



# **Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**

**Ana Paula Santos Francisco**

Relatório Final de Projeto apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

**Outubro de 2012**



# **Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**

**Ana Paula Santos Francisco**

Relatório Final de Projeto apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

Orientador:  
**Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto**

**Outubro de 2012**



## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível com a colaboração de várias pessoas as quais deixo aqui o meu agradecimento:

Ao professor Doutor Manuel Minhoto pela orientação prestada, incentivo e pelo tempo dedicado na sugestão de ideias e revisão do trabalho.

À Câmara Municipal de Bragança, Eng.º Padrão, pelo fornecimento do camião e meios necessários para a realização do ensaio *in situ* e pela sua disponibilidade.

À ESTG pela disponibilização dos equipamentos para a realização dos ensaios *in situ*.

Ao Srº João Pires e Srº Octávio Pereira, técnicos do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção e a Eng.<sup>a</sup> Hermínia Morais da ESTG, agradeço o apoio na realização dos ensaios *in situ* e meios facultados.

Aos meus pais e à minha irmã, um forte agradecimento, pelo apoio e acompanhamento incondicional nesta caminhada.



## RESUMO

Ao longo dos anos em que um pavimento rodoviário se encontra ao serviço é solicitado pelas ações das condições climáticas e do tráfego, as quais contribuem para uma diminuição da qualidade das características mecânicas e funcionais dos materiais que constituem o pavimento. Normalmente, essas solicitações contribuem para o aparecimento de patologias nos pavimentos as quais afetam a segurança e a comodidade em termos de circulação rodoviária.

Assim, é fundamental garantir o controlo das degradações dos pavimentos, avaliando, ao longo do tempo, a capacidade estrutural dos pavimentos, de forma a garantir um comportamento adequado, efetuando a avaliação estrutural e, quando necessário, realizar reabilitação estrutural dos pavimentos.

No presente trabalho realiza-se uma abordagem no sentido de caracterização do comportamento estrutural de pavimentos e o consequente estudo de reabilitação.

Neste contexto, foram realizados ensaios *in situ* num trecho de estrada que apresentava algumas degradações superficiais, usando um deflectómetro (Viga Benkelman), efetuando-se o registo das deflexões, determinando as propriedades de deformabilidade de cada camada que constitui o pavimento, permitindo, assim, a avaliação do comportamento estrutural do mesmo.

As deflexões medidas para os diferentes ensaios realizados ao trecho de estrada permitiram a delineação de linhas de influência que ilustram o desenvolvimento duma deformação reversível do pavimento e que é exclusiva para cada ponto de ensaio. No processo de análise dessas deflexões, foi possível identificar a influência que cada camada do pavimento tem na forma da linha de influência.

Posteriormente, foram estudadas propostas de soluções de reabilitação estrutural ao pavimento, tendo como objetivo uma melhoria da qualidade do pavimento e, por sua vez, um aumento do tempo de vida do pavimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Deflexões, Pavimentos Flexíveis, Reforço de pavimentos, Viga Benkelman

## ABSTRACT

Over the years that a road pavement is in the service is requested by the actions of weather and traffic, which contribute to a decreased quality of functional and mechanical characteristics of the materials that make up the pavement. Typically, these applications contribute to the appearance of diseases which affect pavements safety and convenience in terms or road traffic.

Thus, it is important to ensure control of degradation of pavements, evaluating, over time, structural capacity of pavements, to ensure appropriate behavior, effecting the structural evaluation and, where necessary, carry out structural rehabilitation of pavement.

In the present work realized an approach to characterize the structural behavior of pavements and subsequent study of rehabilitation.

In the context, tests were performed in-situ on a stretch of road that had some surface degradation, using an deflectometer (Benkelmam Beam), making up the registration of deflections, determining the deformability properties of each layer which constitutes the pavement, thus allowing the evaluating of the structural behavior of the same.

Deflections measures for the different tests the stretch of road, allowed the delineation of influences lines that illustrate development of a reversible deformation of the pavement and that is unique for each test point. In the process of analysis of these deflections, it was possible to identify the influence that each pavement layer has the shape of influence line.

Posteriorly, were studied proposed solutions to the pavement rehabilitation structure, aiming to improve the quality of the pavement and, in turn, increase the life of the pavement.

**KEY-WORDS:** Deflections; Flexible pavements; Pavement overlay; Benkelmam Beam

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento Temático.....	1
1.2 Objetivos do Estudo .....	2
1.3 Estrutura Geral do Trabalho Desenvolvido.....	3
<b>2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução.....	5
2.2 Constituição e Função dum Pavimento Rodoviário .....	5
2.3 Tipo de Pavimentos .....	8
2.4 Patologias em Pavimentos Rodoviários Flexíveis .....	9
2.5 Parâmetros de Estado Usados na Auscultação de Pavimentos .....	13
2.6 Conclusões.....	16
<b>3. AUSCULTAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS.....</b>	<b>17</b>
3.1 Introdução.....	17
3.2 Equipamentos de Ensaio.....	18
3.2.1 Viga Benkelman.....	19
3.2.2 Deflectómetro de Impacto.....	22
3.2.3 Deflectógrafo de Lacroix .....	24
3.2.4 Curviâmetro .....	25
3.3 Análise dos Resultados de Auscultação .....	26
3.3.1 Divisão em Zonas de Comportamento Estrutural Homogéneo .....	28
3.3.1.1 Método das Diferenças Acumuladas ( <i>Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences</i> ) .....	29
3.3.2 Deflexão Característica.....	30
3.3.3 Caracterização Mecânica do Pavimento .....	31
3.3.4 Correção do Módulo de Deformabilidade para a Temperatura de Projeto .....	34
3.4 Conclusões .....	36
<b>4. REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS.....</b>	<b>37</b>
4.1 Introdução.....	37
4.2 Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais .....	37
4.3 Técnicas de Reabilitação das Características Estruturais.....	39

---

4.4 Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis .....	43
4.4.1 Introdução .....	43
4.4.2 Número Acumulado de Eixos Padrão para o Tráfego Futuro.....	44
4.4.3 Determinação da Vida Restante.....	46
4.4.4 Método Empírico-Mecanicista da EP .....	47
4.4.5 Método Empírico-Mecanicista da SHELL .....	50
4.4.6 Método Empírico-Mecanicista Considerando a Reflexão de Fendas (Sousa et al, 2002).....	53
4.5 Conclusões .....	58
<b>5. ESTUDO PRÁTICO .....</b>	<b>61</b>
5.1 Introdução.....	61
5.2 Descrição do Troço de Estrada em Estudo.....	61
5.3 Ensaio com a Viga Benkelman. Apresentação dos Dados Obtidos .....	62
5.4 Caracterização Mecânica – backcalculation .....	65
5.5 Determinação da Espessura do Reforço.....	74
5.5.1 Estudo do Tráfego Futuro .....	74
5.5.2 Propriedades dos Materiais Utilizados.....	75
5.5.3 Soluções Projetadas .....	77
5.5.4 Comparação entre Soluções.....	91
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>i</b>
<b>Anexo I .....</b>	<b>ii</b>
<b>AnexoII.....</b>	<b>vii</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (adaptado de InIR, 2009).....	6
Figura 2.2 – Representação esquemática das solicitações e do comportamento dum pavimento rodoviário flexível (Minhoto, 2005) .....	8
Figura 2.3 – Distribuição das tensões num pavimento rígido e num pavimento flexível (adaptado de Interactive, 2008) .....	9
Figura 2.4 – Degradação tipo: rodeiras .....	10
Figura 2.5 – Degradação tipo: pele de crocodilo .....	12
Figura 2.6 – Degradação tipo: pelada.....	12
Figura 2.7 – Degradação tipo: exsudações.....	13
Figura 3.1 – Evolução da deflexão ao longo do tempo (Pereira & Miranda, 1999) .....	18
Figura 3.2 – Equipamentos utilizados nos ensaios não destrutivos .....	19
Figura 3.3 – Esquema da Viga Benkelman da ESTG, IPB .....	20
Figura 3.4 – Pormenor do vibrador e do extensómetro.....	20
Figura 3.5 – Deflectograma - Linha de influência obtida no ensaio com a Viga Benkelman (adaptado de Pereira & Miranda, 1999).....	22
Figura 3.6 – Deflectómetro de Impacto do LNEC (Antunes et al, 2004) .....	23
Figura 3.7 – Posicionamento dos geofones (Das, 2010).....	24
Figura 3.8 – a) camião que transporta o deflectógrafo de Lacroix e b) viga metálica em posição de ensaio (SACR, 2012) .....	24
Figura 3.9 – Camião que transporta o curviâmetro (Dias & Dominguez, 2011).....	25
Figura 3.10 – Corrente do Curviâmetro (Sina, 2012) .....	26
Figura 3.11 – Bacia de deflexão (EUROCONSULT, 2004).....	26
Figura 3.12 – Fluxograma para a avaliação estrutural do pavimento auscultado .....	27
Figura 3.13 – Fatores a considerar para a divisão em comportamento homogéneo (adaptado de NCHRP, 2004).....	29

