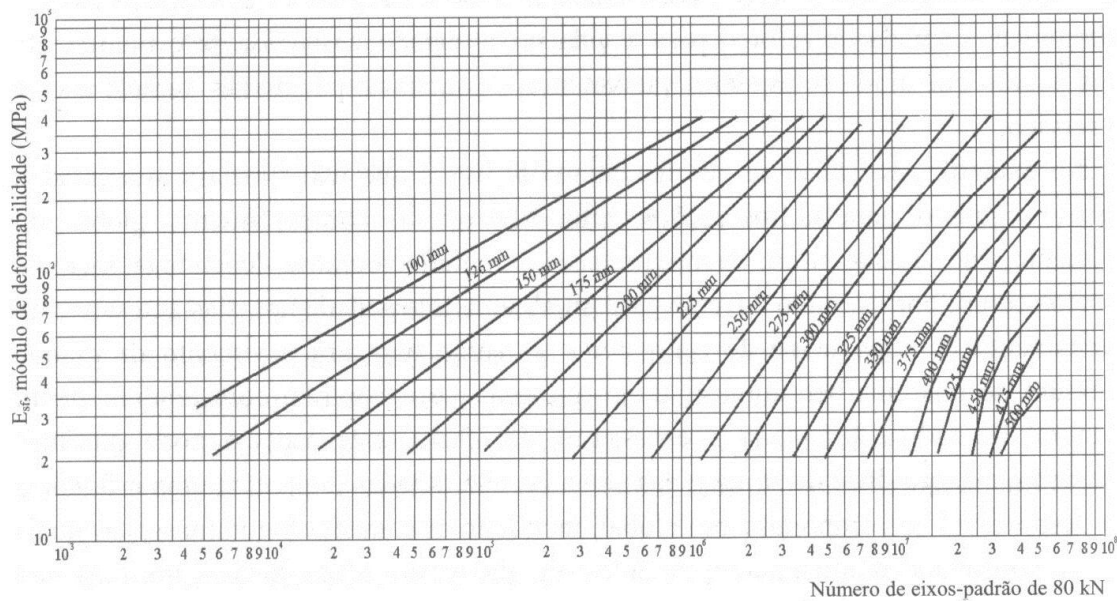


Figura 3-12: Ábaco do Asphalt Institute para cálculo da espessura de um pavimento só com camadas de betão betuminoso (AI, 1983)

O módulo de deformabilidade do solo de fundação pode ser estimado de acordo com a seguinte equação:

$$E_{sf} = 10 \times CBR \quad (3-10)$$

sendo:

$E_{sf}$  – módulo de deformabilidade do solo de fundação em MPa;

$CBR$  – *Californian Bearing Ratio* em percentagem.

O *CBR* pode ser estimado através da classificação dos solos de acordo com a E240 do LNEC do seguinte modo:

- Solos pobres (grupo A4) têm tipicamente um *CBR* de 3%;
- Solos médios (grupos A-2-6 e A-2-7) têm tipicamente um *CBR* de 8%;
- Solos bons (grupos A1, A3, A-2-4 e A-2-5) têm caracteristicamente um *CBR* de 17%.

É boa prática adicionar 1 cm à espessura de reforço obtida no cálculo de modo a contabilizar possíveis incorrecções a nível da colocação da camada em obra. O ábaco da Figura 3-12 permite também a avaliação da vida útil do pavimento. Para isso basta encontrar o número de eixos-padrão de 80 kN correspondente à espessura efectiva do pavimento e ao módulo de deformabilidade do solo de fundação.

#### **3.4 Avaliação do efeito da correcção do módulo**

Para a investigação do efeito da correcção do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil foram idealizados pavimentos de diversas características. O Quadro 3-4 apresenta as diferentes variáveis consideradas e os seus valores respectivos.

De acordo com as características definidas estabeleceu-se um conjunto de módulos de deformabilidade para as camadas betuminosas dos pavimentos para as diversas temperaturas. Para isso recorreu-se ao método da SHELL. Note-se que a utilização deste método nesta instância tem como objectivo único a obtenção de uma gama de valores realísticos de módulos de deformabilidade que englobem as situações práticas mais comuns.

De seguida, procedeu-se ao estabelecimento de um segundo conjunto de módulos de deformabilidade. Este conjunto de valores foi obtido a partir do primeiro através da sua multiplicação por factores bem definidos. Estes factores foram seleccionados de modo a que representem os efeitos de diferentes variações de temperatura segundo o método BELLS3 descrito no capítulo seguinte. O *slope* utilizado foi -0,021. A selecção deste método deve-se não só à sua simplicidade e eficácia, mas também à sua metodologia. Uma vez que as únicas variáveis necessárias à utilização do método são as temperaturas, torna-se possível relacionar directamente as variações de temperatura e as respectivas correcções do módulo a utilizar.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Quadro 3-4: Características dos diversos pavimentos em análise

Variável	Valores considerados
Temperatura (°C)	20, 25 e 30
Penetração a 25 °C ( $10^{-1}$ mm)	20 e 40
Velocidade de tráfego (km/h)	50 e 100
Percentagem volumétrica de agregados (%)	84 e 86
Percentagem volumétrica de betume (%)	8, 10 e 12
Espessura das camadas betuminosas (cm)	Com base granular: 13 e 19
	Com base betuminosa: 20 e 26
Módulo de deformabilidade das camadas granulares (MPa)	$E_{solo\ de\ fundação} = 50$ $E_{sub-base\ granular} = 100$ $E_{base\ granular} = 200$ (caso exista)
	$E_{solo\ de\ fundação} = 100$ $E_{sub-base\ granular} = 200$ $E_{base\ granular} = 400$ (caso exista)
Camada de reforço (cm)	0, 4 e 6

Os factores *ATAF* utilizados no cálculo deste segundo conjunto de módulos e as suas respectivas variações de temperatura são indicadas no Quadro 3-5.

Quadro 3-5: Relação entre a variação dos módulos e variação da temperatura

Variação de temperatura	<i>ATAF</i> (variação do módulo)
-10	1,62
-5	1,27
+5	0,79
+10	0,62

Assim, a partir de cada módulo do primeiro conjunto surgem quatro novos módulos. Associando os módulos iniciais a cada um destes módulos corrigidos por um factor *ATAF* e aos respectivos tempos de vida útil dos pavimentos, será possível analisar a influência que um erro na correcção do módulo de deformabilidade terá no tempo de vida útil do pavimento.

Os módulos de deformabilidade das camadas de reforço implementadas foram calculados com base no método da SHELL para as diferentes temperaturas de serviço, considerando a utilização de um betume 35/50, uma velocidade de tráfego de 50 km/h, uma percentagem volumétrica de agregados de 86% e uma percentagem volumétrica de betume de 10%.

Uma vez estabelecidos os módulos de deformabilidade de todas as camadas procedeu-se ao cálculo da variação dos tempos de vida útil dos pavimentos resultantes de todas as combinações possíveis das variáveis descritas no Quadro 3-4 e para todos os módulos obtidos (tanto os iniciais, como os afectados por *ATAF*). A análise estrutural dos pavimentos foi realizada através do programa ELSYM5, a partir do qual se obtiveram as deformações relevantes ao cálculo do tempo de vida útil. As cargas utilizadas foram as definidas no eixo da SHELL.

Finalmente representou-se graficamente na Figura 3-13, Figura 3-14 e Figura 3-15 o comportamento do tempo de vida útil relativamente à variação do módulo em situações sem reforço de pavimento, com um reforço de 4 cm e com um reforço de 6 cm, respectivamente.

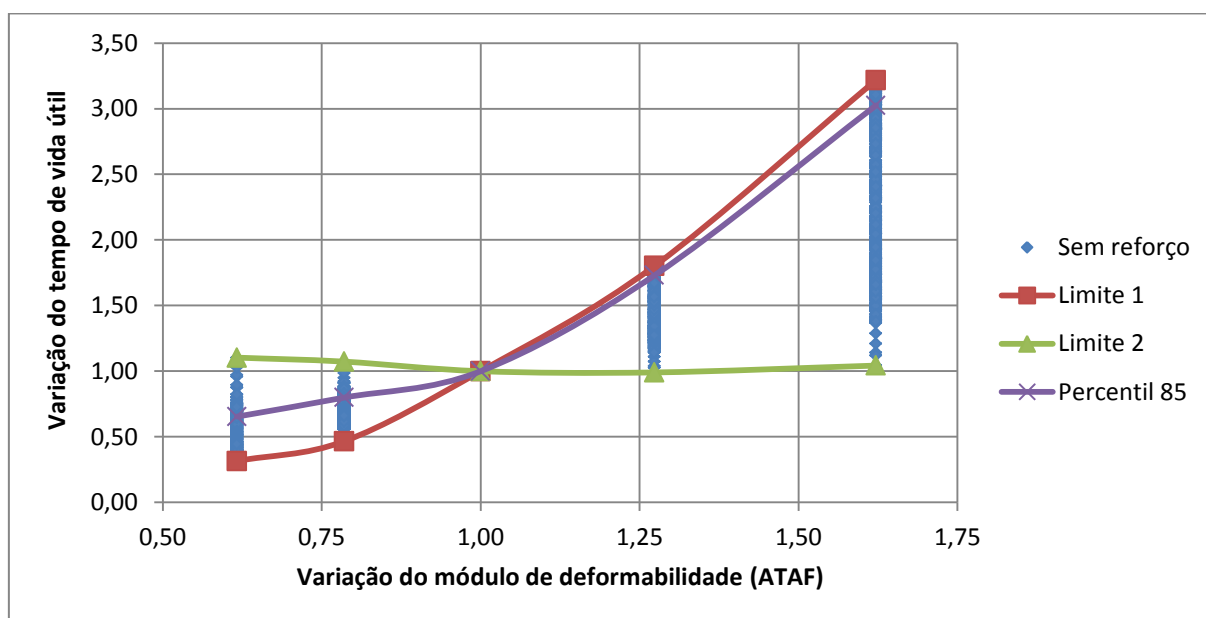


Figura 3-13: Impacto da variação do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil em pavimentos sem reforço

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

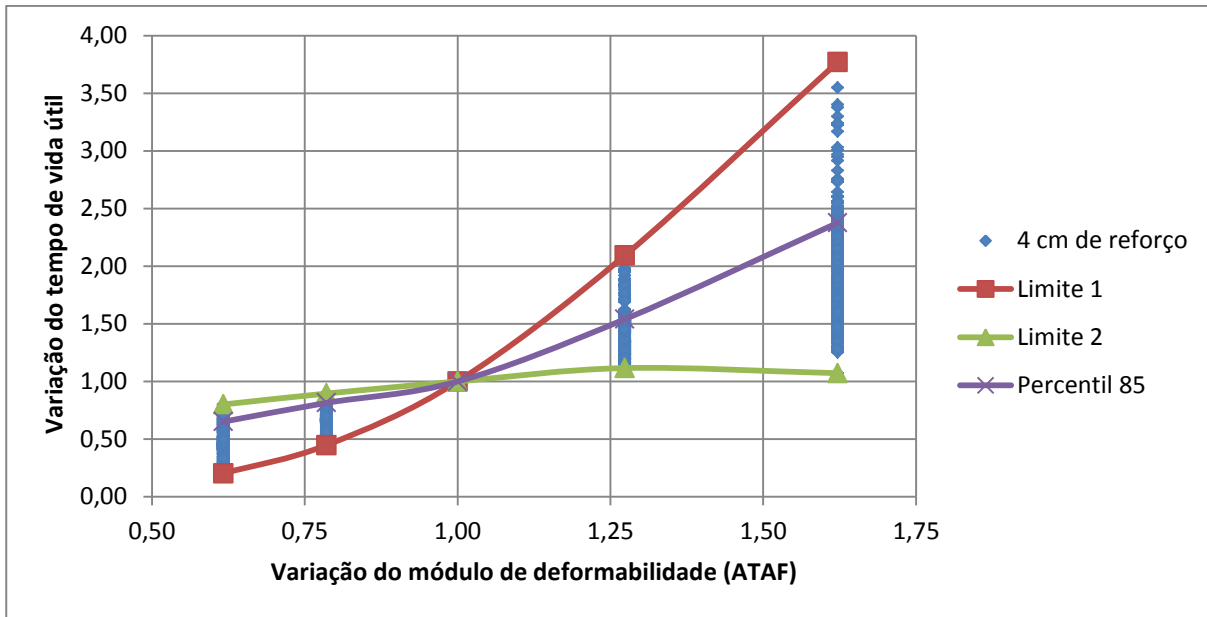


Figura 3-14: Impacto da variação do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil em pavimentos com um reforço de 4 cm

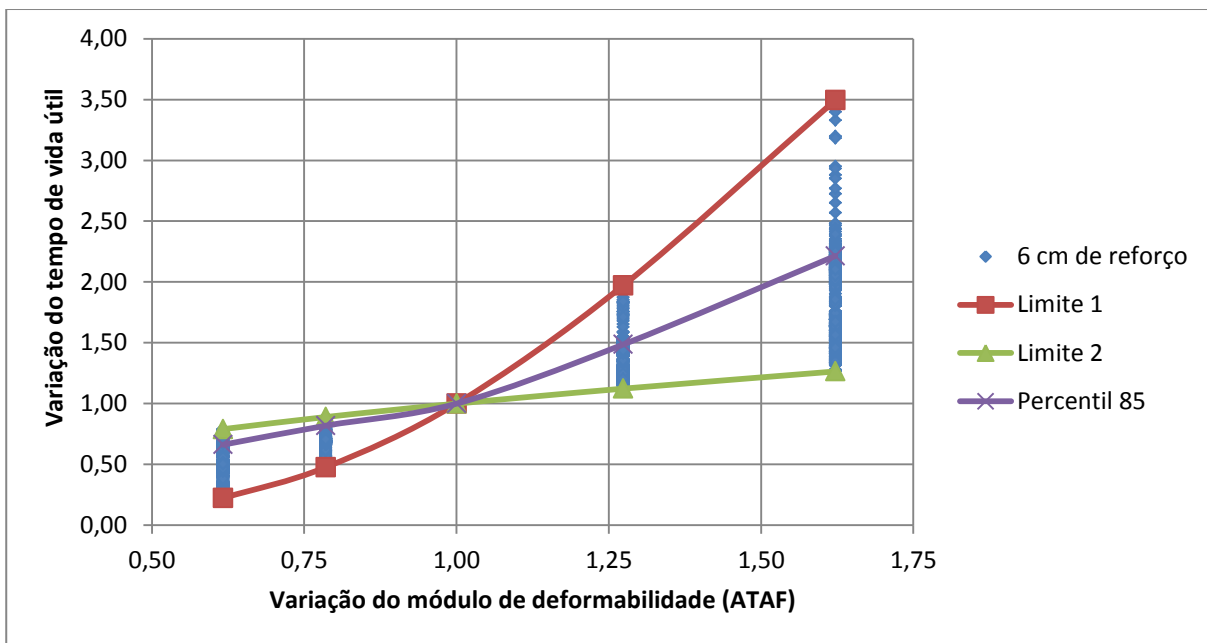


Figura 3-15: Impacto da variação do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil em pavimentos com um reforço de 6 cm

Além da representação da nuvem de pontos correspondentes aos resultados dos cálculos efectuados, representaram-se duas curvas que acompanham os limites máximos e mínimos da nuvem. Foi ainda representada a curva correspondente ao percentil 85 dos resultados obtidos. A interpretação da influência do módulo de deformabilidade no tempo de vida útil terá como base esta curva. Esta decisão foi tomada de modo a evitar a sobrevalorização dos efeitos do

módulo de deformabilidade no tempo de vida útil que teria lugar caso fosse considerado o limite máximo (que em alguns casos contem pontos bastante isolados, ou seja, excepcionais).

Como se pode observar, as três curvas obtidas para o Percentil 85 são quase coincidentes quando *ATAF* é menor que 1 (situação de decremento do módulo). No entanto, as três curvas diferenciam-se cada vez mais à medida que se incrementa o módulo. Observa-se que, para estas condições, o efeito do incremento do módulo de deformabilidade na variação do tempo de vida útil dos pavimentos será máximo em situações sem reforço e diminuirá à medida que se aumenta a espessura de reforço aplicada. De modo a considerar as três situações de reforço apresentadas obteve-se a média dos percentis 85, cuja curva se encontra na Figura 3-16.

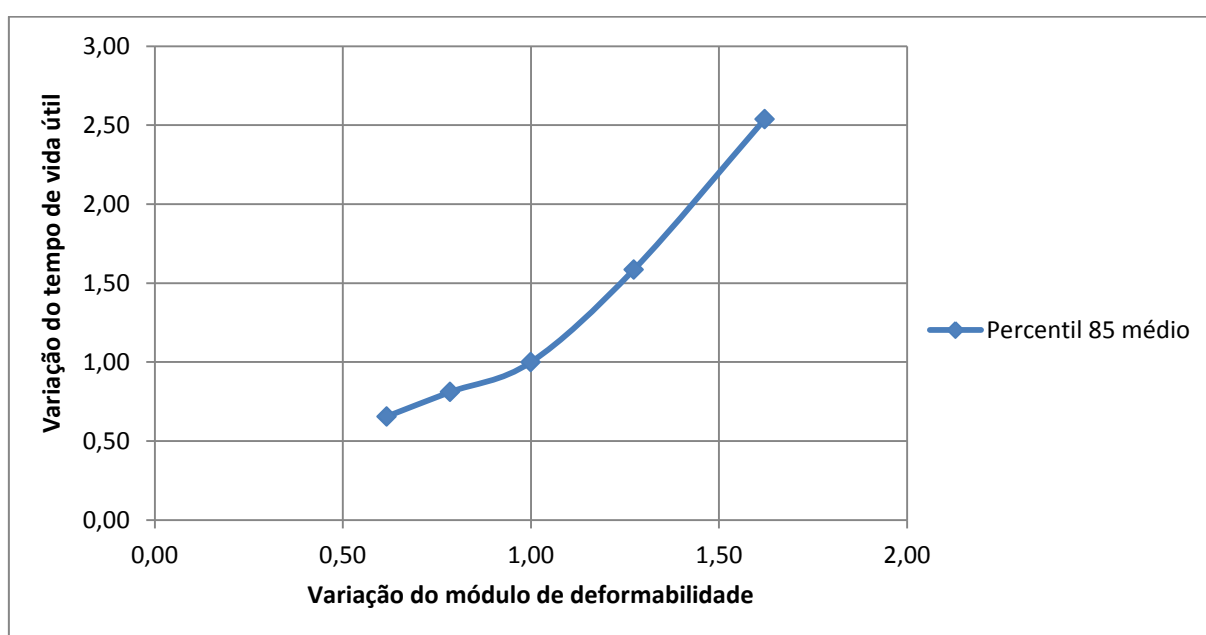


Figura 3-16: Média dos percentis 85 dos pavimentos em análise

Finalmente, com esta curva, calcularam-se os limites do intervalo de variação do módulo que correspondem a quatro níveis de precisão do tempo de vida útil. Os resultados encontram-se no Quadro 3-6.

Quadro 3-6: Intervalos de precisão de acordo com o erro do módulo

Nível de precisão do tempo de vida útil	Limites do intervalo do módulo	Média dos limites
Precisão muito alta – erro de 5%	-4,06% a 3,53%	3,80%
Precisão alta – erro de 10%	-9,08% a 6,60%	7,84%
Precisão média – erro de 20%	-23,06% a 11,89%	17,48%
Precisão baixa – erro de 40%	-41,73% a 20,55%	31,14%

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Note-se que a coluna respectiva ao intervalo do módulo encontra-se na forma de uma percentagem relativa, que pode ser obtida subtraindo uma unidade aos valores do eixo horizontal da Figura 3-16.