---

Figura 3.14 – Divisão das zonas homogêneas pelo método das diferenças acumuladas (adaptado de NCHRP, 2004) .....	30
Figura 3.15 – Modelo de Burmister (Santos, 2009) .....	32
Figura 3.16 – Relação entre a temperatura de serviço em misturas betuminosas e a ambiente (Picado Santos, 1993) .....	35
Figura 4.1 – Diversos tipos de revestimentos betuminosos superficiais (Vicente, A.M, 2006) .....	38
Figura 4.2 – Estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados (Minhoto, 2005) .....	41
Figura 4.3 – Extensões de tração e compressão usadas como critérios de ruína (Pais, 1999)	49
Figura 4.4 – Curva de dimensionamento (SHELL, 1978) .....	51
Figura 4.5 – Ábaco de dimensionamento .....	52
Figura 5.1 – Localização da Avenida Abade Baçal e sua envolvente (Google, 2012) .....	62
Figura 5.2 – Localização dos ensaios realizados .....	63
Figura 5.3 – Posicionamento da Viga Benkelman .....	63
Figura 5.4 – Viga de referência da Viga Benkelman .....	64
Figura 5.5 – Relação entre as deflexões para cada ponto de ensaio .....	65
Figura 5.6 – Divisão em zonas de comportamento estrutural homogêneo .....	65
Figura 5.7 – Deflectograma característico da zona 1 e zona 2 .....	66
Figura 5.8 – Deflectograma característico da zona 3 .....	67
Figura 5.9 – Comparação entre os deflectogramas característicos de cada zona .....	67
Figura 5.10 – Geometria do pavimento auscultado .....	68
Figura 5.11 – Esquematização geral adotada para a ação de um eixo-padrão sobre um pavimento (Branco et al, 2008) .....	69
Figura 5.12 – Introdução de dados no BISAR: Loads .....	70
Figura 5.13 – Introdução de dados no BISAR: Layers .....	70
Figura 5.14 – Posição dos pontos da linha de influência no BISAR .....	70

---

---

Figura 5.15 – Influência das camadas do pavimento na definição da bacia de deformação....	73
Figura 5.16 – Procedimento adotado para o dimensionamento da camada de reforço .....	79
Figura 5.17 – Introdução de dados no BISAR .....	80
Figura 5.18 – Introdução de dados no SPDM: clima .....	82
Figura 5.19 – Introdução de dados no SPDM: camada betuminosa do pavimento existente ..	83
Figura 5.20 – Introdução de dados no SPDM: camadas granulares e solo de fundação.....	84
Figura 5.21 – Introdução de dados no SPDM: tráfego.....	84
Figura 5.22 – Introdução de dados no SPDM: características volumétricas da mistura convencional da camada do reforço.....	85
Figura 5.23– Introdução de dados no SPDM: características volumétricas da mistura de BMB como camada do reforço.....	86
Figura 5.24 – Introdução de dados no SPDM: espessura do reforço e características mecânicas para MC .....	86
Figura 5.25 – Introdução de dados no SPDM: espessura do reforço e características mecânicas para BMB.....	87
Figura 5.26 – Introdução dos dados/espessuras – Zona 2 .....	90
Figura 5.27 – Introdução dos dados/espessuras – Zona 3 .....	90
Figura 5.28 – Aplicação da camada de reforço no pavimento auscultado .....	92
Figura II.1 – Comparação das deformadas (zona 1) .....	viii
Figura II.2 – Comparação das deformadas (zona 2) .....	ix
Figura II.3 – Comparação das deformadas (zona 3) .....	x



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário (adaptado de InIR, 2009) .....	7
Tabela 2.2 – Família e tipo de degradações (Pereira & Miranda, 1999).....	11
Tabela 3.1 – Módulos de deformabilidade usuais para camadas do pavimento (EP-JAE, 1995a).....	33
Tabela 4.1 – Fatores de agressividade de tráfego (EP-JAE, 1995).....	44
Tabela 4.2 – Fatores de agressividade do tráfego (EP-JAE, 1995).....	45
Tabela 4.3 – Variáveis associadas às propriedades dos pavimentos.....	57
Tabela 4.4 – Coeficientes estatísticos associados ao modelo de $\epsilon_{VM}$ .....	57
Tabela 5.1 – Alguns dados de saída do programa BISAR.....	71
Tabela 5.2 – Módulos de deformabilidade do pavimento auscultado.....	72
Tabela 5.3 – Módulo de deformabilidade da camada betuminosa para a temperatura de projeto.....	73
Tabela 5.4 – Projeção do $NAEP_{80KN}$ pelo método do MACOPAV .....	74
Tabela 5.5 – Coeficientes da lei da Shell para misturas estudadas (Minhoto, 2005).....	76
Tabela 5.6 – Coeficientes para o modelo do módulo de rigidez em função da temperatura (Minhoto, 2005) .....	77
Tabela 5.7 – Vida residual do pavimento para as zonas de comportamento estrutural homogêneo .....	78
Tabela 5.8 – Classes de deflexão (Pereira & Miranda, 1999a) .....	78
Tabela 5.9 – Classes de TMDA e do NEEP (Pereira & Miranda, 1999a) .....	78
Tabela 5.10 – Espessura da camada de reforço obtida pelo programa BISAR.....	80
Tabela 5.11 – Número admissíveis de eixos-padrão, obtidos pelos critérios de ruína .....	81
Tabela 5.12 – Características volumétricas das misturas betuminosas a quente (EP-JAE,1995) .....	83
Tabela 5.13 – Espessura da camada de reforço obtida pelo programa SPDM.....	87

---

Tabela 5.14 – Número de eixos-padrão definidos pelos critérios de ruína .....	88
Tabela 5.15 – Espessura da camada de reforço obtida pelo método da reflexão de fendas.....	91
Tabela 5.16 – Comparação entre as espessuras da camada de reforço pelos três métodos .....	91
Tabela I.1 – Deflexões <i>in situ</i> do trecho auscultado (Avenida Abade Baçal).....	iii
Tabela I.2 – Deflexões corrigidas para a ponta apalpadora .....	iv
Tabela I.3 – Deflexões elásticas .....	v
Tabela I.4 – Deflexões características .....	vi
Tabela II.1 – Determinação da temperatura de projeto.....	vii
Tabela II.2 – Resultados da retroanálise da zona de comportamento estrutural homogénea 1 .....	viii
Tabela II.3 – Correção do módulo de deformabilidade da camada betuminosa (zona 1).....	viii
Tabela II.4 – Resultados da retroanálise da zona de comportamento estrutural homogénea 2.	ix
Tabela II.5 – Correção do módulo de deformabilidade da camada betuminosa (zona 2).....	ix
Tabela II.6 – Resultados da retroanálise da zona de comportamento estrutural homogénea 3..	x
Tabela II.7 – Correção do módulo de deformabilidade da camada betuminosa (zona 3).....	x

## LISTA DE ABREVIACÕES

AAF	Fator corretivo relacionado com o envelhecimento das misturas
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
APL	<i>Analiseur du Profil en Long</i>
BISAR	<i>Bitumen Stress Analysis in Roads</i>
BMB	Mistura de Betuminosa com Betume Modificado com Borracha
C	Fator de crescimento do tráfego
CAT	Coefficiente de Atrito Transversal
$C_{med}$	Força de impacto registada no impacto com o FWD
$C_p$	Carga padrão do FWD
$d_{ci}$	Deflexão calculada para o ponto de ensaio i
$D_i^{med}$	Deflexão no sensor i medida no impacto do ensaio da carga registada, (FWD)
$D_i^{norm}$	Deflexão no sensor i, normalizada para a carga padrão, (FWD)
$d_k$	Deflexão característica
$d_m$	Média da deflexão máxima para todo o trecho auscultado
$d_{mi}$	Deflexão medida no ponto de ensaio i
$E_{20}$	Módulo de deformabilidade para a temperatura de referência de 20°C
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
$E_T$	Módulo de deformabilidade para a temperatura T
$E_{tp}$	Módulo de deformabilidade para a temperatura de projeto
FAF	Fator corretivo para ajuste ao desempenho in situ
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GERPHO	<i>Groupe d'Examen Routier par Photographie</i>
$h_1$	Espessura da camada betuminosa do pavimento

---

HSD	<i>High Speed Deflectograph</i>
EP	Estradas de Portugal
InIR	Instituto de Infraestruturas Rodoviárias
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
IRI	<i>International Roughness Index</i>
JAE	Junta Autónoma de Estradas
KN	QuiloNewton
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV	Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional
MC	Mistura Convencional
MPa	MegaPascals
$N_{ae}$	Número admissível de passagem de eixos padrão para a estrutura do pavimento existente
NAEP	Número acumulado de eixos padrão
$N_{ar}$	Número admissível de passagem de eixos padrão para a estrutura do pavimento com reforço
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
NEEP	Número equivalente de eixos padrão
$N_p$	Número equivalente de passagens do eixo padrão correspondente ao tráfego futuro
PC	Percentagem de Fendilhamento
r	Raio da superfície circular
RCT	Temperatura de ocorrência de reflexão de fendas
RMS	<i>Root Mean Square</i>
s	Desvio padrão

---

---

SPDM	<i>Shell Pavement Design Method</i>
SCRIM	<i>Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine</i>
t	Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado
$T^{\text{ar}}_{\text{máx}}$	Temperaturas máximas do ar
TAF	Fator corretivo que reflete a evolução das temperaturas nas misturas betuminosas
$T^{\text{ar}}_{\text{min}}$	Temperatura mínima do ar
TMAP	Temperatura Média Anual Ponderada do ar
TMDA <sub>p</sub>	Tráfego Médio Diário Anual de Veículos Pesados
TMMA	Temperatura Média Mensal do ar
$T_p$	Temperatura de projeto
UZ	Deslocamento vertical
VB	Viga Benkelman
$V_b$	Percentagem volumétrica de betume
$W_{\text{fator}}$	Fator de ponderação
$W_m$	Média dos fatores de ponderação
W-MAAT	Temperatura Média Anual Ponderada do Ar
$Z_i$	Soma acumulada dos desvios da média ao ponto de teste i
$\alpha$	Fator de agressividade do tráfego
$\epsilon_{dp}$	Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação
$\epsilon_t$	Extensão de tração
$\epsilon_{VM}$	Extensão de Von Mises
$\mu\text{m}$	Micrómetro

---



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento Temático

Os pavimentos rodoviários que constituem a rede rodoviária foram construídos para que proporcionassem aos utentes uma circulação rodoviária com segurança e conforto. Porém, devidas as ações a que um pavimento está exposto (tráfego e clima), o comportamento global de um pavimento é afetado pelo aparecimento de degradações, reduzindo assim, a sua capacidade para suportar as solicitações e afetando desta forma o seu comportamento estrutural e a sua aptidão funcional.

O aparecimento de degradações num pavimento é um sinal indicativo de que a capacidade estrutural ou funcional para que foi projetado é insuficiente para suportar as ações do tráfego e das condições climáticas.

Assim, após a abertura ao tráfego o comportamento dos pavimentos deve ser acompanhado a fim de, atempadamente, serem promovidas as ações de conservação necessárias para manter a sua qualidade ao longo do tempo (Branco et al, 2008).

As atividades que permitem um acompanhamento a um pavimento são designadas de observação de pavimentos e são divididas em: auscultação superficial e auscultação estrutural.

Em relação à auscultação estrutural, objeto do presente trabalho, efetua-se através da análise de um parâmetro de estado designado por deflexão, que permite avaliar o comportamento estrutural de um pavimento.

A atividade de auscultação estrutural é realizada com equipamentos de deflectometria, os quais, através da atuação de uma carga, permitem obter uma bacia de deflexão em ensaios realizados em pontos dum trecho de estrada. Com base em métodos de análise dos resultados obtidos, é possível determinar o módulo de deformabilidade de cada camada e do solo de fundação que constituem o pavimento auscultado.

O módulo de deformabilidade caracteriza a deformabilidade dos materiais que constituem as camadas de um pavimento e, quando um pavimento rodoviário apresenta patologias, o seu valor tende a diminuir. Desta forma, é um parâmetro essencial na avaliação do comportamento estrutural de um pavimento, pois, caracteriza o seu estado estrutural fundamental para o estudo de reabilitação de pavimentos existentes.

A reabilitação a um pavimento pretende repor as funções estruturais de um pavimento, melhorando, indiretamente, a sua aptidão funcional.

Existem diferentes técnicas de reabilitação de um pavimento rodoviário degradado e com baixa capacidade estrutural. No presente trabalho, a técnica de reabilitação estrutural estudado foi o reforço estrutural, que consiste na colocação de uma espessura de uma camada betuminosa, sobre o pavimento existente, por forma a aumentar o tempo de vida do pavimento melhorando assim, a capacidade de carga do mesmo.

## **1.2 Objetivos do Estudo**

O presente trabalho tem como título “*Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*” e tem como principal objetivo a “realização de auscultação estrutural a um trecho de um pavimento rodoviário flexível, tendo em vista a determinação das características estruturais do pavimento”.

A auscultação estrutural, efetuada por ensaios não destrutivos com a Viga Benkelman, para além de permitir avaliar o comportamento estrutural do pavimento, através da análise de deflexões obtidas pelo ensaio, permite, contribuir para o estudo de medidas de reabilitação estrutural do pavimento e, assim, melhorar as condições de circulação rodoviária.

Neste ponto de vista, o presente estudo, pretende contribuir com uma possível solução de reabilitação estrutural dum pavimento rodoviário existente e que foi objeto de auscultação.

Para um bom processamento dos dados obtidos com Viga Benkelman, assim como, uma correta avaliação e reabilitação estrutural, foi necessário abordar o estudo da metodologia de tratamento e análise dos dados. Assim, este trabalho procura identificar os métodos de análise que permitem a avaliação estrutural e os métodos de dimensionamento da reabilitação estrutural ao pavimento auscultado.

### **1.3 Estrutura Geral do Trabalho Desenvolvido**

O presente trabalho está organizado em seis capítulos que descrevem os aspetos fundamentais para a compreensão e desenvolvimento dos objetivos apresentados.

O capítulo 1 apresenta o enquadramento do tema de desenvolvimento do presente trabalho, os objetivos pretendidos e a apresentação dos capítulos.

No capítulo 2 é feita uma descrição da constituição de um pavimento rodoviário, nomeadamente as camadas que o constituem e as respetivas funções. Também são apresentados os tipos de pavimentos classificados consoante os materiais que o constituem, as patologias visíveis em pavimentos rodoviários flexíveis em serviço, e os parâmetros de estado que contribuem para uma avaliação funcional e estrutural de um pavimento auscultado.

No capítulo 3 são descritos os equipamentos e técnicas de ensaio utilizados na medição da deflexão de um pavimento flexível, como também, uma apresentação da metodologia de análise dos resultados da medição que permitem determinar o módulo de deformabilidade de cada camada que constitui um pavimento e classificar o comportamento estrutural do mesmo.

O capítulo 4 descreve as possíveis técnicas de reabilitação, quer superficiais, vocacionadas para melhorar as características superficiais dum pavimento e melhorar a sua qualidade funcional, quer estruturais que melhoram a qualidade estrutural dum pavimento. Numa outra fase neste capítulo, também são apresentados os métodos de dimensionamento do reforço dum pavimento.

O capítulo 5 apresenta as ações desenvolvidas no ensaio experimental ao trecho de estrada auscultado que possibilitaram determinar o comportamento estrutural do pavimento auscultado. Numa fase posterior, são apresentadas, também, as soluções do dimensionamento do reforço ao pavimento.

No último capítulo, capítulo 6, estão apresentadas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido.



## **2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

### **2.1 Introdução**

Para que um pavimento rodoviário satisfaça as exigências dos utentes: comodidade, segurança e economia, a sua conceção tem que considerar as solicitações que atuarão sobre o pavimento, assim como, os materiais e respetivas espessuras das camadas que o constituem.

Os pavimentos rodoviários são dimensionados para um período de dimensionamento de 20 ou 30 anos, sendo este período de vida útil influenciado pelo tipo de comportamento estrutural do pavimento (EP-JAE,1995). No entanto, devido às solicitações do tráfego e do clima, que contribuem para a degradação dos pavimentos, torna-se necessário desenvolver ações de conservação, nas quais se incluem as ações de reabilitação estrutural, para uma circulação rodoviária segura, cómoda e económica.

Nesta perspetiva, é de todo o interesse, o conhecimento da constituição de um pavimento rodoviário, do tipo de pavimentos existentes e, também, das degradações usuais em pavimentos rodoviários flexíveis, assim como, dos parâmetros de estado a auscultar nos pavimentos.

### **2.2 Constituição e Função dum Pavimento Rodoviário**

Um pavimento rodoviário é uma estrutura constituída por um conjunto de camadas de espessura finita, apoiadas num maciço semi-indefinido, o solo de fundação (Pereira & Miranda, 1999).

A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período de vida do pavimento, sob a ação das ações do tráfego, e nas condições climáticas que ocorram (Branco et al, 2008).

A comodidade e segurança de circulação rodoviária são asseguradas pelo papel estrutural e funcional das camadas constituintes do pavimento. A função estrutural está ligada à capacidade que o conjunto das diversas camadas tem para resistir às cargas aplicadas pelos veículos e às ações climáticas, sem sofrer degradações que ponha em risco a funcionalidade

do pavimento. O papel funcional do pavimento está relacionado com as características de segurança e conforto da superfície da camada de desgaste do pavimento (Pais et al, 2000).

De um modo geral, os pavimentos rodoviários são constituídos por três camadas: camadas superiores, camadas granulares e o solo de fundação. A figura 2.1 ilustra a distribuição das várias camadas que constituem um pavimento. A tabela 2.1 indica a função de cada uma das camadas de um pavimento rodoviário.

As camadas superiores são constituídas por camadas ligadas e têm na sua constituição materiais granulares estabilizados com um ligante, que pode ser hidráulico para pavimentos rígidos e o betume asfáltico para os pavimentos flexíveis. As camadas granulares são camadas com agregados, britados ou naturais e são estabilizadas mecanicamente. O solo de fundação é constituído pelo solo natural, sendo que, em alguns casos, quando o solo de fundação não apresenta as características mecânicas desejadas, pode ser submetido a estabilização ou até adicionado de uma camada de melhor qualidade, constituindo no final o designado “leito do pavimento”.