Interpretando este quadro, é possível inserir todos os métodos de correcção do módulo de deformabilidade em diferentes níveis de precisão no que diz respeito ao cálculo do tempo de vida útil (uma vez que o erro de cálculo nestes métodos pode ser visto como uma variação do módulo). Exemplificando, para um método com um erro médio de 5%, a precisão de cálculo do tempo de vida útil será alta já que o erro é menor que 7,84% mas superior a 3,80%. Pode-se observar que o erro da correcção terá de ser bastante limitado para que possam ser atingidos os níveis de precisão alta e muito alta. Este facto comprova a relevância da correcção do módulo no cálculo do tempo de vida útil. Conclui-se então que é de extrema importância proceder à correcção do módulo de deformabilidade com o mínimo de erro possível para que sejam obtidos resultados realísticos a nível do tempo de vida útil dos pavimentos.

Através do método BELLS3 é ainda possível calcular os intervalos de variação de temperatura correspondentes aos intervalos definidos para os módulos. Assim, é possível analisar o grau de precisão necessário na medição das temperaturas durante os ensaios. O Quadro 3-7 apresenta os intervalos mencionados:

Quadro 3-7: Intervalos de precisão de acordo com o erro da temperatura

Nível de precisão do tempo de vida útil	Intervalo de temperatura
Precisão muito alta	-0,7 °C a 0,9 °C
Precisão alta	-1,3 °C a 2,0 °C
Precisão média	-2,3 °C a 5,4 °C
Precisão baixa	-3,9 °C a 11,2 °C

Exemplificando, se a temperatura de ensaio real for igual a 15 °C, para que o nível de precisão seja muito alto, a temperatura medida deve encontrar-se entre 14,3 °C e 15,9 °C (desprezando o erro relativo ao processo de correcção em si). É necessário considerar também que o método BELLS3 tem o seu próprio erro de cálculo e, portanto os intervalos de temperatura obtidos são apenas estimativas.

## **4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade**

### **4.1 Introdução**

Após o cálculo do módulo de deformabilidade de um pavimento flexível a uma temperatura de ensaio, é necessário determinar o módulo de deformabilidade correspondente à temperatura de serviço. Neste capítulo desenvolve-se esta temática com a apresentação dos métodos já existentes que permitem corrigir o módulo e o desenvolvimento e calibração de novos métodos.

### **4.2 Descrição dos métodos de correcção existentes**

Existem diferentes métodos de correcção do módulo de deformabilidade. Estas metodologias podem ser classificadas de acordo com duas categorias:

- Métodos directos, que permitem a determinação da relação entre um par de módulos de deformabilidade correspondentes a quaisquer temperaturas;
- Métodos indirectos, que permitem apenas o cálculo da relação entre um módulo de deformabilidade a uma temperatura qualquer e o módulo respectivo a uma temperatura de referência bem definida. Neste tipo de método, o processo de correcção divide-se em duas partes. A primeira parte consiste no cálculo do módulo de deformabilidade para a temperatura de referência e a segunda parte consiste no cálculo do módulo de deformabilidade desejado.

Descrevem-se a seguir os diversos métodos existentes.

## 4.2.1 Métodos directos

### 4.2.1.1 Método BELLS3

Um dos métodos de ajuste do módulo de deformabilidade com a temperatura é o método BELLS3, cujo desenvolvimento é descrito em pormenor em FHWA (2000). De modo resumido, pode-se dizer que o método foi desenvolvido com base no cálculo inverso de diversos módulos de deformabilidade para diferentes temperaturas com recurso aos programas: WESDEF, MODULUS 5.1 e ELMOD4. A utilização destes três programas para o cálculo inverso do modelo visa a consideração de diferentes abordagens a este processo. Os dados necessários ao cálculo dos módulos foram obtidos por análise das deflexões relativas a ensaios de deflectómetro de impacto com uma carga normalizada de 40 kN. A regressão dos valores obtidos levou ao desenvolvimento da equação (4-1):

$$\log E_m = \textit{intercept} + \textit{slope} \times T \quad (4-1)$$

sendo:

$E_m$  – módulo de deformabilidade;

$\textit{intercept}$  e  $\textit{slope}$  – constantes obtidas pela regressão linear;

$T$  – temperatura de ensaio;

Posteriormente procedeu-se à análise da variação de  $\textit{intercept}$  e  $\textit{slope}$  em diferentes locais. Verificou-se que estas constantes dependem dos seguintes factores:

- Características do ligante e da mistura;
- Latitude: normalmente são utilizados ligantes mais rígidos em climas quentes do que em climas frios, pelo que se recorreu à latitude do local para prever a rigidez do ligante utilizado na mistura;
- Variação das características estruturais do pavimento (espessura e densidade);
- Condição da superfície do pavimento.

Existe uma relação linear entre  $\textit{intercept}$  e  $\textit{slope}$  (quando um aumenta o outro diminui), o que implica que misturas mais rígidas têm uma maior sensibilidade a variações de temperatura.

Na grande maioria das regressões verificou-se que o  $\textit{slope}$  não ultrapassa o limite mínimo de -0,027 e máximo de -0,010. Esta constante é difícil de quantificar uma vez que depende das características da mistura betuminosa e até mesmo da latitude do local (que influencia a escolha do ligante a utilizar). Por este motivo, recomenda-se o uso de  $\textit{slope}$  igual a -0,021 para o centro das vias e -0,0195 para as zonas laterais da via (rodeiras), uma vez que estes foram os valores mais comuns encontrados nas diversas regressões.

#### 4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade

Finalmente, desenvolveu-se a equação (4-2) para o cálculo do factor de correcção do módulo de deformabilidade.

$$ATAF = 10^{slope \times (TS - TE)} \quad (4-2)$$

sendo:

$ATAF$  – factor de ajuste da temperatura do módulo de deformabilidade;

$slope$  – inclinação da equação (4-1);

$TS$  – temperatura de serviço;

$TE$  – temperatura de ensaio.

Uma vez calculado o  $ATAF$  é possível determinar o valor corrigido do módulo de deformabilidade de acordo com a equação (4-3):

$$E_{TS} = ATAF \times E_{TE} \quad (4-3)$$

##### 4.2.1.2 Método proposto por Picado-Santos et al.

Este método, descrito em Picado-Santos et al. (2004) recorre à equação (4-4):

$$E_{TS} = E_{TE} \times K \quad (4-4)$$

sendo:

$E_{TS}$  – módulo de deformabilidade à temperatura de serviço  $TS$ ;

$E_{TE}$  – módulo de deformabilidade à temperatura de ensaio  $TE$ ;

$K$  – coeficiente de correcção entre as temperaturas  $TS$  e  $TE$ .

Como se verifica na equação anterior, para conseguir o valor do módulo de deformabilidade à temperatura  $TS$ , é necessário calcular previamente um coeficiente de correcção. Este coeficiente é obtido de acordo com a equação (4-5):

$$K = \frac{E_{TS}^{SHELL}}{E_{TE}^{SHELL}} \quad (4-5)$$

sendo:

$E_{TS}^{SHELL}$  – estimativa do módulo de deformabilidade à temperatura de serviço de acordo com o método da SHELL;

$E_{TE}^{SHELL}$  – estimativa do módulo de deformabilidade à temperatura de ensaio de acordo com o método da SHELL.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Através destas expressões pode-se deduzir que este método considera uma relação de proporcionalidade entre módulos de deformabilidade obtidos por ensaio e módulos de deformabilidade obtidos pelo método da SHELL.

### 4.2.2 Métodos indirectos

#### 4.2.2.1 Método proposto por Antunes

Este método, descrito por Antunes (1993), tem como base a equação (4-6):

$$\frac{E_T}{E_{20}} = 1,635 - 0,0317 \times T \quad (4-6)$$

sendo:

$T$  – temperatura em °C;

$E_T$  – módulo de deformabilidade estimado para a misturas betuminosas correspondente à temperatura  $T$  em MPa;

$E_{20}$  – módulo de deformabilidade para misturas betuminosas correspondente a uma temperatura de 20°C em MPa.

Por análise da equação (4-6) torna-se evidente que este método toma como temperatura de referência os 20 °C. A determinação do módulo de deformabilidade para esta temperatura é um passo auxiliar necessário à obtenção do módulo de deformabilidade para a temperatura de serviço. Por outras palavras, este método passa pela aplicação da equação para o cálculo do módulo de deformabilidade para 20 °C e, posteriormente, uma nova aplicação da equação para obter o módulo de deformabilidade para a temperatura de serviço.

#### 4.2.2.2 Método proposto por Ali et al.

Este método foi desenvolvido por Ali et al. (1996) através da retro análise de levantamentos deflectométricos obtidos com o deflectómetro de impacto. Segundo este método, a determinação do módulo de deformabilidade é possível através da equação seguinte:

$$E_T = e^{9,37196 - 0,03608145 \times T} \quad (4-7)$$

Sendo:

$E_T$  – módulo de deformabilidade em MPa;

$T$  – temperatura 25 mm abaixo da superfície do pavimento em °C.

Assim sendo, é possível obter um factor de correcção de temperatura através da equação (4-8).

$$C = \frac{E_{21}}{E_T} = \frac{e^{9,37196-0,03608145 \times 21}}{e^{9,37196-0,03608145 \times T}} = e^{0,03608145 \times T - 0,75771} \quad (4-8)$$

Pode-se observar que este método tal como o proposto por Antunes recorre a uma temperatura de referência, que neste caso é 21 °C (Gonçalves, 1999, p.24).

#### 4.2.2.3 Expressão de Ullidtz e Peattie

Neste método, descrito por Ullidtz e Peattie (1982) é considerada uma temperatura de referência de 15 °C. A expressão em que se baseia é a seguinte:

$$\frac{E_T}{E_{15}} = 1 - 1,384 \times \log \frac{T}{15} \quad (4-9)$$

sendo:

$E_T$  – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa à temperatura T;

$E_{15}$  – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa correspondente a 15 °C;

T – temperatura em °C.

Esta expressão é válida apenas para temperaturas superiores a 1 °C.

### 4.3 Desenvolvimento e calibração de métodos de correcção

Nesta secção é exposto o processo de desenvolvimento de uma diversidade de novos modelos de previsão do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas a diferentes temperaturas. As variáveis consideradas no desenvolvimento dos métodos foram a temperatura, a penetração a 25 °C, a velocidade de tráfego, a percentagem volumétrica de agregados e a percentagem volumétrica de betume.

Os métodos desenvolvidos foram calibrados de dois modos: de acordo com resultados numéricos obtidos pelas expressões da SHELL e de acordo com um conjunto de resultados experimentais obtidos por Baptista (2006). Esta dupla calibração permite analisar a hipótese de desenvolvimento de um método válido, quer num contexto numérico, quer num contexto experimental. Esta compatibilização seria importante pois a calibração para ambos os conjuntos de dados implica diferentes vantagens e desvantagens. Embora seja mais interessante a análise de dados experimentais uma vez que são valores obtidos de situações reais e como tal são mais fiáveis, a amostra disponível é pequena comparativamente à infinidade de dados que se podem obter por expressões teóricas. Além disso, a análise numérica permite realizar uma estimativa inicial da relevância das 5 variáveis em estudo no processo de correcção do módulo.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Os valores das variáveis utilizadas para a calibração numérica dos modelos foram limitados de acordo com dois critérios. O primeiro critério foi implementado com o intuito de garantir que o resultado obtido de acordo com o método da SHELL é válido, ou seja, que são cumpridas as três condições necessárias à utilização da expressão de Ullidtz e Peattie apresentada para a equação (2-31). O segundo critério limita o intervalo de valores que cada variável assume de modo a que sejam considerados apenas valores plausíveis para situações reais. São apresentados no Quadro 4-1 os intervalos considerados para cada variável:

Quadro 4-1: Limitação do domínio do método em desenvolvimento

Variável	Intervalo	Passo
Temperatura	10 a 40 °C	1 °C
Penetração a 25 °C	10 a 40 $10^{-1}$ mm	5 $10^{-1}$ mm
Velocidade de tráfego	10 a 100 km/h	10 km/h
Percentagem volumétrica de agregados	82 a 88%	1%
Teor volumétrico de betume	8 a 12%	1%

Se estes critérios não fossem implementados, o número de cálculos para o desenvolvimento do modelo aumentaria desnecessariamente e seriam introduzidos grandes erros, uma vez que algumas das misturas betuminosas teriam composições absurdas e grande parte dos resultados obtidos pelo método da SHELL, nos quais o modelo se baseia, seriam erróneos.

Os resultados experimentais dizem respeito a ensaios de flexão repetida em quatro pontos com extensão controlada sobre vigas (de acordo com a EN 12697-26). Os provetes utilizados dividem-se nas seguintes categorias:

- Provetes de macadame betuminoso obtidos em trechos experimentais;
- Provetes de macadame betuminoso produzidos em laboratório;
- Provetes de betão betuminoso produzidos em laboratório.

No Quadro 4-2 definem-se as condições impostas aos diversos ensaios.

Quadro 4-2: Condições de ensaio (Baptista, 2006)

Grandeza	Valores de ensaio
Temperatura de ensaio	15 °C, 25 °C e 40 °C
Frequência de carga	10 Hz, 5 Hz e 1 Hz
Extensão de tracção	100 microns

Baptista (2006) descreve também a composição dos provetes ensaiados e os resultados desses mesmos ensaios realizados (módulo de deformabilidade complexo e ângulo de fase). É o conjunto de todos estes dados que possibilita a calibração dos métodos desenvolvidos.

Os modelos desenvolvidos integram-se na categoria de métodos indirectos. A escolha desta tipologia é vantajosa a nível do processo de desenvolvimento dos métodos (uma vez que este tipo de método requer apenas uma variável de temperatura, contrariamente a métodos directos que necessitam sempre de duas variáveis de temperatura). Assim, com a redução do número de variáveis e consequente diminuição do grau de complexidade, torna-se mais fácil o ajuste e compreensão das equações que integram cada um dos métodos.

### 4.3.1 Método geral

Para o desenvolvimento deste método de correcção, procurou-se separar o problema em diversas partes. Assim, investigou-se primeiro o efeito da temperatura e da penetração a 25 °C em conjunto para valores constantes de velocidade de tráfego, percentagem volumétrica de agregados e teor volumétrico de betume. Posteriormente analisaram-se as consequências da alteração do valor das restantes variáveis uma a uma.

Esta metodologia tem a vantagem de facilitar a compreensão da influência de cada variável no resultado final e contribui também para a simplificação do problema. O modelo desenvolvido traduz-se pela equação (4-10):

$$\frac{E_T}{E_{25}} = f(T, pen25) \times C_{vt} \times C_{va} \times C_{TVB} \quad (4-10)$$

sendo:

$E_T$  – módulo de deformabilidade à temperatura  $T$ ;

$E_{25}$  – módulo de deformabilidade a uma temperatura de 25°C;

$f(T, pen25)$  – função que descreve a variação do quociente  $\frac{E_T}{E_{25}}$  em função da temperatura  $T$  e de  $pen25$ ;

$C_{vt}$  – factor que corrige  $f(T, pen25)$  de modo a que a função seja válida para diferentes velocidades de tráfego;

$C_{va}$  – factor que corrige  $f(T, pen25)$  de modo a que a função seja válida para misturas betuminosas com diferentes percentagens volumétricas de agregados;

$C_{TVB}$  – factor que corrige  $f(T, pen25)$  de modo a que a função seja válida para misturas betuminosas com diferentes teores volumétricos de betume.

A calibração deste método será executada apenas com base em dados numéricos, uma vez que os dados experimentais não são adequados a esta metodologia em particular. Especificamente,

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

para os dados experimentais utilizados torna-se impossível a calibração dos factores  $C_{vt}$ ,  $C_{va}$  e  $C_{TVB}$ . Apresenta-se um exemplo da aplicação deste método no Apêndice A.

### 4.3.1.1 Determinação de $f(T, pen25)$

Fixaram-se as seguintes condições iniciais: velocidade de tráfego igual a 50 km/h, percentagem volumétrica de agregado igual a 85% e TVB igual a 10%. Para estes valores considerou-se que os respectivos factores de correcção  $C_{vt}$ ,  $C_{va}$  e  $C_{TVB}$  são iguais a 1. Assim sendo, a equação (4-10) pode ser simplificada do seguinte modo:

$$\frac{E_T}{E_{25}} = f(T, pen25) \quad (4-11)$$

Foram calculados os módulos de deformabilidade de acordo com o método da SHELL para todos estes valores e de seguida o quociente  $\frac{E_T}{E_{25}}$ . A Figura 4-1 mostra um gráfico representativo dos resultados.

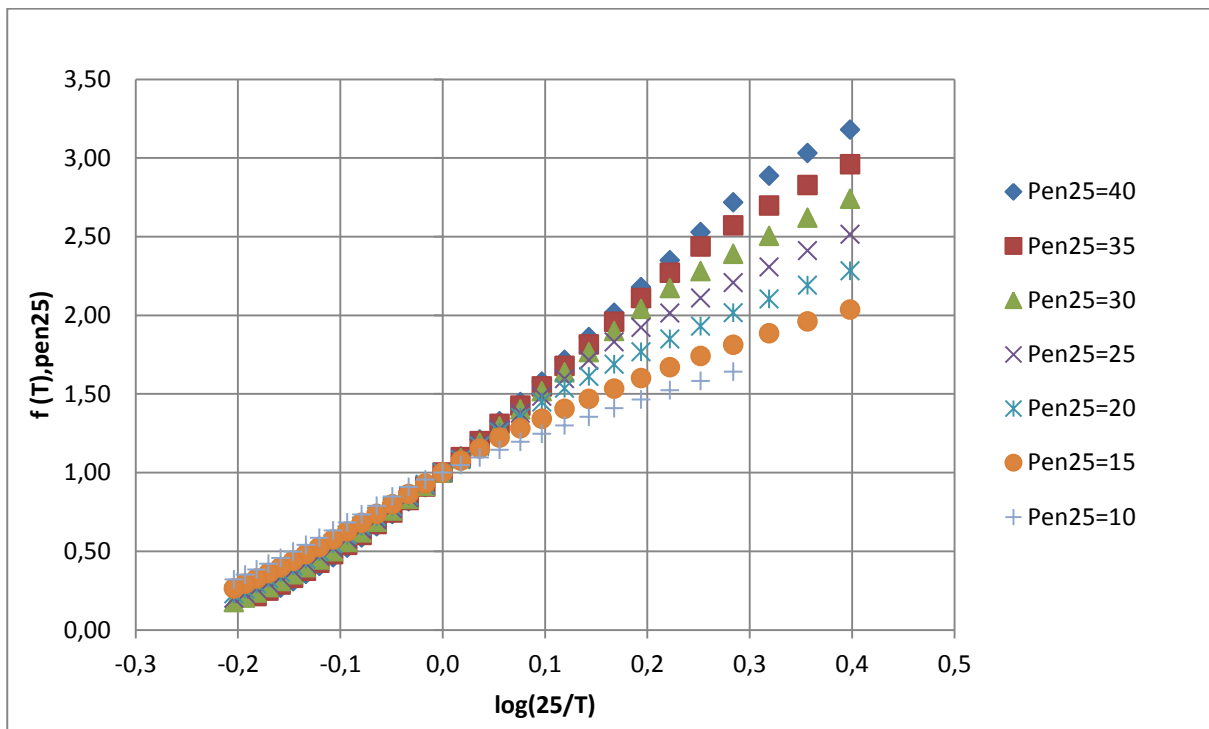


Figura 4-1:  $\frac{E_T}{E_{25}}$  em função da temperatura e penetração

Neste gráfico evidencia-se que nem todas as curvas têm o mesmo número de pontos. Isto deve-se à remoção dos valores que não cumprem os critérios da SHELL.

#### 4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade

Como se pode observar, para qualquer valor de penetração, a influência da temperatura (admitindo uma escala logarítmica) pode ser representada por duas funções lineares que passam no ponto de abcissa 0 e ordenada 1 (uma função correspondente a temperaturas menores que 25 °C e outra correspondente a temperaturas superiores a 25 °C). As funções obtidas são deste tipo:

$$f(T, pen25) = 1 + K \times \log \frac{25}{T} \quad (4-12)$$

Este modelo de equação tem a vantagem de garantir que para uma temperatura igual a 25 °C o resultado será igual a 1 que, por definição, é o resultado correcto. Apresentam-se no Quadro 4-3 os valores das constantes  $K$  para as diferentes penetrações a 25 °C consideradas. Incluiu-se também o factor de correlação obtido.

Quadro 4-3: Constantes das regressões de  $f(T, pen25)$

$pen25$	$K$ para $T > 25^{\circ}\text{C}$	$R^2$	$K$ para $T < 25^{\circ}\text{C}$	$R^2$
40	5,8339	0,9950	4,8855	0,9913
35	5,3436	0,9892	4,5984	0,9883
30	4,8070	0,9810	4,3287	0,9856
25	4,2202	0,9709	4,1718	0,9888
20	3,5720	0,9637	3,9924	0,9918
15	2,8475	0,9716	3,7802	0,9944
10	2,3583	0,9949	3,3912	0,9984

Posteriormente foram definidas expressões para representar a variação da constante em função da penetração. Estas expressões, assim como os valores do quadro anterior foram representados no gráfico da Figura 4-2.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

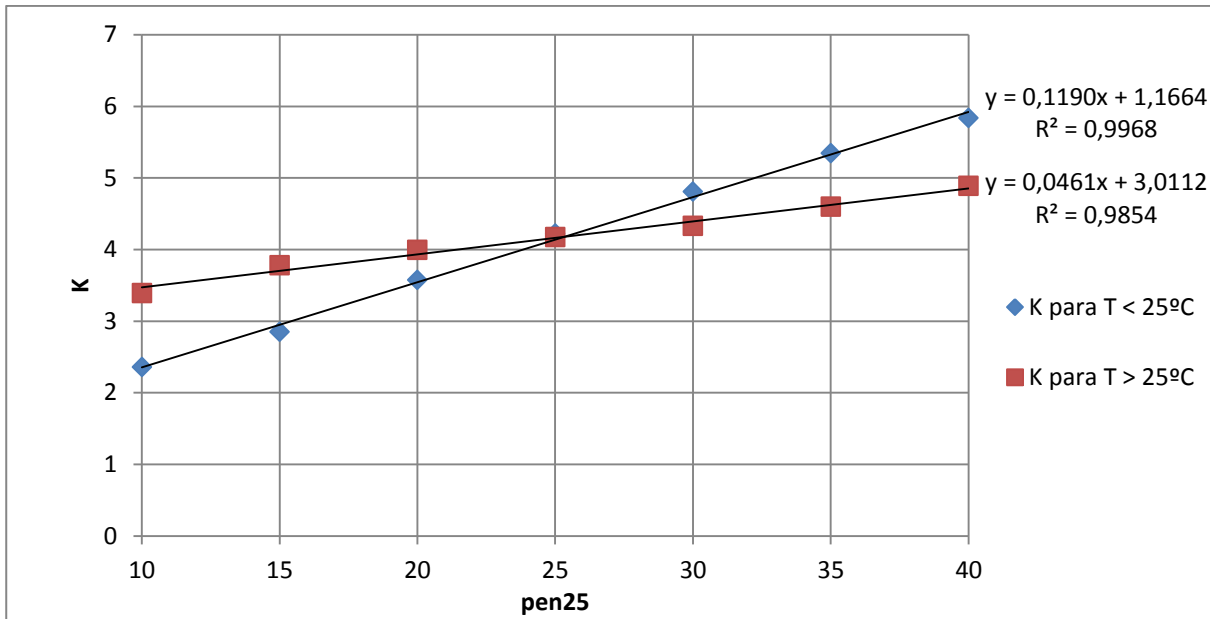


Figura 4-2: Constante  $K$  em função da penetração

Conhecidas estas expressões é finalmente possível definir  $f(T, pen25)$  de acordo com a equação (4-13):

$$f(T, pen25) = \begin{cases} 1 + (0,1190 \times pen25 + 1,1664) \times \log \frac{25}{T} & \text{para } T < 25^{\circ}\text{C} \\ 1 + (0,0461 \times pen25 + 3,0112) \times \log \frac{25}{T} & \text{para } T > 25^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (4-13)$$

#### 4.3.1.2 Determinação de $C_{vt}$

O objectivo deste factor de correcção é possibilitar o ajuste da equação (4-11) para expandir o seu domínio a todos os valores de velocidade de tráfego. Por outras palavras, pretende-se nesta fase do cálculo obter uma expressão que explique todos os resultados cujo domínio é definido nos intervalos do Quadro 4-1 (relativamente à temperatura, penetração e velocidade de tráfego) e considerando uma percentagem volumétrica de agregados igual a 85% e  $TVB$  igual a 10%. Esta expressão terá o seguinte aspecto:

$$\frac{E_T}{E_{25}} = f(T, pen25) \times C_{vt} \quad (4-14)$$

Das equações (4-11) e (4-14) pode concluir-se que:

$$\frac{E_T}{E_{25}} = \frac{E_T^{vt=50}}{E_{25}^{vt=50}} \times C_{vt} \quad (4-15)$$

#### 4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade

$$C_{vt} = \frac{\frac{E_T}{E_T^{vt=50}}}{\frac{E_{25}}{E_{25}^{vt=50}}} \quad (4-16)$$

Por observação da equação (4-16) conclui-se que é possível determinar o coeficiente de correcção desejado se for conhecido o rácio  $R_T^{vt}$  como se demonstra nas equações (4-17) e (4-18).

$$R_T^{vt} = \frac{E_T}{E_T^{vt=50}} \quad (4-17)$$

$$C_{vt} = \frac{R_T^{vt}}{R_{25}^{vt}} \quad (4-18)$$

Este cálculo foi executado com base nos valores obtidos pelo método da SHELL. Analisando os resultados tornou-se evidente que seria necessário recorrer não só à variável da velocidade de tráfego, mas também à temperatura e à penetração para explicar o comportamento do rácio  $R_T^{vt}$  em questão. A Figura 4-3 demonstra este comportamento para uma situação genérica.

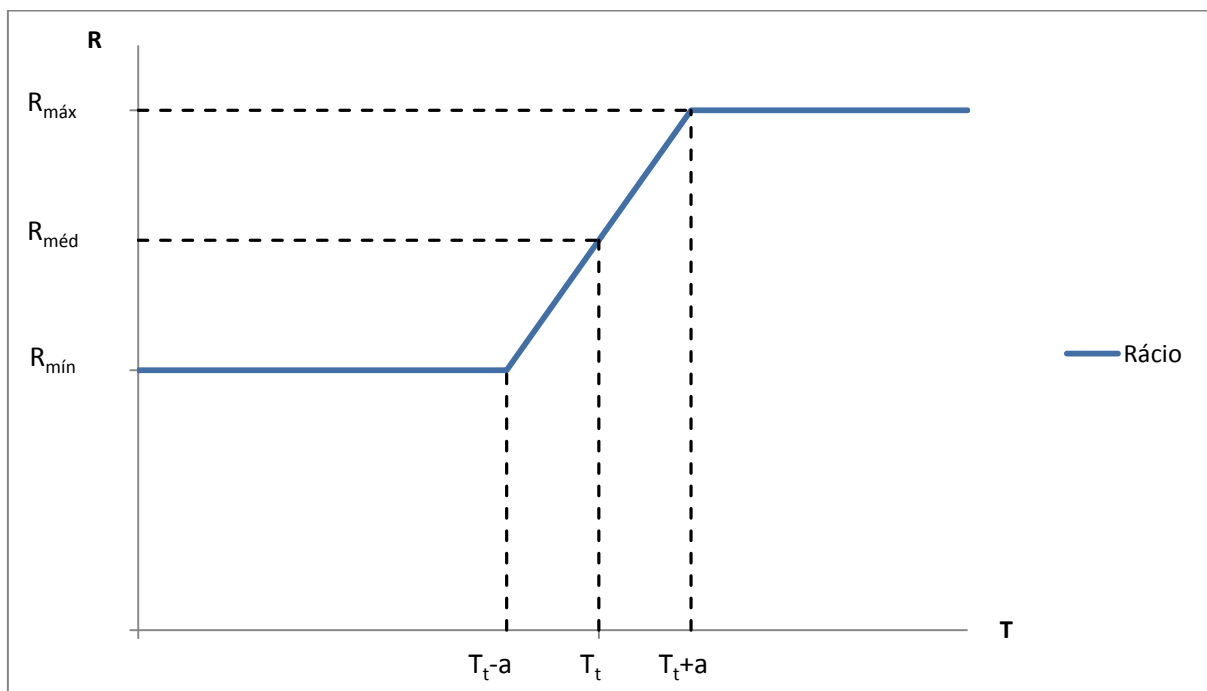


Figura 4-3: Comportamento do rácio  $R_T^{vt}$  em função da temperatura

O valor de  $T_t$  a que se chamou temperatura de transição corresponde à temperatura para a qual o rácio é igual à média de  $R_{mín}$  e  $R_{máx}$ . Esta temperatura depende não só da velocidade de tráfego mas também da penetração. A temperatura de transição pode ser estimada de acordo com a equação (4-21).

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Como se pode observar na Figura 4-3, o rácio é constante para temperaturas inferiores a  $T_t - a$  e para temperaturas superiores a  $T_t + a$ , tomando valores correspondentes a  $R_{mín}$  e  $R_{máx}$  respectivamente. Note-se que a denominação de rácio mínimo e máximo não implica que  $R_{mín}$  seja inferior a  $R_{máx}$ . Esta notação é utilizada pois  $R_{mín}$  é sempre um valor mais próximo da unidade que  $R_{máx}$ .

Entre  $T_t - a$  e  $T_t + a$  o rácio varia linearmente de  $R_{mín}$  para  $R_{máx}$ . O valor de  $a$  encontra-se normalmente no intervalo de 0 a 2. Considerou-se como simplificação que  $a$  é igual a 1 uma vez que este valor tem pouca relevância na eficácia do método em desenvolvimento.

De seguida procedeu-se à determinação de expressões para o cálculo de  $R_{mín}$  e  $R_{máx}$ . Os valores de  $R_{mín}$  e  $R_{máx}$  obtidos de acordo com os resultados do método da SHELL encontram-se resumidos no Quadro 4-4.

Quadro 4-4:  $R_{mín}$  e  $R_{máx}$

$vt$	$R_{mín}$	$R_{máx}$
10	0,7697	0,6901
20	0,8616	0,8097
30	0,9203	0,8890
40	0,9644	0,9499
50	1,0000	1,0000
60	1,0301	1,0429
70	1,0562	1,0806
80	1,0794	1,1144
90	1,1003	1,1450
100	1,1193	1,1732

A representação gráfica destes resultados, assim como as regressões logarítmicas obtidas encontram-se na Figura 4-4.

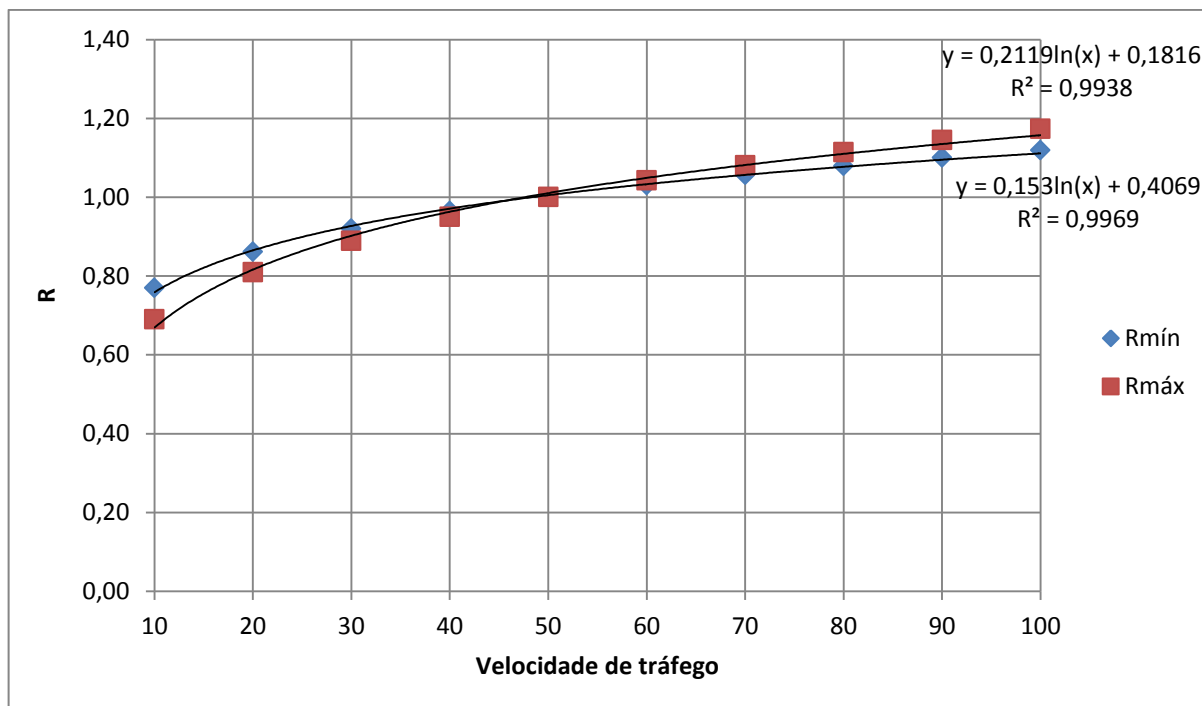


Figura 4-4: Rácio mínimo e máximo em função da velocidade de tráfego

Finalmente, é possível o cálculo de  $R_T^{vt}$  de acordo com a equação (4-19):

$$R_T^{vt} = \begin{cases} 0,153 \times \ln(vt) + 0,4069 & \text{se } T < T_t - 1 \\ 0,1825 \times \ln(vt) + 0,2943 & \text{se } T_t - 1 < T < T_t + 1 \\ 0,2119 \times \ln(vt) + 0,1816 & \text{se } T > T_t + 1 \end{cases} \quad (4-19)$$

Como aproximação para a equação relativa a temperaturas próximas da temperatura de transição adoptou-se a média das equações correspondentes ao rácio mínimo e máximo.

#### 4.3.1.3 Determinação da temperatura de transição $T_t$

Foram calculadas todas as temperaturas de transição e apresentadas no Quadro 4-5. Note-se que os valores correspondentes à velocidade de tráfego igual a 50 km/h não se encontram na tabela, uma vez que é impossível e inútil o cálculo destas temperaturas através da metodologia aplicada (uma vez que nesta situação  $C_{vt}$  é igual a 1 de acordo com a sua definição).

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Quadro 4-5: Temperaturas de transição

		pen25					
vt	40	35	30	25	20	15	10
10	10	11	13	15	17	20	24
20	11	12	14	16	18	21	25
30	12	13	15	16,5	19	22	26
40	12	13,5	15	17	19	22	26,5
60	12,5	14	15,5	17,5	19,5	22,5	27
70	13	14,5	16	17,5	20	23	27,5
80	13	14,5	16	18	20,5	23,5	27,5
90	13,5	15	16,5	18,5	20,5	23,5	28
100	13,5	15	16,5	19,5	21,5	23,5	28
10	10	11	13	15	17	20	24

Estes resultados foram representados graficamente na Figura 4-5.

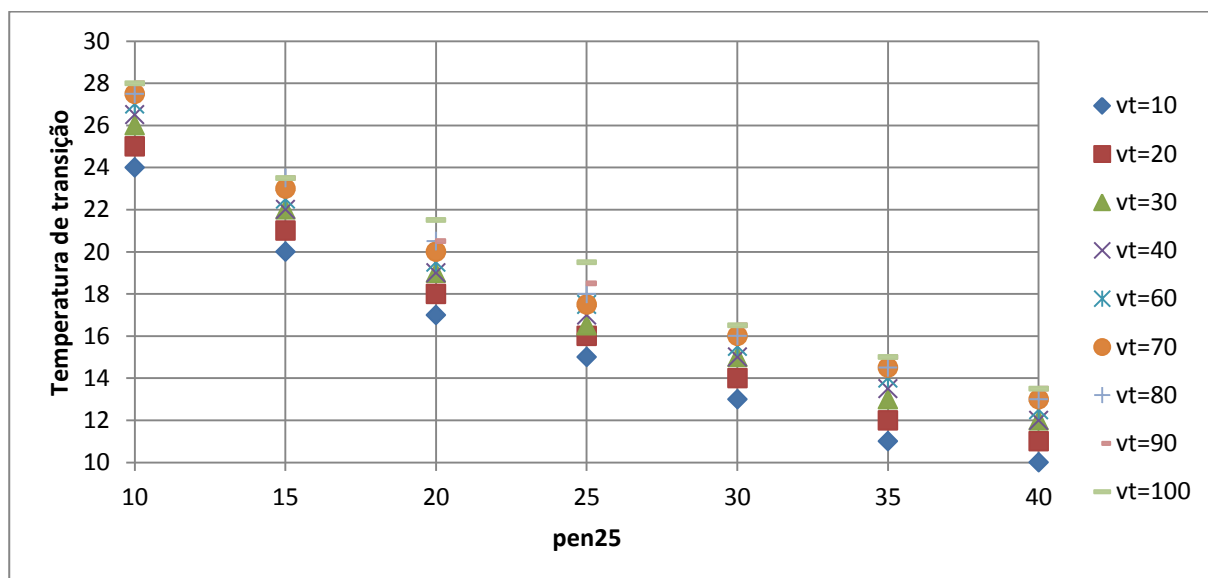


Figura 4-5: Temperatura de transição em função da penetração e da velocidade de tráfego

Seguidamente foram executadas regressões para cada curva da Figura 4-5 com a seguinte estrutura:

$$T_t = a \times \ln(\text{pen25}) + b \quad (4-20)$$

#### 4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade

Os valores de  $a$  e  $b$  encontram-se no Quadro 4-6:

Quadro 4-6: Constantes das regressões de  $T_t$

$vt$	$a$	$b$
10	-10,19	47,566
20	-10,19	48,566
30	-10,23	49,596
40	-10,33	50,129
60	-10,33	50,629
70	-10,36	51,159
80	-10,52	51,857
90	-10,33	51,629
100	-10,35	51,988

Os resultados foram representados graficamente na Figura 4-6:

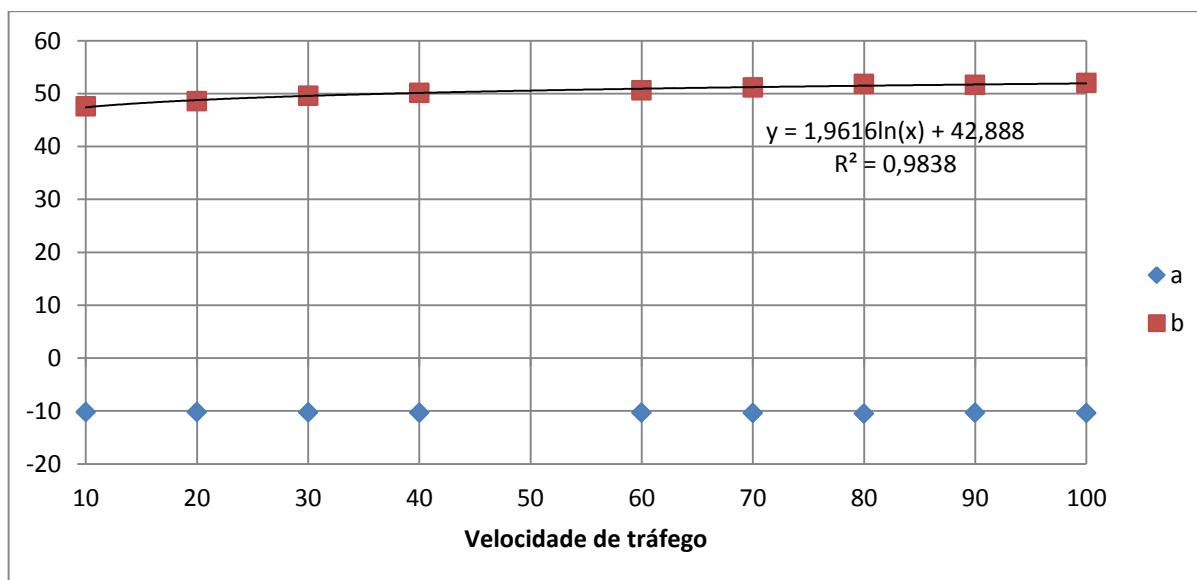


Figura 4-6: Constantes da regressão de  $T_t$  em função da velocidade de tráfego

Uma vez que o valor de  $a$  apresenta variações muito pequenas, considerou-se  $a$  igual a -10,31 que corresponde à média dos valores do Quadro 4-6. Para a determinação de  $b$  recorreu-se a uma regressão logarítmica.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Torna-se então possível o cálculo da temperatura de transição de acordo com a seguinte expressão:

$$T_t = -10,31 \times \ln(\text{pen}_{25}) + 1,9616 \times \ln(vt) + 42,888 \quad (4-21)$$

### 4.3.1.4 Determinação de $C_{va}$

Com a introdução deste factor de correcção pretende-se expandir o domínio da equação (4-14) no que diz respeito à percentagem volumétrica de agregados. Assim, a única constante a considerar nesta fase é um TVB igual a 10%. A abordagem feita para a determinação deste factor é semelhante à utilizada para a obtenção de  $C_{vt}$ . Recorreu-se à equação (4-22) para definir o valor de  $C_{va}$ .

$$\frac{E_T}{E_{25}} = f(T, \text{pen}_{25}) \times C_{vt} \times C_{va} \quad (4-22)$$

Das equações (4-14) e (4-22) pode concluir-se que:

$$\frac{E_T}{E_{25}} = \frac{E_T^{va=85}}{E_{25}^{va=85}} \times C_{va} \quad (4-23)$$

$$C_{va} = \frac{\frac{E_T}{E_{25}}}{\frac{E_T^{va=85}}{E_{25}^{va=85}}} \quad (4-24)$$

À semelhança das equações (4-17) e (4-18):

$$R_T^{va} = \frac{E_T}{E_T^{va=85}} \quad (4-25)$$

$$C_{va} = \frac{R_T^{va}}{R_{25}^{va}} \quad (4-26)$$

Mais uma vez conclui-se que é necessário o cálculo de  $R_T^{va}$  para a determinação de  $C_{va}$ . De acordo com os resultados obtidos pelo método da SHELL representou-se na Figura 4-7 a variação de  $R_T^{va}$  com a temperatura.