O dreno referenciado na figura 2.1 tem a função de drenar a água que circula nas camadas granulares do pavimento e pelo solo de fundação. Esta drenagem beneficia o comportamento estrutural do pavimento, pois, a água é uma das ações que contribuem para o aparecimento de patologias no pavimento.

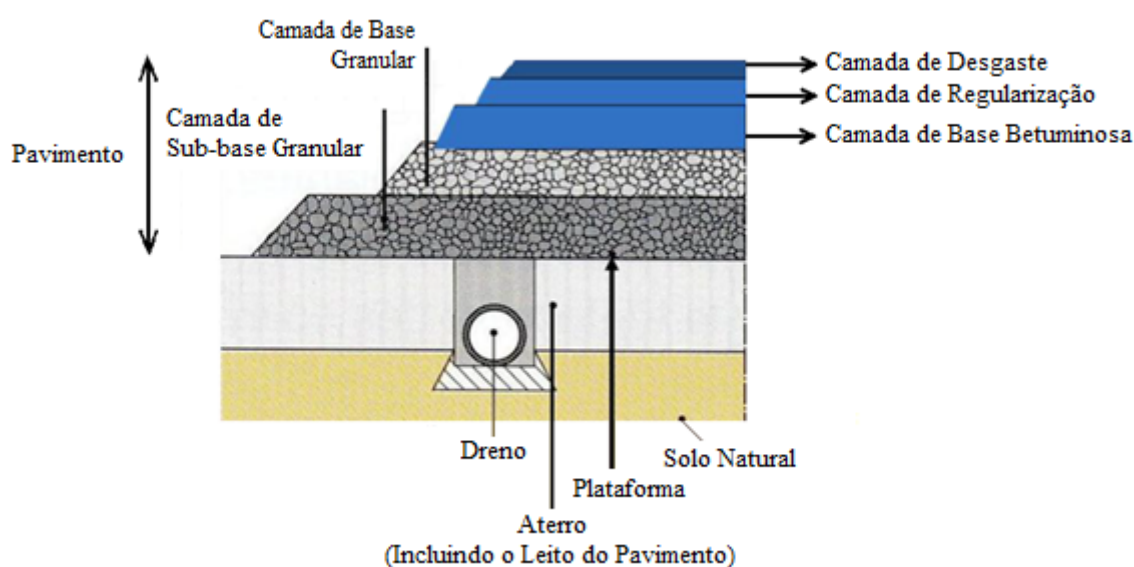


Figura 2.1 – Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (adaptado de InIR, 2009)

As diferentes camadas do pavimento dispõem-se, normalmente, com qualidade e resistência decrescentes (no sentido da superfície do pavimento para o solo de fundação), em consonância com a progressiva redução dos esforços e profundidade (Branco et al, 2008). Cada camada é caracterizada pelo comportamento mecânico dos materiais, definido pelo módulo de deformabilidade (E) e pelo coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

O módulo de deformabilidade define a relação entre as tensões e as deformações, dos materiais constituintes das camadas de um pavimento, e o coeficiente de Poisson define a relação entre as deformações radiais e as deformações axiais dos materiais (Jacinto, 2003).

Tabela 2.1 – Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário (adaptado de InIR, 2009)

Camadas do Pavimento		Função
Camadas Superiores	Desgaste	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adequada circulação do tráfego com conforto e segurança</li> <li>- Drenagem ou impermeabilização</li> <li>- Distribuição das tensões induzidas pelo tráfego</li> </ul>
	Regularização	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Camada estrutural</li> <li>- Regularizar a superfície da camada de base</li> </ul>
	Base Betuminosa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Camada estrutural</li> </ul>
Camadas Granulares	Base	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Camada estrutural</li> <li>- Degradação das cargas induzidas pelo tráfego</li> </ul>
	Sub-Base	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proteger durante a fase construtiva as camadas inferiores</li> <li>- Proteger a base da subida de água capilar</li> <li>- Drenagem interna do pavimento</li> <li>- Camada estrutural</li> <li>- Resistência à erosão</li> </ul>
Solo de Fundação	Leito do Pavimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar deformação do solo</li> <li>- Homogeneidade das características mecânicas da fundação</li> <li>- Plataforma construtiva</li> <li>- Possibilidade de compactação das camadas subjacentes em adequadas condições</li> </ul>
	Terreno da Fundação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suporte do pavimento                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ São as suas características que condicionam o dimensionamento</li> </ul> </li> </ul>

## 2.3 Tipo de Pavimentos

Os pavimentos rodoviários são classificados em três tipos, em função da deformabilidade e dos materiais constituintes: pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos e pavimentos semirrígidos. A escolha de cada um destes tipos de pavimentos dependerá da intensidade do tráfego, da qualidade de resistência do solo de fundação, assim como, da qualidade dos materiais disponíveis.

Em relação aos pavimentos flexíveis, são pavimentos cujas camadas ligadas são constituídas por materiais betuminosos que conferem uma considerável deformabilidade ao pavimento. As camadas superiores, camadas betuminosas, constituídas pela camada de desgaste, camada de regularização e, em alguns casos, camada de base, são camadas que conferem resistência à tração, por serem materiais ligados e, como tal, asseguram uma resistência à fadiga. Já as camadas inferiores (não ligadas) são constituídas por material granular não ligado e juntamente com o solo de fundação, conferem ao pavimento resistência às tensões de compressão.

Na figura 2.2 apresenta-se um pavimento, do tipo flexível, solicitado pelas condições climáticas e do tráfego. As camadas inferiores do pavimento devem ser permeáveis, para que a água infiltrada no pavimento saia facilmente. E as camadas betuminosas, nomeadamente a camada de desgaste deve ser impermeável à água.

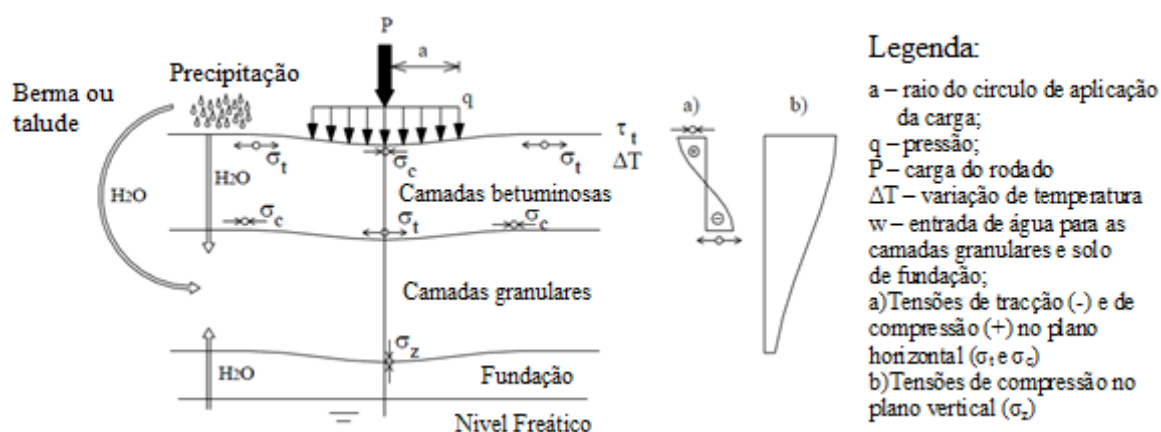


Figura 2.2 – Representação esquemática das solicitações e do comportamento dum pavimento rodoviário flexível (Minhoto, 2005)

Os pavimentos rígidos apresentam menor deformabilidade pelo facto de a camada superior dos pavimentos rígidos serem constituídas por betão de cimento, desempenhando o papel da camada de desgaste e de base numa única camada, funcionando como uma laje de

betão. A camada na qual assenta a laje de betão é a camada de sub-base e é constituída por material granular, podendo em alguns casos, ser estabilizada por um ligante hidráulico.

Os pavimentos semirrígidos têm as camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, sendo que as camadas de base são materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos, com uma importante influência na capacidade de carga do pavimento, pois, absorvem a maioria dos esforços verticais. A camada de sub-base é constituída por material granular estabilizado mecanicamente.

A resposta estrutural de cada um destes pavimentos é diferente perante as mesmas ações. Os pavimentos flexíveis, como apresentam uma camada superficial em material betuminoso, conduzem a uma maior concentração de tensões no solo de fundação, devido à flexibilidade das camadas superiores. Em relação aos pavimentos rígidos, têm uma maior distribuição de tensões no solo de fundação, sendo a tensão máxima menor quando comparada com a tensão máxima dos pavimentos flexíveis, como se pode ver na figura 2.3.



Figura 2.3 – Distribuição das tensões num pavimento rígido e num pavimento flexível (adaptado de Interactive, 2008)

## 2.4 Patologias em Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Os pavimentos rodoviários flexíveis ao longo dos anos em serviço desenvolvem degradações que contribuem para uma diminuição da qualidade estrutural e funcional do pavimento. Essas degradações são originadas pelas ações do tráfego e das condições climáticas, as quais atuando sobre um pavimento com determinadas características mecânicas e geométricas originam solicitações no pavimento que alteram as suas características iniciais. A sucessiva repetição destas condições origina degradações no pavimento. Esta atividade denominada de “princípio da cadeia de conseqüências” produz uma atividade em ciclo onde uma degradação resultante contribui para a evolução de outra degradação.