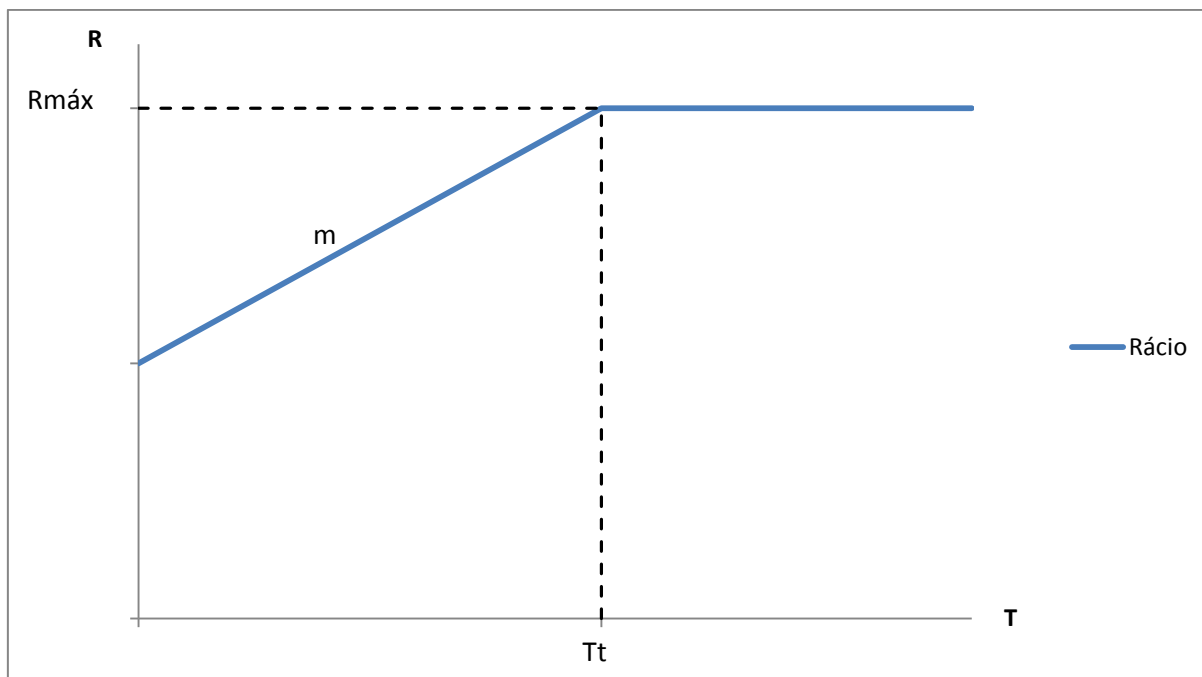


Figura 4-7: Comportamento do rácio  $R_T^{va}$  em função da temperatura

Como se evidência, para temperaturas superiores a  $T_t$  o rácio toma um valor constante. Para temperaturas inferiores a  $T_t$  o rácio tem um comportamento linear. Definiu-se o declive desta recta por  $m$ . Evidenciou-se que a temperatura de transição  $T_t$  relativa a  $R_T^{va}$  toma valores iguais ou muito próximos à temperatura de transição definida no cálculo de  $R_T^{vt}$ . Por este motivo considera-se que o resultado da equação (4-21) pode ser utilizado também neste contexto. Os valores de  $R_{máx}$  foram organizados no Quadro 4-7:

Quadro 4-7:  $R_{máx}$

Percentagem volumétrica de agregados	$R_{máx}$
82	0,7516
83	0,8259
84	0,9083
85	1,0000
86	1,1020
87	1,2156
88	1,3423

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Estes resultados foram organizados no gráfico da Figura 4-8:

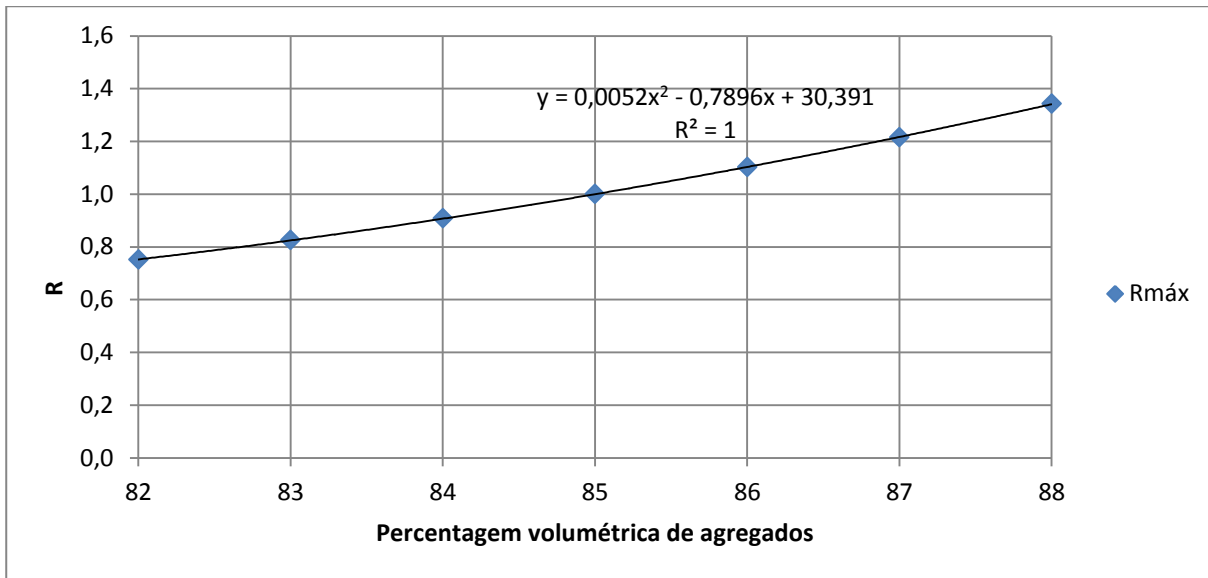


Figura 4-8: Variação de  $R_{máx}$  em função da percentagem volumétrica de agregados

Observa-se que o valor de  $R_{máx}$  pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$R_{máx} = 0,005221 \times va^2 - 0,7896 \times va + 30,391107 \quad (4-27)$$

De seguida foram calculados todos os valores da inclinação  $m$  (um valor para cada combinação de penetração, velocidade de tráfego e percentagem volumétrica de agregado). Interpretando estes valores concluiu-se que os valores de  $m$  têm variações relativamente pequenas em função da penetração e velocidade de tráfego. Por este motivo considerou-se apenas a média das inclinações para cada valor de percentagem volumétrica de agregados. Estas inclinações médias apresentam-se no Quadro 4-8:

Quadro 4-8: Variação do declive  $m$  com  $va$

$va$	$m$
82	-0,00433
83	-0,00320
84	-0,00177
86	0,00217
87	0,00482
88	0,00803

#### 4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade

Estes resultados foram apresentados de forma gráfica e foi feita a sua regressão (Figura 4-9):

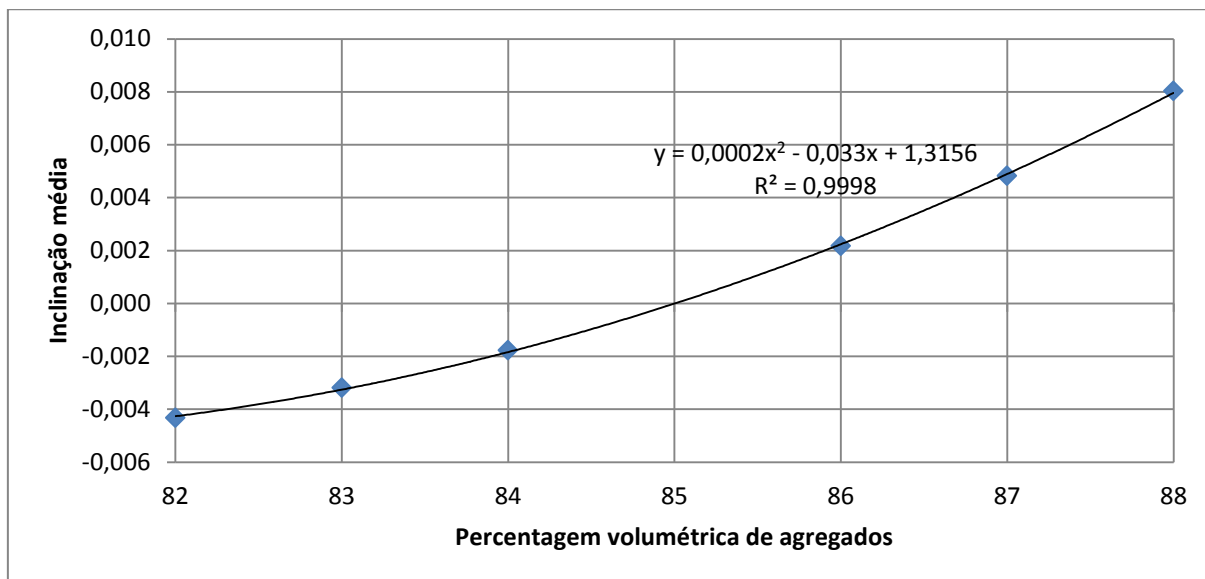


Figura 4-9: Variação da inclinação  $m$  média em função da percentagem volumétrica de agregados

Como se pode observar, a inclinação pode ser obtida de acordo com a equação (4-28):

$$m = 0,000206 \times va^2 - 0,032994 \times va + 1,315606 \quad (4-28)$$

Finalmente recorreu-se à equação (4-29) para definir o valor de  $R_T^{va}$ .

$$R_T^{va} = \begin{cases} R_{máx} + m \times (T - T_t) & \text{se } T < T_t \\ R_{máx} & \text{se } T > T_t \end{cases} \quad (4-29)$$

O uso de  $T - T_t$  como variável tem um efeito de translação do gráfico da Figura 4-7. A Figura 4-10 demonstra esta translação.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

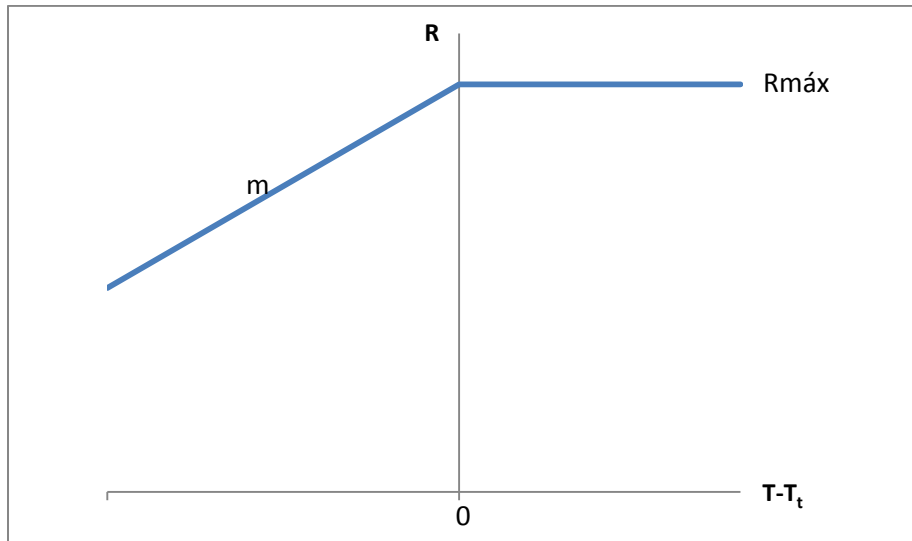


Figura 4-10: Translação do gráfico do rácio  $R_T^{va}$  em função da temperatura

O benefício desta transformação para o cálculo é o facto da ordenada na origem da recta se tornar igual a  $R_{máx}$ , eliminando assim o cálculo desnecessário deste valor.

#### 4.3.1.5 Determinação de $C_{TVB}$

A introdução deste factor de correcção tem o objectivo de alargar o domínio da equação (4-22) no que diz respeito à percentagem volumétrica de betume. Ou seja, nesta fase do cálculo é incorporado todo o domínio previsto para o método em desenvolvimento como descrito no Quadro 4-1. Recorreu-se à equação (4-30) para definir o valor de  $C_{TVB}$ .

$$\frac{E_T}{E_{25}} = f(T, pen_{25}) \times C_{vt} \times C_{va} \times C_{TVB} \quad (4-30)$$

Das equações (4-22) e (4-30) pode concluir-se que:

$$\frac{E_T}{E_{25}} = \frac{E_T^{TVB=10}}{E_{25}^{TVB=10}} \times C_{TVB} \quad (4-31)$$

$$C_{TVB} = \frac{\frac{E_T}{E_{25}}}{\frac{E_T^{TVB=10}}{E_{25}^{TVB=10}}} \quad (4-32)$$

De acordo com esta equação foram calculados os valores de  $C_{TVB}$  de acordo com o método da SHELL. Devido à complexidade deste factor de correcção, optou-se por subdividir o seu cálculo em duas partes: um factor que permita obter  $C_{TVB}$  para uma penetração de  $40 \cdot 10^{-1}$  mm e um segundo factor que afecte o primeiro de modo a torna-lo válido para qualquer penetração. Os valores relativos ao primeiro factor são representados na Figura 4-11.

#### 4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade

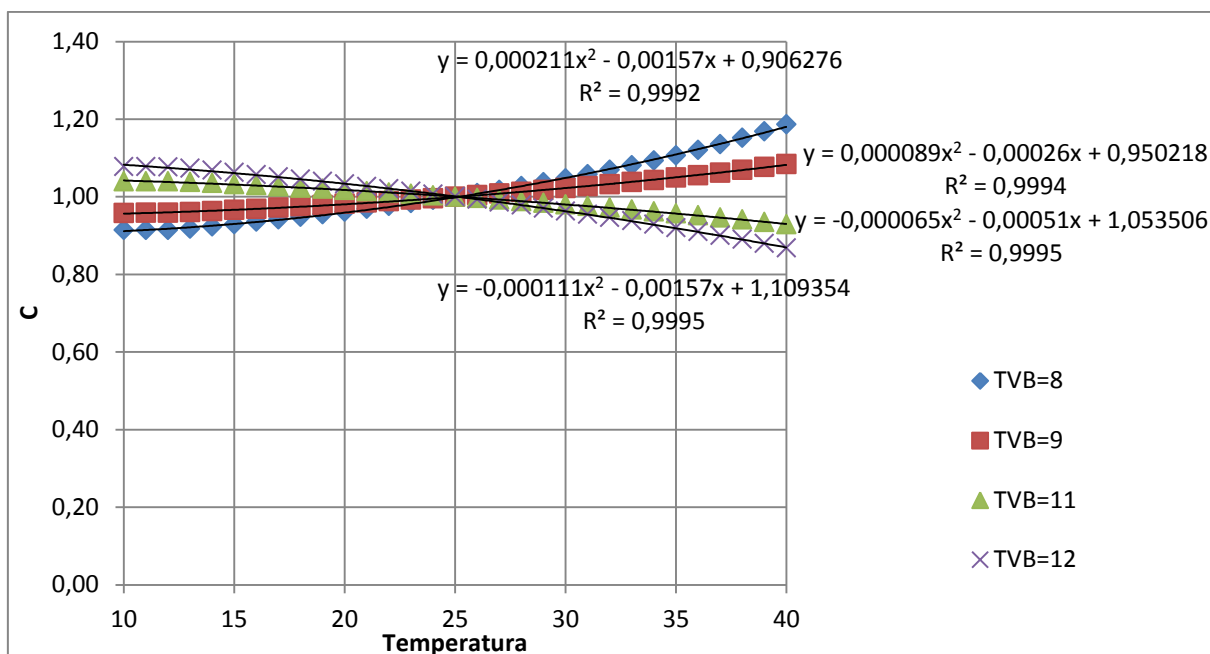


Figura 4-11: Variação do factor de correcção  $C_{TVB}^{pen25=40}$  com a temperatura para uma penetração de  $40 \cdot 10^{-1}$  mm

A partir das regressões desta figura observa-se que o factor  $C_{TVB}$  pode ser calculado recorrendo a uma equação do tipo:

$$C_{TVB}^{pen25=40} = aT^2 + bT + c \quad (4-33)$$

As constantes das regressões foram organizadas no Quadro 4-9:

Quadro 4-9: Constantes da regressão de  $C_{TVB}^{pen25=40}$

TVB	$a$	$b$	$c$	$R^2$
8	0,000211	-0,00157	0,906276	0,9992
9	0,000089	-0,00026	0,950218	0,9994
10	0	0	1	-----
11	-0,000065	-0,00051	1,053506	0,9995
12	-0,000111	-0,00157	1,109354	0,9995

Note-se que foi acrescentada uma linha relativa a um TVB igual a 10 a este quadro, que por definição e desprezando os erros inerentes às fases anteriores do cálculo conduz a um  $C_{TVB}$  constante e igual a 1. Os valores foram representados graficamente na Figura 4-12.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

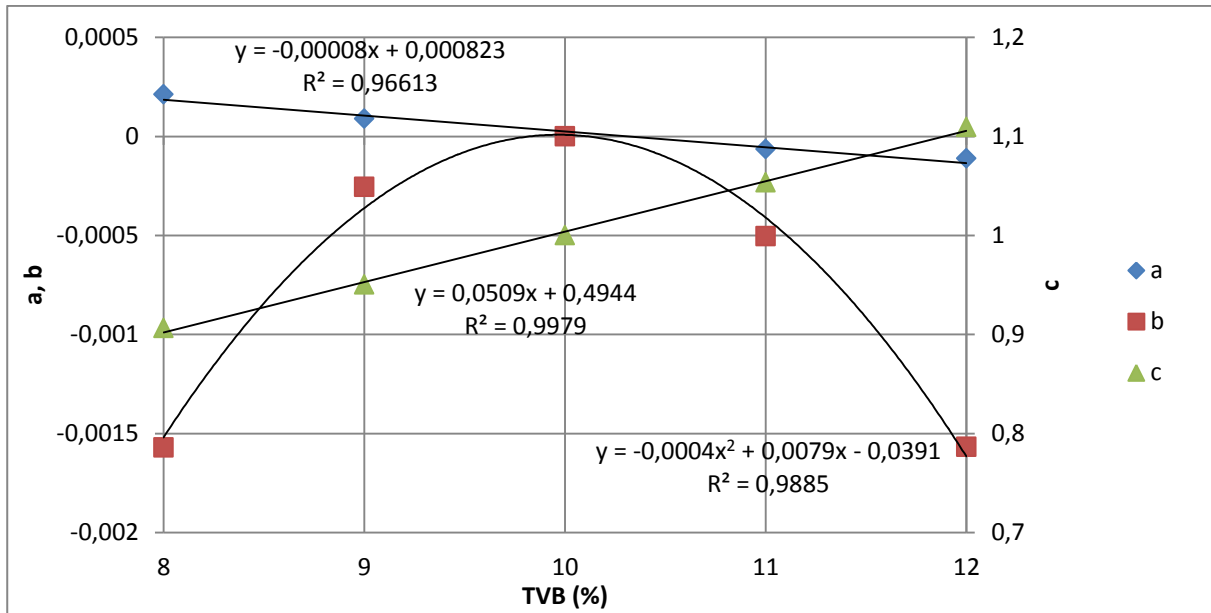


Figura 4-12: Variação das constantes de regressão de  $C_{TVB}$  com o TVB

Assim, de acordo com as regressões da figura anterior é possível obter uma equação que define o comportamento do factor  $C_{TVB}^{pen25=40}$  para todas as situações em que a penetração é igual a  $40 \cdot 10^{-1}$  mm. Essa equação é a seguinte:

$$C_{TVB}^{pen25=40} = (-0,00008 \times TVB + 0,000823) \times T^2 + (-0,0004 \times TVB^2 + 0,0079 \times TVB - 0,0391) \times T + (0,0509 \times TVB + 0,4944) \quad (4-34)$$

Uma vez obtida esta expressão, é agora necessário analisar a influência da variação da penetração no factor  $C_{TVB}$ . Assim, procurou-se obter um factor  $C_{TVB}^{pen25}$  que pode ser obtido de acordo com a equação (4-35):

$$C_{TVB}^{pen25} = \frac{C_{TVB}}{C_{TVB}^{pen25=40}} \quad (4-35)$$

A Figura 4-13 contém uma representação genérica de  $C_{TVB}^{pen25}$  em função da temperatura.

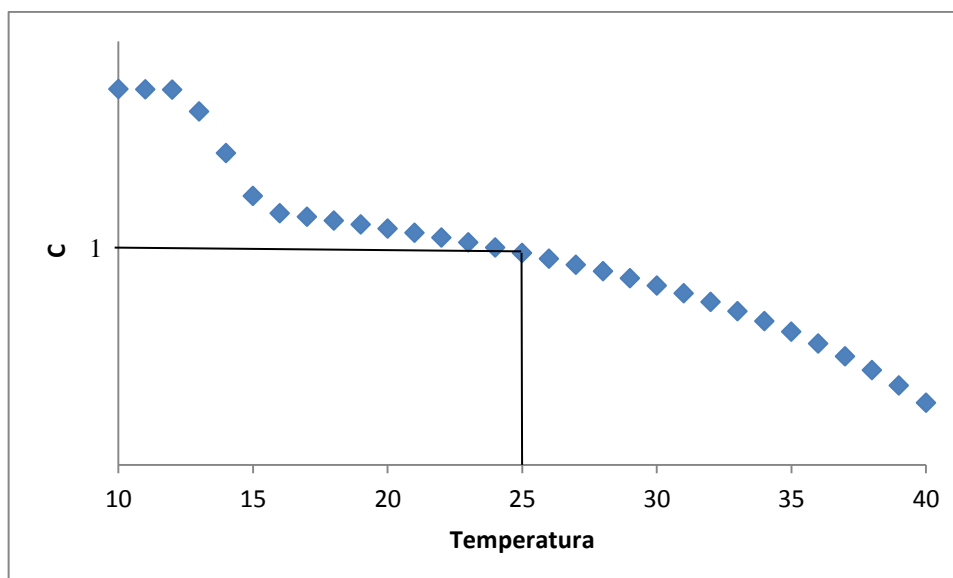


Figura 4-13: Gráfico genérico de  $C_{TVB}^{pen25}$  em função da temperatura

De modo a simplificar o problema, considerou-se que o comportamento deste factor é linear. Utilizando uma simplificação semelhante à representada na Figura 4-10, desenvolveu-se a seguinte equação para o cálculo de  $C_{TVB}^{pen25}$ :

$$C_{TVB}^{pen25} = 1 + m \times (T - 25) \quad (4-36)$$

Os valores de  $m$  foram representados no Quadro 4-10:

Quadro 4-10: Valores de  $m$

$pen25$	$TVB$			
	8	9	11	12
40	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
35	-0,0006	-0,0003	0,0003	0,0005
30	-0,0013	-0,0006	0,0005	0,0010
25	-0,0021	-0,0010	0,0009	0,0017
20	-0,0031	-0,0014	0,0013	0,0025
15	-0,0043	-0,0020	0,0018	0,0035
10	-0,0059	-0,0028	0,0025	0,0048

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Os valores deste quadro foram representados graficamente na Figura 4-14:

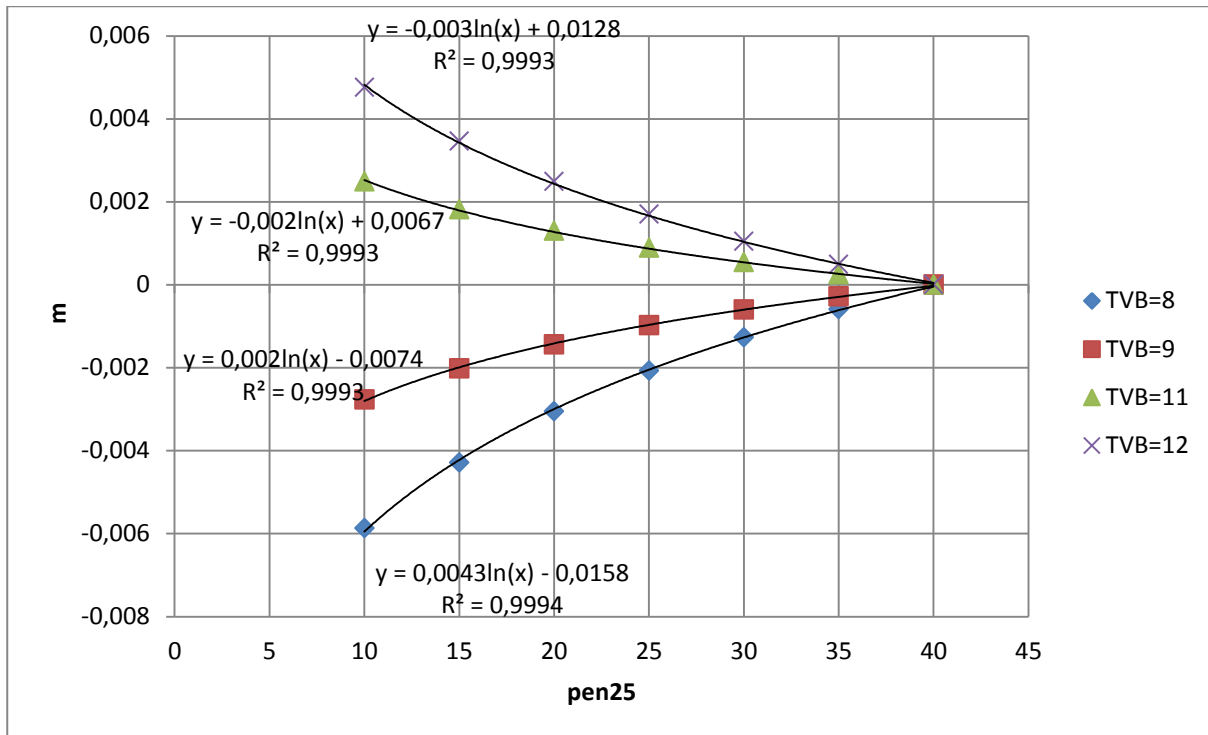


Figura 4-14: Variação de  $m$  em função da penetração

Conclui-se que o comportamento do declive  $m$  pode ser representado por uma função do tipo:

$$m = a \times \ln pen25 + b \quad (4-37)$$

Os valores das constantes desta equação obtidos por regressão do gráfico da Figura 4-14 foram organizados no Quadro 4-11:

Quadro 4-11: Valores das constantes de regressão de  $m$

<i>TVB</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
8	0,0043	-0,0158
9	0,0020	-0,0074
10	0,0000	0,0000
11	-0,0020	0,0067
12	-0,0030	0,0128

#### 4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade

Mais uma vez, acrescentaram-se os valores relativos ao  $TVB$  igual a 10 que por definição devem conduzir a um  $m$  igual a 0. Os valores deste quadro foram representados na Figura 4-15:

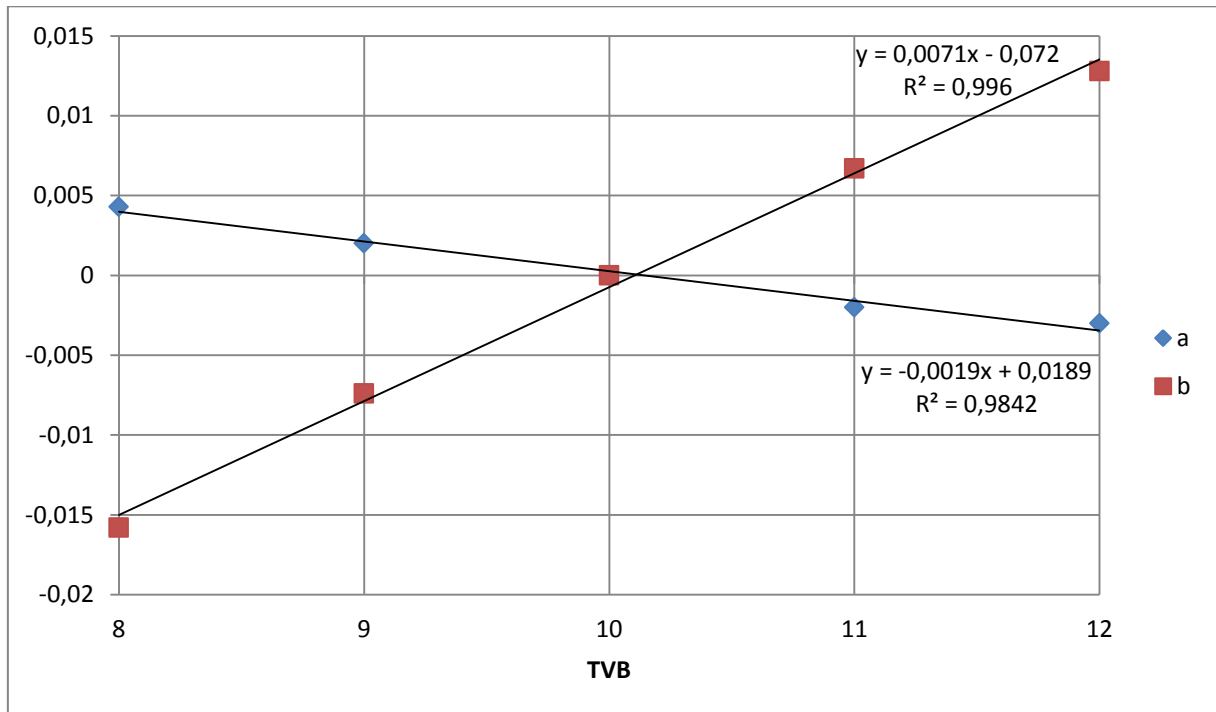


Figura 4-15: Variação das constantes de regressão de  $m$  em função do  $TVB$

Assim conclui-se que:

$$C_{TVB}^{pen25} = 1 + [(-0,0019 \times TVB + 0,0189) \times \ln pen25 + (0,0071 \times TVB - 0,072)] \times (T - 25) \quad (4-38)$$

Observou-se que as variáveis  $va$  e  $vt$  não têm impacto sobre o cálculo de  $C_{TVB}$ . Sendo assim, estão reunidas todas as condições para obter o valor deste factor de acordo com a equação (4-39):

$$C_{TVB} = C_{TVB}^{pen25=40} \times C_{TVB}^{pen25} \quad (4-39)$$

### 4.3.2 Método simplificado

Uma vez que o processo de cálculo desenvolvido para o método geral é bastante complexo surge a necessidade de investigar possíveis modos de o simplificar. Esta tarefa tem o intuito de aumentar a praticabilidade da utilização deste método sem diminuir demasiadamente a precisão dos seus resultados.

Uma rápida análise dos valores observados durante a calibração numérica do método geral demonstrou que, de facto, é possível simplificar o método através da eliminação dos factores de cálculo de menor relevância no resultado final. Para avaliar a relevância dos factores de correcção  $C_{vt}$ ,  $C_{va}$  e  $C_{TVB}$ , analisou-se a frequência relativa da ocorrência das seguintes situações:

- Correcção desnecessária (em que o factor é igual a 1 e portanto não influencia o resultado);
- Correcção pequena (tomando valores entre 0,97 e 1,03);
- Correcção grande (tomando valores inferior a 0,97 ou superiores a 1,03).

Os resultados foram organizados no Quadro 4-12:

Quadro 4-12: Relevância dos factores  $C_{vt}$ ,  $C_{va}$  e  $C_{TVB}$

Factor	Intervalo	Frequência relativa (%)
$C_{vt}$	$C_{vt} = 1$	68,71%
	$0,97 < C_{vt} < 1,03$ (excluindo $C_{vt} = 1$ )	22,68%
	$C_{vt} < 0,97$ ou $C_{vt} > 1,03$	8,61%
$C_{va}$	$C_{va} = 1$	66,91%
	$0,97 < C_{va} < 1,03$ (excluindo $C_{va} = 1$ )	26,94%
	$C_{va} < 0,97$ ou $C_{va} > 1,03$	6,15%
$C_{TVB}$	$C_{TVB} = 1$	0,00%
	$0,97 < C_{TVB} < 1,03$	62,86%
	$C_{TVB} < 0,97$ ou $C_{TVB} > 1,03$	37,14%

Neste quadro observa-se que uma grande parte dos resultados obtidos para  $C_{vt}$  e  $C_{va}$  são iguais a 1. Estes resultados não são surpreendentes tendo em conta as equações que regem o cálculo de cada um dos factores.

#### 4. Métodos de correcção do módulo de deformabilidade

Como é evidente, em todas as situações em que a temperatura  $T$  e a temperatura de referência de 25 °C se encontram no mesmo intervalo da equação (4-19) o factor de correcção  $C_{vt}$  será igual a 1. Assim sendo, o factor de correcção não terá qualquer impacto no resultado final.

A correcção  $C_{va}$  encontra-se numa situação semelhante, sendo igual a 1 em todas as situações em que a temperatura  $T$  e a temperatura de referência são ambas maiores do que a temperatura de transição.

Outra observação a retirar do Quadro 4-12, relativamente a estas duas correcções é o facto de apenas uma pequena percentagem dos casos analisados conduzir a correcções grandes (8,61% para  $C_{vt}$  e 6,15% para  $C_{va}$ ). Todos estes dados em conjunto demonstram que a utilização destas duas correcções tem pouca pertinência nos resultados deste método e portanto podem ser eliminadas do processo de cálculo sem um prejuízo significativo da eficácia.

O factor  $C_{TVB}$  mostra uma maior relevância para o método. Ao contrário dos outros, este factor nunca se revela completamente desnecessário e em 37,14% dos casos analisados constitui uma correcção grande. No entanto, observou-se que apenas em 19,54% dos casos se verifica uma correcção superior a 5% (fora do intervalo de 0,95 a 1,05). Verifica-se assim uma diminuição bastante rápida do número de casos à medida que se alarga o intervalo definido como uma correcção pequena. Por este motivo e pelo elevado grau de complexidade do cálculo de  $C_{TVB}$ , considera-se que a determinação deste factor não é fundamental para o método, embora seja indubitável o seu benefício.

Uma vez que os três factores de correcção foram suprimidos pelas razões expostas, resta apenas procurar a melhoria da função  $f(T, pen25)$ . Tal como mencionado anteriormente, a função  $f(T, pen25)$  obtida é válida para uma velocidade de tráfego de 50 km/h. No entanto, de acordo com a JAE (1995), a velocidade a considerar em projecto é de 60 km/h. Assim, se a calibração da função  $f(T, pen25)$  for realizada com base nesta velocidade os resultados obtidos ajustar-se-ão melhor à realidade. Todavia, optou-se por calibrar a função com base numa velocidade de tráfego igual a 66,67 km/h.

Esta escolha permitirá uma melhor comparação entre a eficácia da calibração numérica e da calibração prática, uma vez que são conhecidos os dados experimentais relativos a esta velocidade que corresponde à frequência de carregamento de 10 Hz, de acordo com a equação (2-25). O erro produzido por este aumento da velocidade é insignificante a nível da eficácia do método, já que se trata de um aumento relativamente pequeno e, como se demonstrou, a variável em questão não afecta grandemente o resultado.

#### 4.3.2.1 Calibração para resultados numéricos

Tendo todas as simplificações mencionadas em consideração, procurou-se calibrar novamente a equação (4-13). Para isso recorreu-se à utilização do suplemento *Solver* do *Microsoft Excel* para encontrar novas constantes para esta equação de modo a minimizar o erro relativo entre o seu resultado e o resultado alcançado numericamente.

$$\frac{E_T}{E_{25}} = \begin{cases} 1 + (0,1218 \times pen25 + 1,1513) \times \log \frac{25}{T} & \text{para } T < 25^\circ C \\ 1 + (0,0308 \times pen25 + 3,2003) \times \log \frac{25}{T} & \text{para } T > 25^\circ C \end{cases} \quad (4-40)$$

#### 4.3.2.2 Calibração para resultados experimentais

Antes de se proceder à calibração de acordo com os resultados experimentais analisou-se a eficácia que o método desenvolvido de acordo com os resultados numéricos teria quando aplicado aos dados obtidos experimentalmente. Este teste demonstrou erros astronómicos nos resultados obtidos, verificando-se então a necessidade de uma nova calibração.

Uma vez que os diversos ensaios a partir dos quais se obtiveram os resultados experimentais têm na maioria dos casos condições bastante diferentes, uma análise dos efeitos de cada variável separadamente como a realizada para o método geral torna-se impossível.