São considerados dois grupos de fatores que influenciam a degradação dos pavimentos: os fatores passivos e os fatores ativos. Os primeiros dependem do pavimento, nomeadamente das espessuras, do material e da qualidade de construção. Já os fatores ativos dependem das ações do tráfego e do clima e são os principais responsáveis pelas degradações dos pavimentos (Pereira & Miranda, 1999).

Existe quatro famílias de degradações para os pavimentos flexíveis: deformações, fendilhamento, desagregação da camada de desgaste e movimento de materiais. A tabela 2.2 ilustra a organização das diversas famílias, assim como, o tipo de degradações associado a cada família.

As deformações têm em geral como causa principal um comportamento anormal das diferentes camadas do pavimento e do solo de fundação (Pereira & Miranda 1999). Assim, a deficiente capacidade de suporte do solo de fundação, a compacidade insuficiente das camadas estruturais do pavimento, assim como, as más condições de drenagem são as principais causas de desenvolvimento das deformações.

Os tipos de degradação mais frequentes na família das deformações permanentes são os cavados de rodeira, que consistem na deformação permanente do pavimento na zona de passagem dos rodados dos veículos (Minhoto, 2005). A figura 2.4 apresenta uma degradação do tipo descrita, rodeiras, na qual evolui para um fendilhamento do tipo pele de crocodilo de malha estreita.



Figura 2.4 – Degradação tipo: rodeiras

O fendilhamento é a família de degradações mais frequente nos pavimentos flexíveis, e resulta principalmente da fadiga dos materiais das camadas betuminosas, devido à repetição dos esforços de tração por flexão destas camadas (Branco et al, 2008) e, em algumas

condições, devido às concentrações de tensões provocadas pela ação térmica (Minhoto, 2005).

Tabela 2.2 – Família e tipo de degradações (Pereira & Miranda, 1999)

Famílias de Degradações	Tipo de Degradações
Deformações	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abatimento</li> <li>- Deformações localizadas</li> <li>- Ondulação</li> <li>- Rodeiras</li> <li>- Longitudinal</li> <li>- Transversal</li> <li>- Grande raio (devido às camadas inferiores)</li> <li>- Pequeno raio (devido às camadas superiores)</li> <li>- Berma</li> <li>- Eixo</li> </ul>
Fendilhamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fendas</li> <li>- Pele de Crocodilo</li> <li>- Fadiga</li> <li>- Longitudinais</li> <li>- Transversais</li> <li>- Parabólicas</li> <li>- Malha fina (<math>\leq 40</math> cm)</li> <li>- Malha larga (<math>\geq 40</math> cm)</li> <li>- Berma</li> <li>- Eixo</li> </ul>
Desagregação da Camada de Desgaste	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desagregação superficial</li> <li>- Cabeça de gato</li> <li>- Pelada</li> <li>- Ninhos (covas)</li> </ul>
Movimento de Materiais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exsudação</li> <li>- Subida de finos</li> </ul>

O tipo de degradação mais importante na família do fendilhamento é a pele de crocodilo, pois, resulta, quase sempre, do desenvolvimento de diferentes estados de uma ou várias fendas ramificadas. A figura 2.5 ilustra uma degradação do tipo pele de crocodilo de malha estreita.

Quando um pavimento apresenta uma fenda ramifica em estado avançado, aumenta a probabilidade da entrada de água no pavimento e, também, aumenta a severidade da ação do tráfego e, assim, a degradação do pavimento é acelerada.

A desagregação da camada de desgaste tem como principais causas a deficiente qualidade dos materiais das camadas superiores, assim como, a falta de estabilidade entre os materiais que constituem a mistura betuminosa. Este tipo de degradação também pode estar associado a uma deficiente formulação da mistura betuminosa. A Figura 2.6 ilustra uma degradação tipo resultante do desprendimento de uma placa da camada de desgaste, designada de pelada.

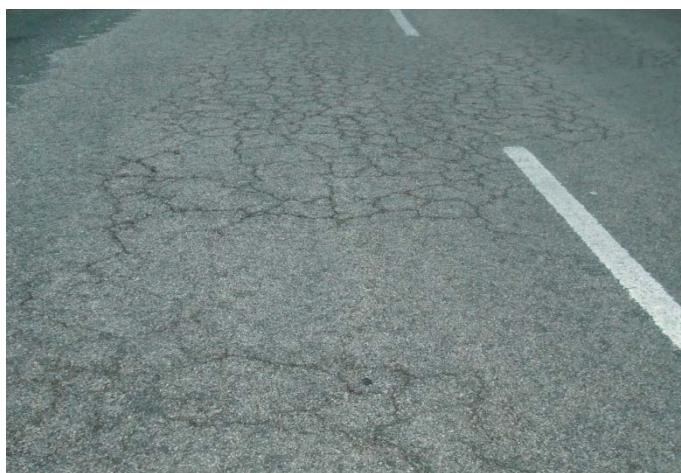


Figura 2.5 – Degradação tipo: pele de crocodilo



Figura 2.6 – Degradação tipo: pelada

O movimento de materiais está normalmente associado a problemas de drenagem e das camadas betuminosas fendilhadas. Os tipos de degradações associadas à família do movimento de materiais são: subida de finos e exsudação.

A subida de finos ocorre em pavimentos com problemas de drenagem e com excesso de água nas camadas que constituem o pavimento. Devido a solicitação do tráfego, esses pavimentos são sujeitos a uma pressão de compressão e a água tende a atravessar as camadas e transportar os materiais mais finos para a superfície, originando a subida de finos.

Por outro lado, as ações climáticas desfavoráveis juntamente com uma deficiente formulação da camada de desgaste podem originar o aparecimento de exsudações devido à migração para a superfície de um excesso de ligante. A figura 2.7 indica uma degradação do tipo exsudação.



Figura 2.7 – Degradação tipo: exsudações

## 2.5 Parâmetros de Estado Usados na Auscultação de Pavimentos

O desempenho funcional e estrutural de um pavimento rodoviário é avaliado através de parâmetros que caracterizam o estado do pavimento. Estes parâmetros são designados de “parâmetros de estado”.

Os processos de avaliação da qualidade dos pavimentos baseiam-se na definição de critérios que têm em conta a análise da interação entre o estado do pavimento, a respetiva capacidade estrutural e o utente da estrada. Este processo de avaliação compreende duas fases fundamentais (Pereira & Miranda, 1999):

- a observação de pavimentos, também designada por auscultação;
- o tratamento dos dados obtidos, com vista à produção de informação a ser utilizada nas fases posteriores de um sistema de gestão.

Os parâmetros de estado mais utilizados na avaliação da qualidade de pavimentos novos ou pavimentos existentes são:

- deflexão
- estado superficial
- regularidade longitudinal
- atrito transversal

A capacidade estrutural de um pavimento é estimada através do estudo das deflexões de um pavimento, pois, a deflexão constitui o melhor indicador da avaliação do comportamento estrutural de um pavimento.

O conhecimento das deflexões de um pavimento existente é efetuado através de campanhas de deflectometria. A deflectometria permite recolher informação sobre as deformações verticais (deflexões) à superfície de um pavimento quando o pavimento é solicitado por uma determinada carga. No próximo capítulo será apresentada uma descrição da metodologia usada na realização da deflectometria, assim como, as etapas após a deflectometria, que permitem avaliar estruturalmente um pavimento, designada de auscultação estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis.

O estado superficial é um parâmetro de estado mais preponderante na avaliação da qualidade dos pavimentos, pois permite classificar as degradações observáveis à superfície do pavimento (Branco et al, 2008).

O tipo de degradação que mais peso tem nesta avaliação é o fendilhamento, nomeadamente a pele de crocodilo, sendo num sistema de gestão o tipo de degradação com mais frequência de observação.

As degradações podem ser observadas de duas formas: por um operador que se desloca a pé ou num veículo a baixa velocidade, ao longo de toda a extensão do trecho em estudo registando as degradações visíveis, e por equipamentos fotográficos ou de vídeo, nomeadamente o GERPHO (*Groupe d'Examen Routier par Photographie*). O GERPHO é um sistema desenvolvido pelo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), constituído por um veículo equipado com uma câmara fotográfica de saída contínua, que permite fotografar o pavimento na vertical, à velocidade de 60 Km/h (Pinto, 2003).

A regularidade longitudinal é um parâmetro de estado que caracteriza o perfil longitudinal de um pavimento. Na construção de pavimentos rodoviários existe sempre um desvio entre o perfil construído e o perfil de projeto. Este desvio constitui a chamada irregularidade geométrica da superfície do pavimento (Pereira & Miranda, 1999).

A irregularidade do perfil longitudinal pode ser analisada sob dois aspetos (Branco et al, 2008):

- geométrico (variações da geometria existente relativamente à geometria ideal);
- efeitos físicos provocados pela irregularidade.

Os efeitos físicos provocados pela irregularidade englobam os defeitos da superfície do pavimento suscetíveis de provocarem vibrações nos veículos.

Existe diferentes tipos de equipamentos capazes de avaliar a irregularidade longitudinal de um pavimento: equipamentos baseados na resposta dinâmica de um veículo; equipamentos de referência geométrica simples e equipamentos baseados na obtenção de uma “imagem” do perfil da superfície do pavimento (Pereira & Miranda, 1999).