A calibração deste método para resultados experimentais foi realizada de modo idêntico à calibração numérica. Apresenta-se a seguir a expressão calibrada para valores experimentais.

$$\frac{E_T}{E_{25}} = \begin{cases} 1 + (0,0761 \times pen25 + 0,0403) \times \log \frac{25}{T} & \text{para } T < 25^\circ C \\ 1 + (0,0010 \times pen25 + 3,0747) \times \log \frac{25}{T} & \text{para } T > 25^\circ C \end{cases} \quad (4-41)$$

### 4.3.3 Método com optimização

O procedimento aplicado para a construção deste método foi de tentativa e erro. Foram idealizados diversos modelos de equações simples, cujas constantes foram ajustadas de modo a minimizar o valor médio do erro relativamente aos resultados (quer numéricos, quer experimentais). Para isso recorreu-se mais uma vez ao *Solver*.

Os dados utilizados em ambas as calibrações foram limitados a situações correspondentes a uma frequência de carregamento de 10 Hz à semelhança do método simplificado.

Todas as equações obtidas por este processo foram comparadas sendo a mais apropriada a equação escolhida para constituir o método com optimização. Os modelos testados foram os seguintes:

$$\frac{E_T}{E_{25}} = k_1 \times pen25^{k_2} + k_3 \times va^{k_4} + k_5 \times TVB^{k_6} + k_7 \times T^{k_8} \quad (4-42)$$

$$\frac{E_T}{E_{25}} = k_1 \times pen25^{k_2} \times va^{k_3} \times TVB^{k_4} \times T^{k_5} \quad (4-43)$$

$$\frac{E_T}{E_{25}} = k_1 \times e^{pen25 \times k_2 + va \times k_3 + TVB \times k_4 + T \times k_5} \quad (4-44)$$

sendo:

$k_i$  – constantes ajustadas pelo *Solver*.

O melhor modelo obtido, tendo em conta a precisão e simplicidade foi o descrito na equação (4-44). Embora não minimize o erro obtido, esta solução oferece o melhor compromisso entre simplicidade e precisão. Tal como referido, a calibração destes modelos foi desenvolvida com base em resultados numéricos e resultados experimentais. Os resultados destas calibrações apresentam-se nas equações (4-45) (4-46), respectivamente:

$$\frac{E_T}{E_{25}} = 5,6552 \times e^{-pen25 \times 0,0001 + va \times 0,0028 + TVB \times 0,0004 - T \times 0,0803} \quad (4-45)$$

$$\frac{E_T}{E_{25}} = 0,0011 \times e^{pen25 \times 0,0056 + va \times 0,0922 + TVB \times 0,0096 - T \times 0,0602} \quad (4-46)$$

#### 4.3.4 Método com Redes Neurais Artificiais

Como o nome indica este método tem como base a aplicação de redes neurais artificiais na resolução do problema. Resumidamente, uma rede neural artificial é um sistema computacional que processa informação de modo semelhante ao cérebro humano. Os diversos elementos pertencentes à rede (neurónios) são organizados de acordo com uma estrutura. Entre esses neurónios são criadas diversas ligações associadas a um determinado peso. A Figura 4-16 e a Figura 4-17 representam uma rede neural artificial genérica e um dos seus neurónios, respectivamente.

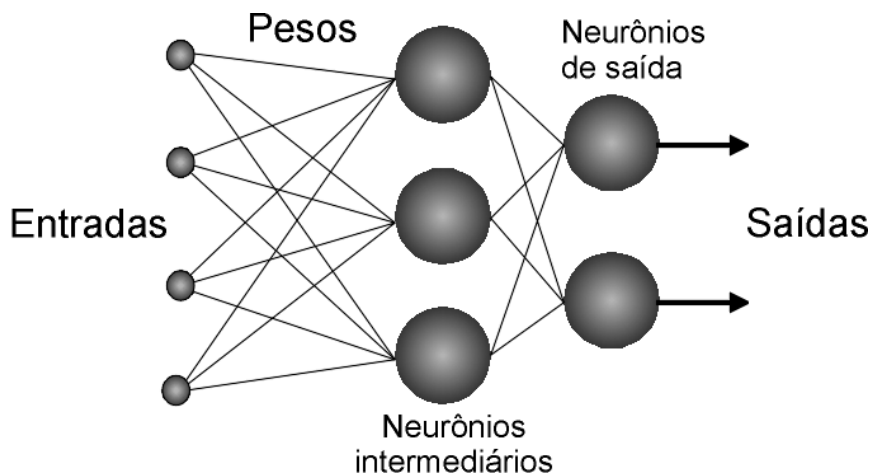


Figura 4-16: Estrutura genérica de uma rede neural artificial

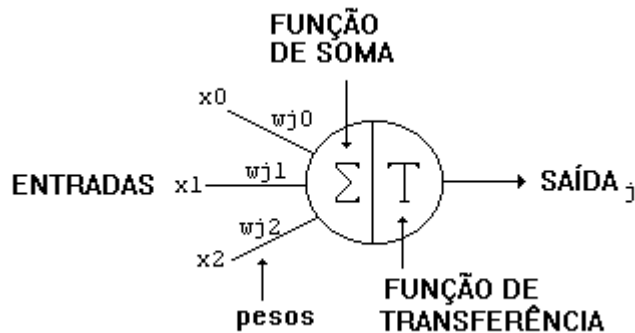


Figura 4-17: Neurónio genérico de uma rede neural artificial

Tendo como base estes pressupostos, é possível “treinar” redes neurais para que constituam um algoritmo adequado à resolução de um problema, tendo como base unicamente um conjunto de dados que inclui as diversas variáveis independentes e dependentes pertinentes ao problema em questão.

Para o desenvolvimento de uma rede neural artificial normalmente dividem-se aleatoriamente os elementos desta amostra total de dados em três tipos:

- Amostras de treino: é com base nestas amostras que a rede treina o algoritmo de resolução, fazendo ajustes com base no erro de cálculo destes valores;
- Amostras de validação: usadas para medir o grau de generalização da rede e para concluir o treino quando a generalização parar de melhorar;
- Amostras de teste: que não têm qualquer impacto no treino da rede e portanto funcionam como um bom indicador do desempenho da rede na resolução do problema.

Além disso, na fase de desenvolvimento das redes neurais artificiais é importante escolher um número de neurónios adequado. Um número elevado de neurónios permite uma maior complexidade da rede e consequentemente a obtenção de resultados mais próximos dos pretendidos. No entanto um maior número de neurónios leva inevitavelmente a uma maior complexidade de cálculo na aplicação da rede construída. Mais uma vez, foram apenas considerados dados relativos a uma frequência de carregamento de 10 Hz para a calibração.

#### 4.3.4.1 Calibração para resultados numéricos

O desenvolvimento da rede neural artificial que constitui este método foi executado através da função *Neural Network Fitting Tool* do programa *Matlab*. O número de neurónios escolhido foi igual a 20. A Figura 4-18 representa o modelo estrutural da rede concebida.

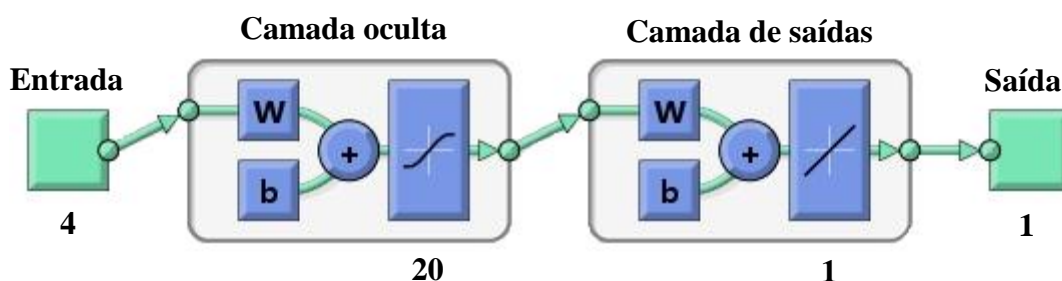


Figura 4-18: Rede neural artificial utilizada na calibração

Como se pode observar, existem 4 variáveis independentes que fazem parte da Entrada e 20 neurónios numa Camada oculta. Os cálculos efectuados nesta camada oculta geram um único valor numa Camada de saídas que conduz à Saída.

A divisão escolhida para a amostra apresenta-se no Quadro 4-13.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Quadro 4-13: Amostras de treino, validação e teste da rede neural

Tipo de amostra	Percentagem da amostra total
Treino	70%
Validação	15%
Teste	15%

Uma vez definido o número de neurónios a utilizar e a repartição da amostra total procedeu-se ao treino da rede neural. Note-se que o processo de treino pode ser repetido, conduzindo a uma rede neural ligeiramente diferente. Tendo este aspecto em conta, repetiu-se o treino múltiplas vezes com o intuito de minimizar os erros obtidos no treino na validação e nos testes. Os erros obtidos foram bastante reduzidos, motivo pelo qual se pode concluir que o número de neurónios utilizado foi adequado e que a rede é de facto eficaz na resolução do problema.

### 4.3.4.2 Calibração para resultados experimentais

A metodologia utilizada para a calibração de resultados experimentais foi idêntica à usada na calibração teórica, excepto no que diz respeito à matriz de variáveis independentes e dependentes sobre a qual se desenvolve a rede.

Obteve-se uma rede neural artificial com uma boa aproximação aos resultados pretendidos. A seguir ao desenvolvimento desta rede, procurou-se comprovar a sua validade. Para isso, a rede foi testada considerando diversos conjuntos de variáveis independentes aleatórias. Embora os resultados correspondentes a estes conjuntos de dados sejam desconhecidos, podem ser avaliados de forma crítica com base na experiência e em métodos já desenvolvidos.

Este estudo permitiu encontrar algumas incoerências entre os resultados reais e os resultados obtidos pelo método em questão. Considere-se, como exemplo, uma situação em que a penetração corresponde a  $40.10^{-1}$  mm, a percentagem volumétrica de agregados é de 82%, a percentagem volumétrica de betume é de 10% e a temperatura de ensaio é 25 °C. Uma vez que nesta situação a temperatura de ensaio é igual à temperatura de referência, a correcção a aplicar deverá ser igual a 1, ou seja:

$$\frac{E_{T=25}}{E_{25}} = 1 \quad (4-47)$$

No entanto, de acordo com a rede neural verifica-se a seguinte situação:

$$\frac{E_{T=25}}{E_{25}} = 1,4547 \quad (4-48)$$

Como se pode verificar, há um grande erro neste caso. Esta situação verificou-se diversas vezes ao longo dos testes. O erro advém da reduzida amostra de dados para o desenvolvimento da rede. É importante notar que no conjunto de dados utilizado, o valor mínimo de percentagem volumétrica de agregados é de 85,8%. Deduz-se por isso que a rede só é válida dentro dos intervalos de dados utilizados no seu treino.

Com o intuito de diminuir os erros deste tipo foi desenvolvida uma nova rede neural artificial. Esta nova rede é idêntica à rede descrita anteriormente, tendo apenas uma diferença: foi integrado na amostra um conjunto de dados em que a temperatura é sempre igual a 25 °C, as outras variáveis independentes variam de acordo com os domínios e intervalos definidos no Quadro 4-1 e o resultado é igual a 1. A introdução destes dados na amostra vicia a rede de modo a ter em conta que qualquer que seja a situação, desde que a temperatura em questão seja igual a 25 °C a correcção necessária é igual a 1. É importante mencionar que estes dados foram adicionados apenas à amostra de desenvolvimento da rede neural e não foram incluídos nas subsequentes análises de erro deste método, uma vez que poderiam comprometer a correcta análise do erro.

A rede obtida apresenta um pequeno aumento do erro relativamente à primeira rede desenvolvida, no que diz respeito aos dados experimentais. Este erro é perfeitamente aceitável tendo em conta que se ganhou em contrapartida uma maior consistência na utilização da rede.

Verificou-se no entanto que os erros não foram eliminados por completo, uma vez que de acordo com a rede desenvolvida, sobre determinadas condições e contrariamente ao que acontece na realidade, um aumento de temperatura conduz a um aumento do módulo de deformabilidade. Mais uma vez, a causa desta situação é a reduzida amostra de dados utilizados na calibração. A inclusão de resultados experimentais correspondentes a temperaturas diferentes de 15 °C, 25 °C e 40 °C na calibração poderia corrigir esta questão.

#### **4.4 Desenvolvimento da aplicação CMod**

O grau de complexidade ligado à utilização de alguns dos métodos de correcção desenvolvidos é muito elevado. Além disso, no caso particular dos métodos com redes neurais artificiais, a aplicação é mesmo impossível quando o *software* necessário não se encontra disponível. Por estes motivos desenvolveu-se um programa que automatiza todos os métodos estudados e desenvolvidos nesta dissertação. A descrição deste programa é feita em pormenor no Apêndice B desta dissertação.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO  
DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

## **5. Estudo comparativo dos métodos de correcção do módulo**

### **5.1 Introdução**

Neste capítulo pretende-se fazer um balanço entre as vantagens e desvantagens dos diversos métodos. É realizada uma comparação entre resultados obtidos pelos diversos métodos estudados no Capítulo anterior desta dissertação. Além disso, analisa-se o erro inerente a cada um destes métodos. Finalmente, escolhe-se o melhor método para a correcção do módulo de deformabilidade.

### **5.2 Exemplos de aplicação**

Neste subcapítulo pretende-se analisar e comparar os resultados dos diversos métodos estudados. Para isso definiram-se 18 casos cujas condições são apresentados no Quadro 5-1. Para todos os casos considerou-se uma penetração a 25 °C de  $40 \cdot 10^{-1}$  mm, uma velocidade de tráfego de 66,67 km/h, uma percentagem volumétrica de agregados de 86%, uma percentagem volumétrica de betume de 10%.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Quadro 5-1: Casos analisados

Caso	Temperatura de ensaio (°C)	Temperatura de serviço (°C)	Módulo de deformabilidade para a temperatura de ensaio (MPa)
1	15	22	16000
2	15	25	16000
3	15	28	16000
4	35	22	2500
5	35	25	2500
6	35	28	2500
7	15	22	13000
8	15	25	13000
9	15	28	13000
10	35	22	2000
11	35	25	2000
12	35	28	2000
13	15	22	10000
14	15	25	10000
15	15	28	10000
16	35	22	1500
17	35	25	1500
18	35	28	1500

Para todos estes casos calcularam-se os módulos de deformabilidade correspondentes à temperatura de serviço de acordo com os vários métodos examinados. Os resultados foram organizados nos três quadros seguintes. O Quadro 5-2 apresenta os resultados de acordo com os métodos propostos por outros autores. O Quadro 5-3 apresenta os resultados obtidos de acordo com os métodos desenvolvidos ao longo desta dissertação e calibrados para resultados numéricos. Finalmente o Quadro 5-4 apresenta os resultados de acordo com os métodos desenvolvidos nesta dissertação e calibrados para resultados experimentais.

5. Estudo comparativo dos métodos de correção do módulo

Quadro 5-2: Exemplos dos métodos propostos por outros autores

Módulo de deformabilidade à temperatura de serviço de acordo com o método					
Caso	BELLS3	Picado-Santos et al.	Antunes	Ali et al.	Ullidtz e Peattie
1	11406	9030	12938	12429	12317
2	9866	6816	11626	11154	11087
3	8533	5004	10313	10009	9997
4	4687	10745	4461	3996	3922
5	4055	8111	4008	3586	3530
6	3507	5954	3556	3218	3183
7	9267	7336	10512	10098	10007
8	8016	5538	9446	9062	9008
9	6933	4065	8380	8133	8123
10	3750	8596	3568	3197	3137
11	3244	6489	3206	2869	2824
12	2806	4763	2845	2575	2547
13	7129	5643	8086	7768	7698
14	6166	4260	7266	6971	6930
15	5333	3127	6446	6256	6248
16	2812	6447	2676	2398	2353
17	2433	4866	2405	2152	2118
18	2104	3573	2133	1931	1910

Como se pode observar, os resultados obtidos de acordo com os métodos de Antunes, Ali et al, Ullidtz e Peattie e BELLS3 são bastante coerentes. O mesmo não acontece com o método proposto por Picado-Santos et al. cujos resultados se afastam bastante da tendência observada. Isto faz sentido uma vez que este método é baseado em resultados numéricos obtidos pelo método da SHELL, contrariamente aos restantes quatro métodos que têm como base resultados experimentais.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Quadro 5-3: Exemplos dos métodos desenvolvidos (calibração numérica)

Módulo de deformabilidade à temperatura de serviço de acordo com o método				
Caso	Geral	Simplificado	Com optimização	Com Redes Neurais
1	9147	9138	8294	9030
2	6874	6847	6661	6823
3	5227	5354	5484	5019
4	11465	9466	5545	10751
5	8616	7094	4453	8123
6	6552	5546	3666	5974
7	7432	7424	6739	7337
8	5585	5563	5412	5544
9	4247	4350	4456	4078
10	9172	7573	4436	8600
11	6893	5675	3562	6498
12	5241	4437	2933	4780
13	5717	5711	5184	5644
14	4296	4280	4163	4264
15	3267	3346	3427	3137
16	6879	5680	3327	6450
17	5170	4256	2672	4874
18	3931	3328	2200	3585

Quanto à calibração numérica dos novos métodos observa-se que os resultados obtidos recorrendo ao método geral, ao método simplificado e ao método com redes neurais são muito coerentes para situações de baixa temperatura de ensaio. Nas situações de alta temperatura as diferenças tornam-se mais aparentes.

## 5. Estudo comparativo dos métodos de correcção do módulo

Quadro 5-4: Exemplos dos métodos desenvolvidos (calibração experimental)

Módulo de deformabilidade à temperatura de serviço de acordo com o método			
Caso	Simplificado	Com optimização	Com Redes Neurais
1	11125	9749	15155
2	9498	8263	9967
3	8042	7136	7740
4	5375	4558	8119
5	4589	3863	5339
6	3885	3337	4147
7	9039	7921	12314
8	7717	6713	8098
9	6534	5798	6289
10	4300	3647	6495
11	3671	3091	4271
12	3108	2669	3317
13	6953	6093	9472
14	5936	5164	6229
15	5026	4460	4838
16	3225	2735	4871
17	2753	2318	3204
18	2331	2002	2488

Relativamente à calibração experimental observa-se que o método com redes neurais tende a sobre estimar o módulo em casos com temperaturas de projecto baixas. Esta situação está ligada à insuficiente amostra utilizada na calibração do método com redes neurais.

### 5.3 Comparação da precisão dos resultados dos diversos métodos

Uma vez definidos os níveis de precisão do Quadro 3-6, torna-se possível a análise objectiva do erro inerente a cada um dos métodos analisados anteriormente. Para esta avaliação consideraram-se dois indicadores para o erro de cada método: a média do erro relativo, cuja função será mostrar a eficácia do método em geral e o desvio padrão do erro relativo, que permite estimar a dispersão do erro. O Quadro 5-5 apresenta os valores obtidos para estes indicadores, para cada metodologia.