Um dos equipamentos baseados na observação do perfil do pavimento é o APL - Analisador do Perfil Longitudinal (*Analiseur du Profil en Long*). Este equipamento permite a observação de um “pseudo-perfil” do pavimento auscultado e calcula índices de irregularidade nomeadamente o IRI (*International Roughness Index*) que avalia a irregularidade do pavimento (Branco et al, 2008).

O parâmetro de estado que permite avaliar a segurança rodoviária é o atrito transversal entre os pneumáticos e a superfície do pavimento e é avaliado por um coeficiente de atrito transversal (CAT). Este parâmetro evolui ao longo do tempo de vida do pavimento e depende de vários fatores (Branco et al, 2008):

- desgaste dos agregados, devido à ação de polimento provocada pelos pneus;
- exsudação na camada de desgaste;
- aparecimento de descontinuidades devidas ao fendilhamento;
- redução da porosidade do pavimento, devido à densificação da camada de desgaste;
- existência de rodeiras, provocando a acumulação de água, com produção do fenómeno de aquaplanagem e a formação de gelo;
- poluição devida ao derrame de combustíveis que afetam os materiais da camada de desgaste.

A medição do atrito pode ser realizada por observações pontuais ou por observações em contínuo. O método que permite a avaliação pontual do atrito é o Pêndulo Britânico, que simula a passagem dos veículos à uma velocidade de 50 Km/h e permite a medição do coeficiente de atrito cinemático, através da avaliação da energia absorvida por atrito, quando o escorregador de borracha do pêndulo desliza sobre um local de ensaio. O equipamento que permite medir o coeficiente de atrito em contínuo é o SCRIM (*Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine*) e integresse de forma normal no fluxo de tráfego (Pereira & Miranda, 1999).

## 2.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os tipos de pavimentos rodoviários mais correntes, assim como, a constituição de cada tipo de pavimento e suas funções.

Ao longo dos anos que um pavimento está em serviço desenvolve degradações que contribuem para a diminuição da qualidade global de um pavimento. Neste ponto de vista, foi apresentado os tipos de degradações mais usuais num pavimento rodoviário flexível.

Para que o pavimento proporcione ao longo dos anos em serviço uma boa qualidade funcional e estrutural aos utentes, é necessário que aja um sistema de gestão capaz de identificar as patologias do pavimento. Normalmente, a auscultação aos pavimentos rodoviários permite uma avaliação dos parâmetros de estado e, como tal, avaliar a qualidade funcional e estrutural do pavimento, contribuindo estes dois tipos de auscultação para uma melhoria da circulação rodoviária.

A capacidade estrutural dos pavimentos existentes é avaliada por equipamentos capazes de medir a deflexão de um pavimento. Assim, é importante perceber como se processa a auscultação estrutural num pavimento rodoviário, os equipamentos utilizado e as técnicas que conduzem a sua caracterização mecânica.

### **3. AUSCULTAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS**

#### **3.1 Introdução**

A avaliação da capacidade estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis existentes engloba um conjunto de métodos que podem ser: métodos empíricos e métodos analíticos. Os métodos empíricos assentam, principalmente, na observação do comportamento de pavimentos rodoviários, enquanto, os métodos analíticos baseiam-se na análise de parâmetros relacionados com a capacidade de carga (Antunes, 1999). O parâmetro mais utilizado na medição da capacidade de carga é a deflexão medida num ensaio de carga, resultante da utilização de equipamentos apropriados.

As deformações observáveis à superfície dos pavimentos, também designados por deflexões, constituem o melhor indicador da qualidade estrutural do corpo do pavimento e, em particular, das camadas granulares e da capacidade de suporte do solo de fundação no caso de pavimentos flexíveis (Pereira & Miranda, 1999), e refletem a influência de vários parâmetros, tais como, a espessura das diversas camadas e as características mecânicas dos materiais constituintes (EP-JAE, 1995a).

Ao longo do tempo em que o pavimento está sujeito a ação do tráfego e dos agentes climatéricos, é possível verificar que há uma evolução das deflexões e que estas tendem a diminuir ao longo dos anos em que o pavimento está em serviço, apresentando, na fase final da vida do pavimento, um aumento da deflexão (figura 3.1). Existem seis fases fundamentais onde é possível classificar a evolução das deflexões ao longo do tempo em serviço de um pavimento rodoviário flexível.

Considerando a figura 3.1, numa primeira fase designada de fase A, o pavimento está degradado e com uma elevada deflexão. Após a execução do reforço ao pavimento, verifica-se o aumento da capacidade de suporte do mesmo e, como tal, uma diminuição da deflexão. A deflexão continua a diminuir até a fase C devido à melhoria das características mecânicas dos materiais que constituem o pavimento, principalmente, devido ao aumento da rigidez das camadas betuminosas do reforço por pós-compactação. A fase D é caracterizada pela estabilização da deflexão durante um período de tempo mais longo de entre as seis fases. Esta fase é definida principalmente devido ao bom desempenho do corpo do pavimento às ações que está sujeito. Na fase E, o pavimento já começa a apresentar alguns sinais de fadiga,

nomeadamente o desenvolvimento de fendas à superfície. Por último, temos a fase F que é uma fase em que o pavimento entrou em estado de ruína e, portanto, um aumento da deflexão não suportado pelo pavimento (Branco et al, 2008).

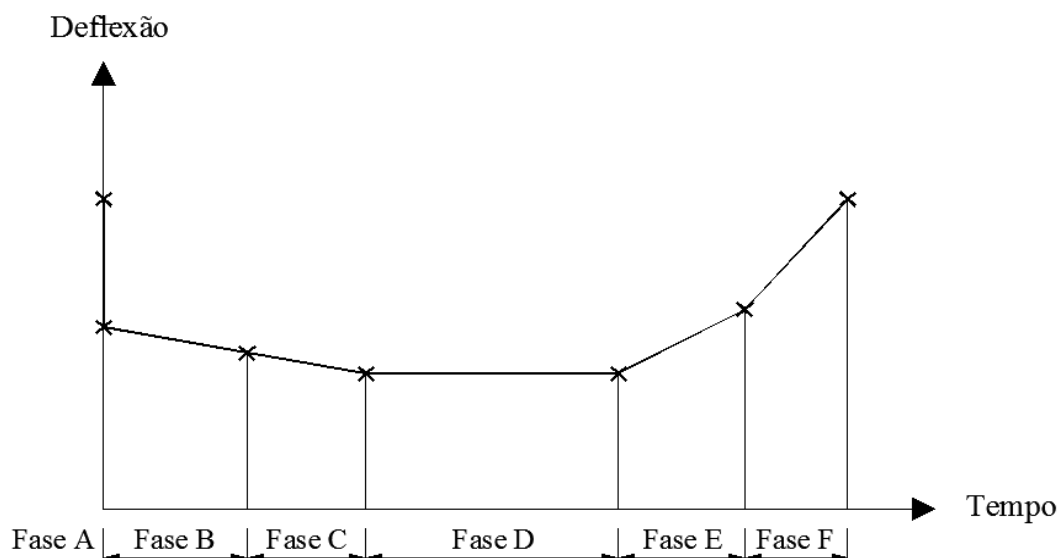


Figura 3.1 – Evolução da deflexão ao longo do tempo (Pereira & Miranda, 1999)

### 3.2 Equipamentos de Ensaio

Os ensaios que permitem a realização da auscultação de pavimentos rodoviários com o intuito de avaliar a qualidade estrutural do pavimento e posterior caracterização do seu comportamento estrutural são divididos em dois tipos de ensaios. Os ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos.

Os ensaios destrutivos (por exemplo: carotagem) são realizados para que sejam efetuados ensaios laboratoriais das amostras retiradas, com a finalidade de identificar os materiais, a resistência estrutural das camadas do pavimento e espessuras presentes no pavimento em estudo.

Os ensaios não destrutivos são ensaios que utilizam equipamentos de avaliação da capacidade de carga do pavimento, através da medição das deflexões por equipamentos designados de deflectómetros. Os deflectómetros permitem obter a bacia de deflexão para um determinado ponto de ensaio, quando sobre o pavimento é aplicada uma carga pontual ou uma carga rolante.

Os equipamentos que utilizam a carga pontual para a realização dos ensaios são deflectómetros que medem a deflexão resultante do impacto de uma massa, que cai de uma determinada altura, sobre um determinado ponto da superfície do pavimento.

Os ensaios realizados por carregamentos designados de carga rolante utilizam equipamentos, que através de uma carga aplicada pela passagem de um eixo de um veículo pesado, permitem obter uma linha de influência de carga relativamente a um ponto fixo. Este tipo de ensaios apresenta a vantagem de induzir nos pavimentos ações semelhantes às do tráfego em termos do modo de aplicação e da grandeza das cargas aplicadas. No entanto, tem como desvantagens o facto de as velocidades a que são efetuados os ensaios serem muito baixas, não representando, portanto, as velocidades de circulação do tráfego (Antunes, 1999).

Na figura seguinte são identificados os tipos de equipamentos associados aos ensaios não destrutivos, em função do tipo de carga com que é realizado o ensaio.

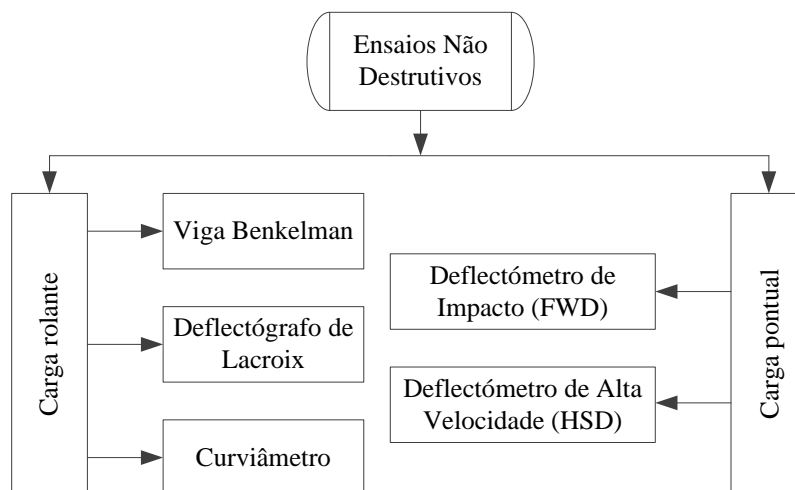


Figura 3.2 – Equipamentos utilizados nos ensaios não destrutivos

### 3.2.1 Viga Benkelman

A viga Bekelman é um equipamento que permite medir deflexões reversíveis (deformações verticais) de um pavimento, quando sobre o mesmo se aplica uma carga quase estática através dum rodado duplo dum eixo de um veículo pesado. É, portanto, um método não destrutivo que permite obter deflexões para determinados pontos do pavimento.

O modo de funcionamento da viga Benkleman consiste no princípio da alavanca de braço simples. Como se pode ver na figura 3.3, este braço de ensaio tem no seu extremo uma ponta apalpadora e o conjunto funciona como uma sonda alongada, com 2.44 m de comprimento,

com a qual se obtém as deflexões do pavimento. O braço de ensaio é sustentado por uma viga de referência fixa, que assenta no pavimento para fora da área de influência do ensaio.

Tendo como referência a viga Benkelman da ESTIG, IPB, a parte do braço de ensaio que se encontra para trás do eixo de rotação e de fixação do braço na viga de referência, tem um comprimento de 1.22 m e no seu extremo encontra-se instalado um extensómetro (figura 3.4) com precisão de 0.01 mm que mede o efeito das deflexões ocorridas na ponta apalpadora. A viga vem equipada com um vibrador (ver figura 3.4) que tem a função de ajudar a dissipar o atrito entre as peças móveis e evitar eventuais inibições do ponteiro do extensómetro.

Deve existir uma relação entre os comprimentos da ponta apalpadora ao eixo de rotação e deste ao ponto de acionamento do extensómetro. Assim, qualquer leitura registada no extensómetro deve ser corrigida para obter o valor correto da deflexão medida na ponta apalpadora.

Os veículos a usar na medição das deflexões *in situ* deverão ter um eixo traseiro simples e estar carregados de forma a produzir um peso no eixo traseiro de 80kN. O rodado deverá ser duplo com uma pressão média nos pneus de 70 Psi.

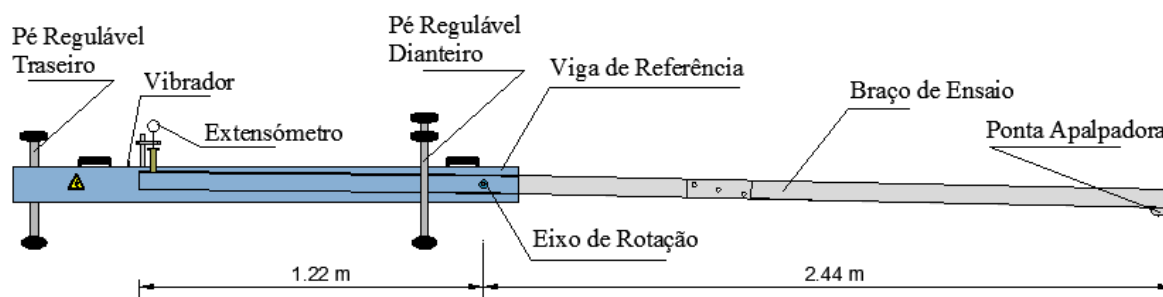


Figura 3.3 – Esquema da Viga Benkelman da ESTG, IPB

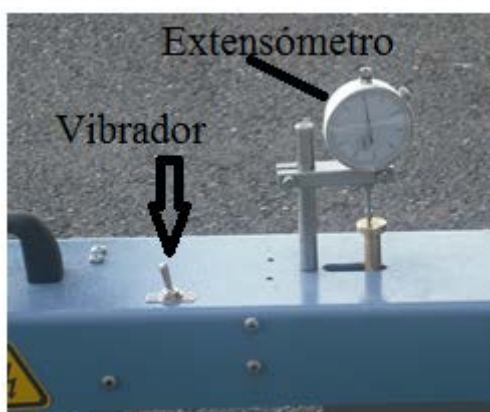


Figura 3.4 – Pormenor do vibrador e do extensómetro

Existem três possíveis procedimentos operativos com a Viga Benkelman, caracterizados em função dos pontos de medição da deflexão: método do retrocesso; método da recuperação e método da linha de influência.

Os três métodos têm em comum o posicionamento da ponta apalpadora entre os rodados do veículo pesado e a velocidade do veículo pesado na execução dos ensaios. Assim, o rodado duplo deve ser posicionado de maneira a que o veículo pesado ao efetuar o deslocamento a uma velocidade de 2 a 3 Km/h, chegue à ponta apalpadora e efetue um movimento na perpendicular, com a ponta apalpadora posicionada entre o rodado.

Em relação ao método do retrocesso, a leitura da deflexão faz-se para os pontos distanciados da Viga Benkelman de: -1.00 m; 0.00 m e 8.00 m. Este método consiste em colocar o veículo pesado no ponto inicial distanciado da ponta da apalpadora da viga Benkelman de 8.00 m e registar a deflexão neste ponto. A partir desse ponto o veículo continua o seu movimento até que chega ao ponto de leitura de 0.00 m, onde é registado a deflexão máxima. O veículo pesado continua o seu movimento até aos -1.00 m, momento no qual o veículo pesado inverte a sua marcha e continua o movimento, no sentido contrário ao desenvolvimento da Viga, até ao ponto de leitura inicial, os 8.00 m.

O método da linha de influência tem como pontos de medição da deflexão: -1.00 m; 0.00 m; 0.25 m; 0.50 m; 1.00 m; 2.50 m; 3.70 m e 5.00 m. Este tipo de ensaio pode ser caracterizado como um “ensaio de descarga”.

Inicialmente o veículo pesado está posicionado no ponto -1.00 m, onde dá início ao seu movimento, no sentido contrário ao desenvolvimento da Viga. O deslocamento do veículo pesado continua até percorrer 5.00 metros para lá do ponto de ensaio ou até se verificar uma estabilização da deflexão. Durante o movimento do veículo pesado, as leituras das deflexões são registadas para os pontos de leitura que caracterizam a linha de influência e durante esse movimento o deslocamento do veículo pesado, em momento algum, é interrompido, ou seja, o veículo pesado não para no momento da leitura das deflexões.

A linha de influência dá uma informação acerca da evolução das deflexões ao longo da distância percorrida pelo veículo pesado e, como tal, do comportamento estrutural do pavimento. Um exemplo de uma linha de influência é a que se representa na figura 3.5.

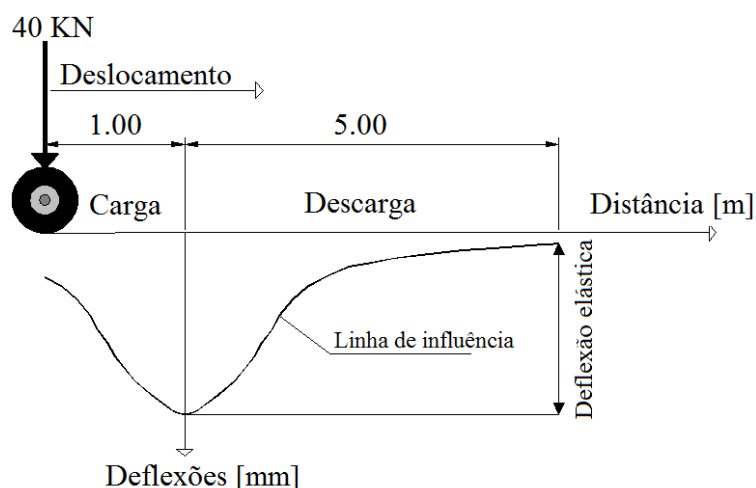


Figura 3.5 – Defletograma - Linha de influência obtida no ensaio com a Viga Benkelman (adaptado de Pereira & Miranda, 1999)

O método da recuperação tem como pontos de leitura: -1.00 m; 0.25 m; 2.50 m; 3.70 m; 5.00 m e 8.00 m. Neste método, o início do movimento do veículo pesado é no ponto de leitura de -1.00 m. Basicamente este ensaio tem um procedimento igual ao da linha de influência, estando a diferença nos pontos de leitura das deflexões.