Quadro 5-5: Avaliação dos erros relativos de cada método

Método	Calibração	Média do erro relativo (%)	Desvio padrão do erro relativo (%)	Nível de precisão do tempo de vida útil
BELLS3	Numérica	27,36%	34,21%	Precisão baixa
	Experimental	17,62%	21,38%	Precisão baixa
Picado-Santos et al.	Experimental	72,17%	104,05%	Sem precisão
Antunes	Numérica	39,46%	46,35%	Sem precisão
	Experimental	17,80%	21,43%	Precisão baixa
Ali et al.	Numérica	40,08%	49,46%	Sem precisão
	Experimental	28,68%	36,07%	Precisão baixa
Ullidtz e Peattie	Numérica	39,52%	49,32%	Sem precisão
	Experimental	29,34%	37,00%	Precisão baixa
Método geral	Numérica	4,68%	4,19%	Precisão alta
Método Simplificado	Numérica	6,45%	6,34%	Precisão alta
	Experimental	10,46%	13,69%	Precisão média
Método com optimização	Numérica	17,10%	18,23%	Precisão média
	Experimental	13,65%	15,15%	Precisão média
Método com Redes Neurais Artificiais	Numérica	2,70%	4,52%	Precisão muito alta
	Experimental	6,95%	10,40%	Precisão alta

## 5. Estudo comparativo dos métodos de correcção do módulo

Note-se que não é apresentada neste quadro a calibração numérica do método proposto por Picado-Santos et al. uma vez que este método é a base da calibração numérica e, consequentemente, o erro associado a esta situação é igual a 0%. Além disso, é importante mencionar que para a análise do erro médio e desvio padrão das calibrações numéricas recorreu-se a uma amostra mais limitada do que a utilizada no desenvolvimento do método geral, uma vez que seria incorrecto considerar um domínio que não é comum a todos os métodos desenvolvidos. A amostra analisada é descrita no Quadro 5-6:

Quadro 5-6: Limitação do domínio da amostra para cálculo do erro

Variável	Intervalo	Passo
Temperatura	10 a 35 °C	5 °C
Penetração a 25 °C	10 a 40 $10^{-1}$ mm	5 $10^{-1}$ mm
Velocidade de tráfego	66,67 km/h	-
Percentagem volumétrica de agregados	82 a 88%	1%
Teor volumétrico de betume	8 a 12%	1%

Inicialmente foi incluída a temperatura de 40 °C na análise. No entanto, os resultados obtidos demonstraram que numa grande parte dos casos relativos a esta temperatura (tanto numa situação de ensaio como de serviço) surgiram enormes erros, aumentando drasticamente o valor médio do erro. Este facto poderia levar a uma avaliação incorrecta da eficácia dos métodos. Além disso, no caso específico de Portugal e de acordo com Baptista et al. (2002), a temperatura de serviço nunca atinge os 40 °C. Sendo assim, e como temperaturas de ensaio de 40 °C podem ser evitadas excepto nos meses mais quentes do ano, optou-se por eliminar completamente esta temperatura da amostra da análise do erro médio e desvio padrão. Os erros do método BELLS3 foram medidos de acordo com um *slope* igual a -0,021.

Como se observa no Quadro 5-5, no que diz respeito à calibração numérica, o método simplificado apresenta um erro médio marginalmente maior que o erro médio obtido de acordo com o método complexo. Além disso, o método simplificado será menos fiável visto que em casos pontuais onde ocorra uma acumulação de erros devido à supressão dos três factores de correcção, o erro obtido pode ser bastante grande. Esta diminuição da fiabilidade é comprovada pelo aumento do desvio padrão. Quanto à calibração experimental do método simplificado, o erro relativo obtido é superior ao erro da calibração para resultados numéricos. Tendo em consideração que os ensaios experimentais nos quais se baseia a calibração apresentam por vezes resultados bastante diferentes para as mesmas condições, atingindo por vezes diferenças superiores a 1000 MPa, este aumento do erro é natural.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

O método que proporciona os resultados mais exactos na calibração experimental foi o método simplificado. O erro apresentado para o método simplificado não é inferior ao erro do método com redes neurais. No entanto este método é aplicável apenas com recurso a *software* e, como já se referiu apresenta erros bastante gravosos para temperaturas diferentes das analisadas. Todavia note-se que as redes neurais apresentam um grande potencial na solução deste tipo de problemas, podendo mesmo ser o melhor método se a base de dados utilizada na sua calibração for mais refinada. A nível dos métodos desenvolvidos por outros autores demonstra-se que o método BELLS3 é o mais apropriado, sendo simultaneamente o mais simples e o mais exacto.

Para a calibração numérica, o método mais apropriado é o método com redes neurais. O facto de este método apresentar os resultados mais precisos demonstra a grande adaptabilidade das redes neurais artificiais. O segundo e terceiro métodos mais eficientes são o método geral e o método simplificado, respectivamente. Conclui-se no entanto que o método simplificado é o mais conveniente dos dois, uma vez que, exceptuando situações em que se deseja uma precisão máxima, o ganho ao nível da exactidão do resultado não justifica a utilização do método geral e o consequente aumento da complexidade de cálculo. Observou-se ainda que os métodos desenvolvidos por outros autores apresentam enormes erros relativamente à calibração numérica, o que faz sentido, tendo em conta que foram, na maioria dos casos, desenvolvidos com base em resultados experimentais. Isto demonstra mais uma vez a impossibilidade de compatibilizar os dois tipos de resultados (numéricos e experimentais) num só método.

Concluindo, para a resolução de problemas de correcção do módulo de deformabilidade com a temperatura propõe-se a utilização do método simplificado calibrado para resultados experimentais e descrito pela equação (4-41), uma vez que apresenta o melhor compromisso entre as várias vantagens e desvantagens discutidas.

## **6. Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros**

### **6.1 Síntese do trabalho e conclusões gerais**

O desenvolvimento desta dissertação tinha como principal objectivo o estudo dos métodos de correcção do módulo de deformabilidade existentes e o desenvolvimento de novas metodologias.

No Capítulo 2 foram descritos diversos conceitos importantes no âmbito de misturas betuminosas, com especial consideração ao módulo de deformabilidade e aos factores que o influenciam. Apresentaram-se ainda diversos métodos experimentais e numéricos de determinação do módulo. Verificou-se que os diversos métodos têm pressupostos bastante diferentes e, conseqüentemente, podem conduzir a resultados distintos, o que dificulta consideravelmente a determinação desta característica. Além disso estudou-se a resistência à fadiga e à deformação permanente de pavimentos flexíveis.

No Capítulo 3 desenvolveu-se o tema da conservação e reabilitação de pavimentos. Foram descritos dois processos de cálculo do tempo de vida útil e de dimensionamento de camadas de reforço.

Além disso foram estabelecidos diversos níveis de precisão para o tempo de vida útil de pavimentos e obtiveram-se os erros máximos do módulo de deformabilidade que permitem atingir esses níveis. Com esta análise concluiu-se que para obter bons resultados na determinação do tempo de vida útil, o cálculo do módulo de deformabilidade para a

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

temperatura de serviço deve ser o mais fiável possível. Demonstrou-se assim a vantagem da aplicação de métodos de correcção do módulo de deformabilidade com elevada precisão. Através do método BELLS3, traduziram-se estas conclusões para o âmbito da medição da temperatura de ensaio, obtendo-se os limites máximos de erro a respeitar para os vários níveis de precisão do tempo de vida útil.

No Capítulo 4 fez-se a síntese dos diferentes métodos de correcção do módulo de deformabilidade existentes. Seguidamente, procedeu-se ao desenvolvimento e calibração de novos métodos. Cada modelo foi calibrado de acordo com dados numéricos e posteriormente com dados experimentais. Testaram-se diversos modelos com princípios de funcionamento diferentes, com a intenção de encontrar o método mais eficaz e acessível de corrigir o módulo de deformabilidade. Todos os métodos analisados foram organizados em duas categorias de acordo com o seu processo de cálculo: métodos directos e indirectos.

Finalmente, no Capítulo 5 compararam-se os resultados obtidos pelos diversos métodos estudados para 18 casos. De seguida, foi realizada uma análise comparativa dos diversos métodos estudados ao longo desta dissertação de acordo com uma multiplicidade de critérios. Nesta fase, observou-se que é difícil escolher o melhor método a aplicar uma vez que cada um dos processos analisados tem o seu próprio conjunto de vantagens e desvantagens. Concluiu-se que o método mais eficiente é o método simplificado pela sua combinação de precisão e exequibilidade. No entanto, o método com redes neurais apresenta um grande potencial que não pode ser concretizado nesta instância devido à necessidade de uma maior amostra de dados utilizados para a calibração.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

Existem diversas alternativas de desenvolvimento da temática em questão. Durante este trabalho observou-se que a utilização de uma maior amostra de dados na calibração experimental permitiria a obtenção de um maior grau de confiança nos resultados dos vários métodos concebidos. Além disso, é necessário considerar que um terço dos dados experimentais utilizados é relativo a uma temperatura de 40 °C. Para temperaturas desta magnitude o comportamento das misturas betuminosas não se pode considerar elástico. Este facto evidencia-se por comparação das temperaturas e dos respectivos ângulos de fase que se observam nos dados experimentais utilizados. Consequentemente, é possível que os dados experimentais digam respeito a dois tipos de comportamento diferentes e, como tal, seja incorrecto considerá-los simultaneamente e sem dados adicionais no desenvolvimento dos métodos. Sendo assim, um dos possíveis desenvolvimentos futuros é a nova calibração dos vários modelos concebidos com recurso a uma maior base de dados experimentais (especialmente no que diz respeito às temperaturas consideradas). Este estudo seria particularmente interessante para o método com redes neurais.

## 6. Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros

Por outro lado, não se pode remover a concepção de novos processos de cálculo como possíveis desenvolvimentos futuros. Existe uma imensidão de processos de cálculo que podem ser concebidos e calibrados para desempenhar a função desejada. Esta proposta tem particular relevância a nível dos métodos directos de correcção do módulo de deformabilidade, uma vez que não foram desenvolvidos métodos deste tipo no escopo desta dissertação.

Outra hipótese, é a análise do efeito de novas variáveis, além das já analisadas nesta dissertação. De facto, das múltiplas variáveis apresentadas no Capítulo 2, apenas cinco foram incluídas no desenvolvimento dos métodos de correcção. Seria interessante analisar o impacto das restantes variáveis no processo de correcção do módulo de deformabilidade e, posteriormente, adaptar os vários métodos desenvolvidos de acordo com as conclusões obtidas desta análise.

Finalmente, seria interessante calibrar os métodos com base em resultados experimentais de avaliação das características de deformabilidade, realizados a diferentes temperaturas e relativos a misturas betuminosas envelhecidas provenientes de pavimentos com necessidade de reabilitação.



## APÊNDICE A

Neste apêndice pretende-se exemplificar a aplicação do método geral e método simplificado (calibrado para resultados experimentais) desenvolvidos nesta dissertação. Considere-se o seguinte problema de correcção do módulo de deformabilidade:

$$\begin{aligned}
 E_{ensaio} &= 8000 \text{ MPa} \\
 TE &= 14 \text{ }^\circ\text{C} \\
 Pen25 &= 35 \times 10^{-1} \text{ mm} \\
 Vt &= 80 \text{ km/h} \\
 Va &= 87\% \\
 TVB &= 8\% \\
 TS &= 30 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

### De acordo com o método geral:

Uma vez que a temperatura de ensaio é menor que 25, de acordo com a expressão (4-13):

$$f(T, pen25) = 1 + (0,1190 \times 35 + 1,1664) \times \log \frac{25}{14} = 2,343 \quad (\text{A-1})$$

De seguida é necessário calcular  $T_t$  de acordo com a equação (4-21):

$$T_t = -10,31 \times \ln(35) + 1,9616 \times \ln(80) + 42,888 = 14,828 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A-2})$$

De acordo com a equação (4-19) é possível calcular os rácios necessários à determinação de  $C_{vt}$ :

$$R_{14}^{vt} = 0,1825 \times \ln(80) + 0,2943 = 1,094 \quad (\text{A-3})$$

$$R_{25}^{vt} = 0,2119 \times \ln(80) + 0,1816 = 1,110 \quad (\text{A-4})$$

De acordo com a equação (4-18):

$$C_{vt} = \frac{1,094}{1,110} = 0,986 \quad (\text{A-5})$$

Segundo a equação (4-27):

$$R_{m\acute{a}x} = 0,005221 \times 87^2 - 0,7896 \times 87 + 30,391107 = 1,214 \quad (\text{A-6})$$

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Através da equação (4-28):

$$m = 0,000206 \times 87^2 - 0,032994 \times 87 + 1,315606 = 0,004 \quad (\text{A-7})$$

Seguidamente, é possível obter os rácios necessários ao cálculo de  $C_{va}$  de acordo com a equação (4-29):

$$R_{14}^{va} = 1,214 + 0,004 \times (14 - 14,828) = 1,210 \quad (\text{A-8})$$

$$R_{25}^{va} = 1,214 \quad (\text{A-9})$$

De acordo com a equação (4-26):

$$C_{va} = \frac{1,210}{1,214} = 0,997 \quad (\text{A-10})$$

É agora necessário calcular  $C_{TVB}^{pen25=40}$  e  $C_{TVB}^{pen25}$  de acordo com as equações (4-34) e (4-38):

$$\begin{aligned} C_{TVB}^{pen25=40} &= (-0,00008 \times 8 + 0,000823) \times 14^2 \\ &\quad + (-0,0004 \times 8^2 + 0,0079 \times 8 - 0,0391) \times 14 \\ &\quad + (0,0509 \times 8 + 0,4944) = 0,916 \end{aligned} \quad (\text{A-11})$$

$$\begin{aligned} C_{TVB}^{pen25} &= 1 + [(-0,0019 \times 8 + 0,0189) \times \ln 35 \\ &\quad + (0,0071 \times 8 - 0,072)] \times (14 - 25) = 1,022 \end{aligned} \quad (\text{A-12})$$

Conforme a equação (4-39):

$$C_{TVB} = 0,916 \times 1,022 = 0,937 \quad (\text{A-13})$$

Segundo a equação (4-10):

$$\frac{E_{14}}{E_{25}} = 2,343 \times 0,986 \times 0,997 \times 0,937 = 2,158 \quad (\text{A-14})$$

Logo:

$$E_{25} = \frac{8000}{2,158} = 3708 \text{ MPa} \quad (\text{A-15})$$

É necessário agora reiniciar o processo para a temperatura de projecto:

$$f(T, pen25) = 1 + (0,0461 \times 35 + 3,0112) \times \log \frac{25}{30} = 0,634 \quad (A-16)$$

Note-se que os valores de  $T_t$ ,  $R_{25}^{vt}$ ,  $R_{máx}$  e  $R_{25}^{va}$  são iguais aos calculados anteriormente, uma vez que não dependem da temperatura.

$$R_{30}^{vt} = 0,2119 \times \ln(80) + 0,1816 = 1,110 \quad (A-17)$$

$$C_{vt} = \frac{1,110}{1,110} = 1 \quad (A-18)$$

$$R_{30}^{va} = 1,214 \quad (A-19)$$

$$C_{va} = \frac{1,214}{1,214} = 1 \quad (A-20)$$

$$\begin{aligned} C_{TVB}^{pen25=40} &= (-0,00008 \times 8 + 0,000823) \times 30^2 \\ &\quad + (-0,0004 \times 8^2 + 0,0079 \times 8 - 0,0391) \times 30 \\ &\quad + (0,0509 \times 8 + 0,4944) = 1,021 \end{aligned} \quad (A-21)$$

$$\begin{aligned} C_{TVB}^{pen25} &= 1 + [(-0,0019 \times 8 + 0,0189) \times \ln 35 \\ &\quad + (0,0071 \times 8 - 0,072)] \times (30 - 25) = 0,990 \end{aligned} \quad (A-22)$$

$$C_{TVB} = 1,021 \times 0,990 = 1,011 \quad (A-23)$$

$$\frac{E_{30}}{E_{25}} = 0,634 \times 1 \times 1 \times 1,011 = 0,641 \quad (A-24)$$

$$E_{30} = 3708 \times 0,641 = 2377 \text{ MPa} \quad (A-25)$$

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

**De acordo com o método simplificado (calibrado para resultados experimentais):**

Através da equação (4-41):

$$\frac{E_{14}}{E_{25}} = 1 + (0,0761 \times 35 + 0,0403) \times \log \frac{25}{14} = 1,681 \quad (\text{A-26})$$

Logo:

$$E_{25} = \frac{8000}{1,681} = 4759 \text{ MPa} \quad (\text{A-27})$$

Utilizando novamente a equação (4-41):

$$\frac{E_{30}}{E_{25}} = 1 + (0,0010 \times 35 + 3,0747) \times \log \frac{25}{30} = 0,754 \quad (\text{A-28})$$

Logo:

$$E_{30} = 4759 \times 0,754 = 3588 \text{ MPa} \quad (\text{A-29})$$

## APÊNDICE B

Este apêndice contém o manual do programa *CMod* desenvolvido no âmbito desta dissertação. O manual encontra-se dividido em duas secções: instalação e utilização.

O processo de instalação depende do *software* disponível no computador em questão. O *CMod* recorre a funções específicas ao *Matlab*. Para que essas funções sejam operacionais, é necessário instalar previamente o *Matlab R2010a*. Como alternativa, pode ser instalado o *Matlab Compiler Runtime 7.13* (MCR).

Se um dos dois programas mencionados já se encontra instalado, o processo de instalação é desnecessário e o programa poderá ser utilizado de imediato. No caso contrário, a instalação terá os seguintes passos:

- Executar o ficheiro *MCRInstaller.exe*. Na janela que acabou de ser aberta deve-se escolher a linguagem e clicar em “OK” (ver a Figura B-1);



Figura B-1: Escolha da linguagem

- De seguida, deve-se clicar em “Install” na nova janela (ver a Figura B-2). Este passo inicia a instalação do VCREDIST, um componente necessário ao funcionamento do MCR;

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

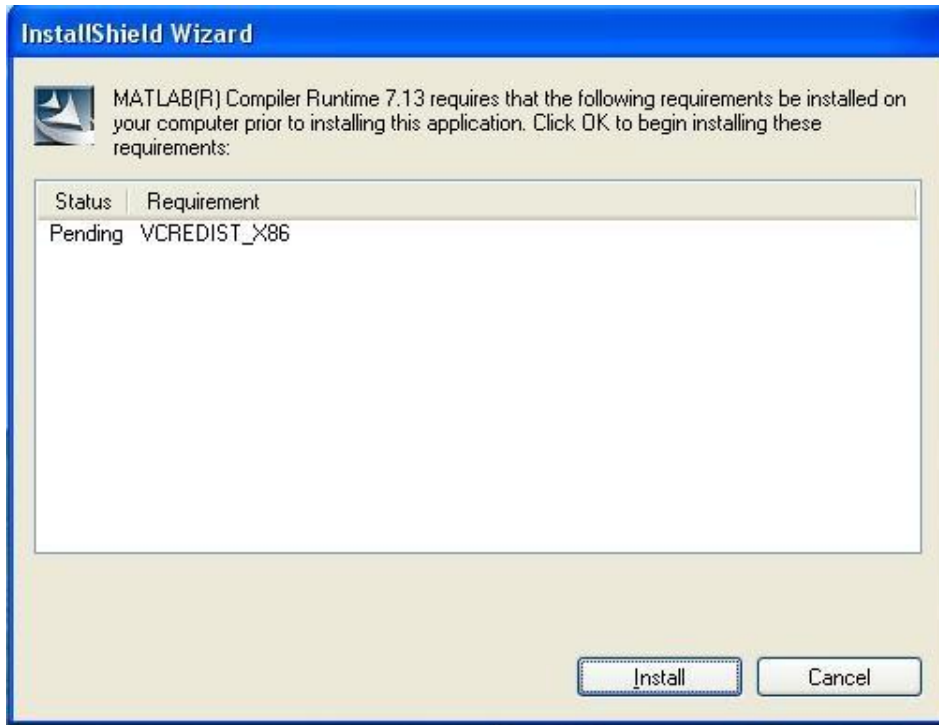


Figura B-2: Instalação do VCREDIST

- Uma vez concluída esta instalação, será iniciado o *setup* do MCR (ver a Figura B-3). Nesta janela deve-se seleccionar “Next”;

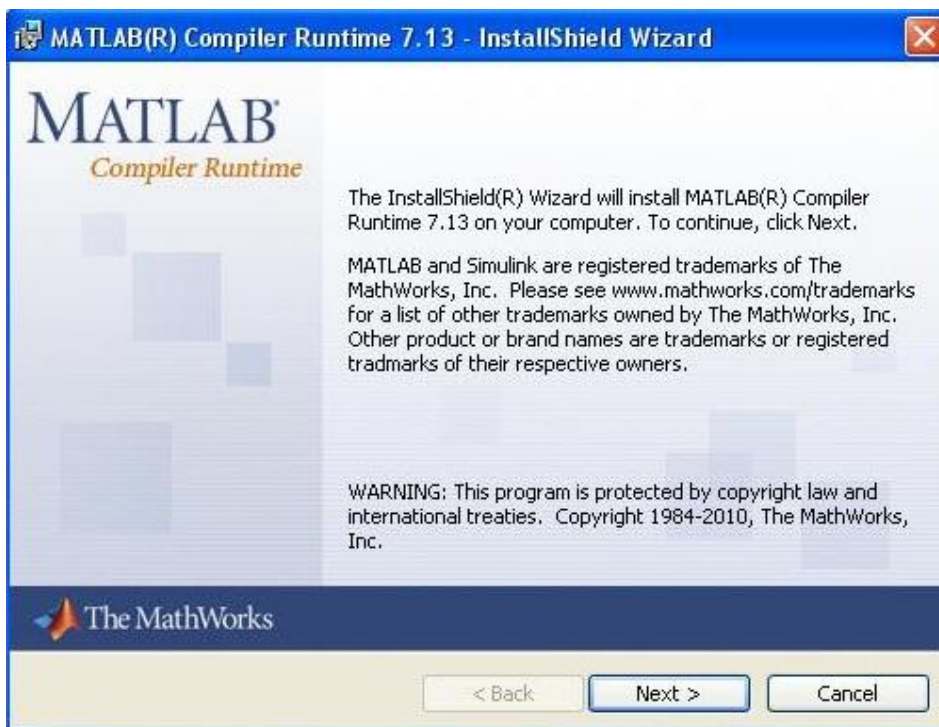


Figura B-3: Instalação do MCR – 1.º passo

- É agora necessário introduzir o nome de utilizador e a organização nos respectivos campos e seleccionar “Next” (ver a Figura B-4);



Figura B-4: Instalação do MCR – 2.º passo

- De seguida, escolhe-se o caminho de instalação seleccionando “Change...” e a seguir selecciona-se “Next” (ver a Figura B-5);



Figura B-5: Instalação do MCR – 3.º passo

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

- Seguidamente selecciona-se “Install” Figura B-6. Este passo inicia o processo de instalação do MCR;



Figura B-6: Instalação do MCR – 4.º passo

- No final da instalação deve-se seleccionar “Finish”. Após este passo a instalação encontra-se concluída e o programa está pronto para utilização.