Para os diferentes procedimentos operativos com a Viga Benkelman, a deflexão máxima é registada na altura em que o rodado duplo passa no ponto de localização da ponta apalpadora. A diferença entre a deflexão máxima registada, que fornece uma informação sobre a capacidade estrutural global do pavimento e o valor final da deflexão, corresponde a deflexão elástica, como se pode ver na figura 3.5 e é relacionada com a capacidade estrutural do pavimento rodoviário.

Os ensaios efetuados com Viga Benkelman são realizados nas zonas coincidentes com as rodeiras externas dos veículos. As rodeiras externas devem estar distanciadas da berma de: 0.5 metros se a largura da via for de 2.8 metros ou menos; 0.6 metros para uma largura da via de 3.0 metros; 0.7 metros para uma via de 3.2 metros; 0.8 metros para uma via de 3.4 metros e de 0.9 metros para uma via de 3.6 metros ou mais de largura (TNZ T/1, 1977). E devem estar distanciados no máximo de 100 metros ao longo do trecho em estudo para cada uma das vias da faixa de rodagem.

### 3.2.2 Deflectómetro de Impacto

O deflectómetro de Impacto (*Falling Weight deflectometer* – FWD) é um equipamento destinado a avaliar a capacidade estrutural de um pavimento através da medição da sua

resposta a uma carga de impacto. A velocidade de aplicação da carga simula a passagem veículos a 60 - 80 Km/h (Branco et al, 2008). A força de impacto é transmitida ao pavimento através de uma placa de carga circular, que promove uma distribuição relativamente uniforme das pressões aplicadas à superfície. Através da variação da massa cadente, da respetiva altura de queda e das características dos amortecedores, é possível aplicar cargas com valores de pico variáveis. No caso do equipamento do LNEC, que se ilustra na figura 3.6, as forças de pico podem variar entre 20 e 150 KN (Antunes et al, 2004).

O impacto transmitido ao pavimento deve ser realizado, no mínimo, em quatro vezes. O primeiro impacto corresponde a um baixo nível de carga, que se destina ao eficiente posicionamento da placa de carga. Os restantes impactos têm por objetivo a verificação da linearidade dos materiais ensaiados. O primeiro impacto deve ser omissivo para a análise (InIR, 2009).



Figura 3.6 – Deflectómetro de Impacto do LNEC (Antunes et al, 2004)

O registo do assentamento da superfície do pavimento efetua-se por meio de diversos geofones, distribuídos ao longo do eixo da aplicação da carga (figura 3.7). O sistema que constitui o deflectómetro de impacto é suportado por um reboque, que na altura de medição das deflexões é posicionado no ponto de medida. Todo o registo de dados, assim como, os comandos necessários à realização do ensaio estão dentro de um veículo rebocador.

Devido à não homogeneidade do impacto de carga em cada ponto de ensaio, é necessário normalizar as deflexões registadas nos geofones para uma força de impacto padrão. Dependendo da força de impacto selecionada, a normalização é realizada de acordo com a seguinte fórmula:

$$D_i^{norm} = C_p \times \frac{D_i^{med}}{C_{med}} \quad (3.1)$$

Sendo:

$D_i^{\text{norm}}$  = deflexão no geofone i, normalizada para a carga padrão,  $C_p$

$D_i^{\text{med}}$  = deflexão no geofone i, medida no impacto do ensaio da carga registada

$C_{\text{med}}$  = força de impacto registada no impacto, em KN

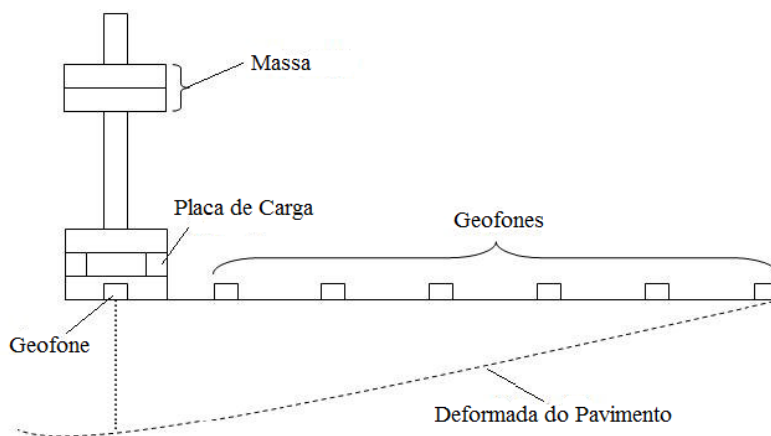


Figura 3.7 – Posicionamento dos geofones (Das, 2010)

### 3.2.3 Deflectógrafo de Lacroix

O deflectógrafo de Lacroix, representado na figura 3.8 foi desenvolvido com o intuito de ultrapassar as limitações que a viga Benkelman oferece. É um equipamento que permite medir as deflexões à superfície do pavimento, quase em contínuo, a uma velocidade de 3 a 8 Km/h e permite medir as deflexões a um intervalo de 5 a 10 metros.



Figura 3.8 – a) camião que transporta o deflectógrafo de Lacroix e b) viga metálica em posição de ensaio (SACR, 2012)

O equipamento é composto por uma viga metálica (figura 3.8 b)), situada por baixo do camião, constituindo um plano de referência com três pontos de apoio sobre o pavimento, fora da área de influência da carga, dois braços captadores que podem rodar, segundo um plano vertical, em torno do plano de referência; uma caixa junto à articulação de cada braço, contendo o equipamento eletrónico de registo, que transforma em sinal elétrico o deslocamento devido à rotação dos braços (Branco et al, 2008).

O ensaio realiza-se sempre com o camião em movimento e na altura de mudar de posição de ensaio o camião reboca a viga de referência para outra posição. O registo das deflexões é efetuado quando o eixo traseiro de rodados duplos aproxima-se à ponta apalpadora, registando, nessa altura a deflexão máxima, para cada um dos braços captadores, provocada por uma carga de ensaio que pode ir até aos 130 KN. Portanto, é um ensaio que regista a deflexão máxima na fase de carga.

### 3.2.4 Curviâmetro

O curviâmetro (figura 3.9) é um equipamento que permite o registo das deflexões do pavimento a uma velocidade máxima de 18Km/h. O equipamento de registo de dados está sobre um camião de dois eixos separados entre eles de 5 metros, sendo que o eixo traseiro é um eixo simples de rodado duplo. A carga aplicada no eixo traseiro pode variar entre os 80 KN e os 130 KN.



Figura 3.9 – Camião que transporta o curviâmetro (Dias & Dominguez, 2011)

A determinação da bacia de deflexão é efetuada por um sistema mecânico formado por uma corrente, como a ilustrada na figura 3.10 posicionada entre o rodado duplo, na qual tem instalado três geofones, distanciados entre si de 5 metros ao longo dos 15 metros de comprimento da corrente, que permitem o registo de uma bacia de deflexão de 5 em 5 metros.

A sincronização entre a corrente e o camião é tal, que sempre que o camião percorre 15 metros a corrente realiza uma volta completa (Dias & Dominguez, 2011).



Figura 3.10 – Corrente do Curviâmetro (Sina, 2012)

O início do registo das deflexões tem origem quando o geofone está um metro à frente do eixo traseiro e o fim de registo dá-se quando o mesmo geofone está três metros para trás do eixo traseiro, deixando o geofone de estar em contacto com o pavimento quando se encontra a uns 3,5 metros do eixo traseiro. Assim, uma bacia de deflexão, como a que se visualiza na figura 3.11 tem um comprimento de 4 metros.

O curviâmetro dispõe ainda de registos da temperatura, quer do ar quer da superfície do pavimento, para cada ponto medida. Todos os resultados são obtidos em tempo real e posteriormente são processados para tratamento estatístico.

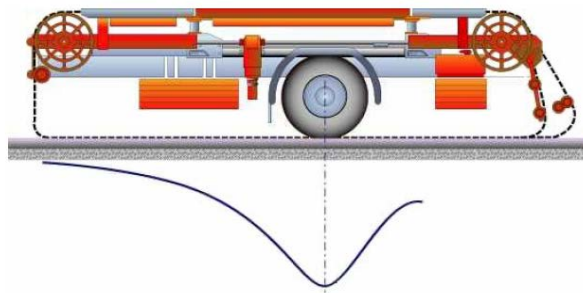


Figura 3.11 – Bacia de deflexão (EUROCONSULT, 2004)

### 3.3 Análise dos Resultados de Auscultação

A auscultação estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis permite classificar estruturalmente o pavimento e, como tal, permite o conhecimento da vida remanescente do pavimento.

Após a auscultação estrutural a um pavimento rodoviário flexível é necessário proceder-se a um estudo dos dados obtidos, nomeadamente as deflexões para os diferentes pontos de ensaio.

A figura 3.12 indica as etapas fundamentais a proceder neste tipo de estudo. São de destacar quatro etapas fundamentais:

- divisão em zonas de comportamento estrutural homogéneo;
- cálculo da deflexão característica;
- caracterização mecânica do pavimento existente;
- correção do módulo de deformabilidade para a temperatura de projeto.