Figura B-7: Instalação do MCR – 5.º passo

Para iniciar a utilização do *CMod* basta executar o ficheiro *CMod.exe*. Representa-se na Figura B-8 a janela de interface do *CMod*.

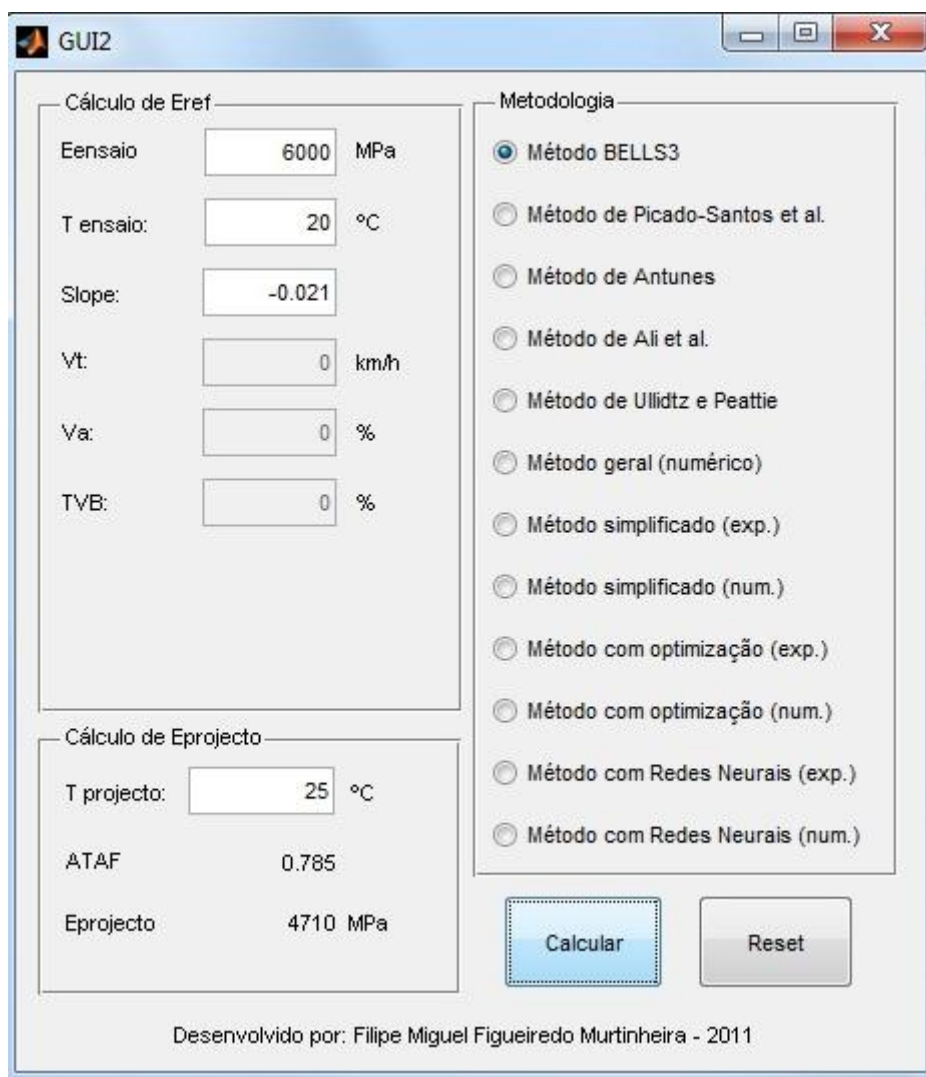


Figura B-8: Programa CMod

Como se pode observar, a janela encontra-se dividida em três zonas: “Cálculo de Eref”, “Cálculo de Eprojecto” e “Metodologia”. Além disso, existem dois botões: Calcular e Reset.

Na zona “Metodologia” selecciona-se o método de cálculo desejado. Na zona “Cálculo de Eref”, é feita toda a introdução de dados necessários ao cálculo do módulo de deformabilidade a uma temperatura de referência. Note-se que nem todos os métodos de cálculo utilizam o mesmo conjunto de variáveis. Por este motivo, o programa automaticamente bloqueia as variáveis inúteis ao método seleccionado (situação exemplificada nas variáveis *vt*, *va* e *TVB* na Figura B-8). Note-se que a variável *slope* existe apenas para o método BELLS3. Quando qualquer outro método se encontra seleccionado esta variável é substituída pela variável *pen25*.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Ainda nesta zona encontra-se o valor do módulo de deformabilidade à temperatura de referência e um outro resultado específico ao método seleccionado. Estes resultados são ocultos sempre que forem inúteis no contexto do método seleccionado.

Na zona “Cálculo de Eprojecto” introduz-se a última variável necessária ao processo de correcção do módulo: a temperatura de projecto. Além disso apresentam-se os resultados relativos ao cálculo do módulo de deformabilidade para a temperatura de projecto.

O botão “Calcular” inicia o processo de cálculo com base nos dados introduzidos no programa e de acordo com o método escolhido. O botão “Reset” iguala todos os campos de introdução de dados e de resultados a zero e selecciona o método BELLS3.

## ANEXO A

Neste anexo apresentam-se os elementos necessários à estimativa da temperatura de serviço de pavimentos através do método proposto por Baptista et al. (2002). O Quadro A-1 apresenta os valores dos parâmetros *A* e *B* necessários à aplicação da equação (3-6) em função da classe de fundação e do tipo de estrutura do pavimento. É ainda apresentado o coeficiente de correlação obtido para cada regressão.

Quadro A-1: Parâmetros e coeficiente de correção do modelo de previsão da temperatura de serviço (Baptista et al. 2002)

CLASSE DE FUNDAÇÃO	PAVIMENTO DE BASE BETUMINOSA			PAVIMENTO DE BASE GRANULAR		
	<i>A</i>	<i>B</i>	$R^2$	<i>A</i>	<i>B</i>	$R^2$
F1	-	-	-	0,690	10,701	0,988
F2	0,664	11,016	0,984	0,663	10,674	0,981
F3	0,635	11,025	0,971	0,625	10,898	0,955
F4	0,598	11,277	0,939	-	-	-

No Quadro A-2 pode-se observar as temperaturas médias máximas mensais (*TMXA*) para cada mês analisado, assim como as temperaturas ponderadas (*TPOND*) para ambos os tipos de estrutura de pavimento para 40 locais diferentes em Portugal.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

Quadro A-2: Temperaturas médias máximas mensais e temperaturas ponderadas (Baptista et al. 2002)

LOCAL	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	TPOND PFBB	TPOND PFBG
BRAGANÇA	15,4	18,3	23,7	28,0	27,9	25,2	18,3	25,2	24,5
VIANA DO CASTELO	17,9	19,3	23,3	25,5	25,5	24,6	20,9	24,0	23,6
CHAVES	17,6	20,7	25,8	29,3	28,5	25,5	20,4	26,5	25,9
BRAGA	17,9	19,7	24,2	27,0	27,1	25,8	21,0	25,2	24,7
MIRANDELA	18,5	21,7	27,1	31,4	31,0	27,9	21,3	28,4	27,7
MIRANDA DO DOURO	15,6	18,7	24,3	28,7	28,2	25,2	18,7	25,6	24,9
VILA REAL	16,5	19,2	24,6	28,4	28,3	25,8	19,2	25,8	25,2
PORTO - P. RUBRAS	17,3	18,1	21,8	23,8	23,9	23,6	20,4	22,6	22,3
S. BÁRBARA	19,8	22,7	28,0	32,0	31,9	29,2	22,6	29,3	28,7
PORTO - S. PILAR	17,5	18,5	22,4	24,6	24,7	24,1	20,6	23,3	22,9
BIGORNE	12,0	14,7	19,9	24,0	24,0	21,4	15,2	21,4	20,7
F. CAST. RODRIGO	15,8	19,3	25,0	29,3	29,0	26,1	19,0	26,3	25,6
UIVEU	16,9	19,4	24,7	28,6	28,7	26,2	19,7	26,1	25,4
S. JACINTO	16,8	17,8	20,4	22,1	21,9	21,8	19,2	21,0	20,8
CARAMULO	13,7	15,7	20,8	24,6	24,4	22,3	17,2	22,2	21,6
GUARDA	11,1	13,8	19,4	23,8	23,7	21,2	14,7	21,0	20,3
MIRA	18,4	19,6	22,7	24,6	24,5	24,6	21,6	23,5	23,2
COIMBRA	19,3	21,0	25,1	28,1	28,3	27,2	22,3	26,4	25,9
MONTE-MOR-O-VELHO	18,1	19,5	23,0	25,4	25,7	25,5	21,8	24,2	23,8
FUNDÃO	16,5	20,3	25,5	30,0	30,1	27,4	20,4	27,2	26,5
CASTELO BRANCO	18,4	21,6	26,9	31,5	31,7	28,7	22,0	28,7	28,0
ALCOBAÇA	18,4	20,0	23,4	25,9	26,1	25,8	22,0	24,6	24,2
TANCOS	19,5	21,8	26,3	29,9	30,2	28,7	22,9	27,9	27,3
CABO CARVOEIRO	16,0	16,8	19,1	20,6	20,8	21,1	19,3	19,9	19,7
PORTALEGRE	16,3	19,3	24,7	29,2	29,2	26,6	20,0	26,4	25,7
SANTARÉM	19,5	21,8	26,3	29,6	30,0	28,4	23,2	27,7	27,2
OTA	19,2	21,0	25,2	28,1	28,4	27,6	22,8	26,5	26,0
MORA	19,4	22,4	27,0	30,8	30,9	28,8	23,0	28,5	27,9
ELVAS	19,4	23,1	28,6	33,0	32,5	29,9	23,3	30,0	29,3
CABO DA ROCA	15,9	16,8	19,0	20,5	20,7	21,5	19,4	19,9	19,7
LISBOA	19,1	21,0	24,5	26,8	27,7	26,5	22,3	25,6	25,2
ÉVORA	17,7	20,6	25,8	29,8	30,0	27,6	21,6	27,3	26,7
SETÚBAL	19,6	21,8	25,7	28,6	29,2	27,5	23,0	27,0	26,5
SESIMBRA	18,4	20,7	23,9	27,0	27,4	25,1	22,1	25,3	24,9
BEJA	19,2	22,7	28,1	32,3	32,2	29,7	23,1	29,6	28,9
SINES	16,9	17,9	20,3	21,5	21,6	21,8	20,2	20,8	20,7
ZAMBUJEIRA	18,0	19,7	22,5	24,7	25,3	24,8	22,0	23,7	23,4
V. REAL S. ANTÓNIO	20,8	23,2	26,5	30,0	30,2	28,2	23,9	28,1	27,6
PRAIA DA ROCHA	18,5	21,0	24,1	27,6	28,0	25,7	22,0	25,7	25,3
FARO	19,9	22,3	25,4	28,8	28,8	27,1	23,2	26,9	26,5

## REFERÊNCIAS

AASHTO (2001) - **Guide for Design of Pavements Structures**, American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC, USA.

AI (1983) – **Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation**, Asphalt Institute (AI), Manual Series n.º 17 (MS-17), Maryland.

AIPCR (2003). **Pavement Recycling Guidelines for: In-Place Recycling with Cement; In-Place Recycling with Emulsion or foamed bitumen; Hot Mix Recycling in Plant**, Association Mondiale de la Route (ISBN 2-84060-154-0), La Defense, France.

ALI, H. A.; TAYABJI, S. D. (1998) - **Evaluation of mechanistic-empirical performance prediction models for flexible pavements**, Transportation Research Board - preprint.

ANTUNES, M. L. (1993) - **Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Utilizando Ensaios Dinâmicos**, Tese Elaborada no LNEC e Submetida para Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa.

ANTUNES, M. L.; MARECOS, V. (2008) - **Ensaios de Carga com Deflectómetro de Impacto na EN226 entre Lamego e a Ponte do Abade**, LNEC, Lisboa.

ASSI, M. (1981) – **Contribution à l'étude du comportement des enrobés bitumineux à la fatigue en cission**, Tese de Doutoramento, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris

BAPTISTA, A. (1999) - **Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis – aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes**, Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialidade em Engenharia Urbana.

BAPTISTA, A; PICADO-SANTOS, L. (2002) - **Estruturas de pavimento rodoviário flexível**, 2º Congresso Rodoviário Português - As vias da Segurança de 18 a 20 de Novembro 2002. Vol.2 Tema 5: Tecnologias de Construção – Pavimentos, p. 171-183.

BAPTISTA, A. (2006) - **Misturas betuminosas recicladas a quente em central, contribuição para o seu estudo e aplicação**, Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes.

## REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

BATISTA, F. (2004) - **Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos – Misturas betuminosas densas a frio**, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.

BATISTA, F. G. (2009) - **Reabilitação de pavimentos flexíveis através de reciclagem com cimento**, Lisboa: Instituto Superior Técnico. Dissertação de Mestrado.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; PICADO-SANTOS, L. (2008) - **Pavimentos rodoviários**, Coimbra, ISBN 978-972-40-2648-0.

BROWN, S. F.; BRUNTON, J. M. (1986) – **An Introduction to the Analytical Design of Bituminous Pavements**, 3rd edition, University of Nottingham.

CAPITÃO, S (2003) – **Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade**, Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Dissertação de Doutoramento na Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes.

COURTNEY, T. H. (2000) - **Mechanical Behaviour of Materials**, Second Edition, McGraw-Hill.

DI BENEDETTO, H., DE LA ROCHE, C., FRANCKEN, L. (1998) - **State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures**, Bituminous binders and mixes: state of the art and interlaboratory tests on mechanical behaviour and mix design, RILEM Report 17, Ed. L. Francken, London.

DIOGO, A. C.; BARBOSA, T.; BORDADO, J. C. (2002) – **Rheological Behaviour of Bituminous Modified with Reactive Polyurethanes**, Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, vol. 2, Lisbon.

FHWA (2000) - **Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement**, Publication no. FHWA-RD-98-085.

FHWA (2008) - **LTPP Temperature Prediction and Correction Guide. The BEELS Equations. BELLS3 Routing Testing Methods**, Federal Highway Administration (FHWA). Long Term Pavement Performance (LTPP). [Consult. 24 Julho 2011] Disponível em WWW: <<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/fwdcd/tempred.cfm>>

FRANCKEN, L. (1977) – **Modulo Complexe des Mélanges Bitumineux**, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, spécial V.

- FWA, T., OH, C. (1995) - **Effect of moisture content on measured properties of asphalt mixtures**, Transportation Research Record, No. 1492, TRB, Washington, D. C., p. 61-70.
- GROENENDIJK (1998) – **Accelerated Testing and Surface Cracking of Asphaltic Concrete Pavements**, PhD. Dissertation, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands.
- JAE, (1995) – **Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional**, Junta Autónoma de Estradas (actual IEP), Almada.
- KIM, Y., LEE, Y. (1995) - **Interrelationships among stiffnesses of asphalt-aggregate mixtures**, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 64, AAPT, Portland - Oregon, p. 575-609.
- MASTRAD (2008) - **Falling Weight Deflectometer (FWD). Pavement Evaluation. MASTRAD Quality and Test Systems**, [Consult. 24 Julho 2011] Disponível em WWW: <<http://www.mastrad.com/fwdspec.htm>>
- NEVES, J.; CORREIA, A (2006) - **Caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos**, Engenharia Civil, ISSN 0873-1152.
- NUNN, M. E., BOWSKILL, G. (1992) - **Towards a Performance Specification for Bituminous Roadbase**, Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 3, Nottingham, p. 266-279.
- PAIS, J.; FONSECA, P. (2004) - **Influência do tipo de agregado e ligante no comportamento das misturas betuminosas**.
- PICADO-SANTOS, L. (1996) – **Temperatura de serviço em Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Elementos para a sua determinação**, Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Dissertação de Doutoramento.
- PICADO-SANTOS, L.; BAPTISTA, A. (2004) - **Reciclagem a quente de misturas betuminosas em central, Relatório técnico**, Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- SEVERI, Andréa [et al.] (1999) - **Verificação à Fadiga de Revestimentos Asfálticos e Bases Cimentadas - Programa Pavimentos Asfálticos v.1.0**, Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Belém.

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. CORRECÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS.

SHELL (1977) – **Asphalt pavement design manual**, Shell International Petroleum Company, London.

SHELL (1990) – **The Shell Bitumen Handbook**, Shell Bitumen, Surrey.

SOLEIMANI, P. (1965) - **Étude sur le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux para la méthode de fluage**, Thèse de Docteur Ingénieur, Faculté des Sciences de Paris.

SOUSA, J. (1993) – **Asphalt-aggregate mix design using the repetitive simple shear test (constant heigh)**, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 63, St-Louis –Missouri.

STUBSTAD, R. N.; LUKANEN, E. O.; RICHTER, C. A., BALTZER, S. (1998) - **Calculation of AC Layer Temperatures From FWD Field Data**, The 5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim.

ULLIDTZ, P.; PEATTIE, R. (1982) – **Programmable calculators in the assessment of overlays and maintenance strategies**, Proceedings 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Delft.

UNIVERSIDADE DE NOTTINGHAM (1986) - **Bituminous pavements: materials, design and evaluation**, Lecture Notes of a residencial Course in University of Nottingham, University of Nottingham, Nottingham.

VALE, C. (2004) - **Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis, contributos para modelação**, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado.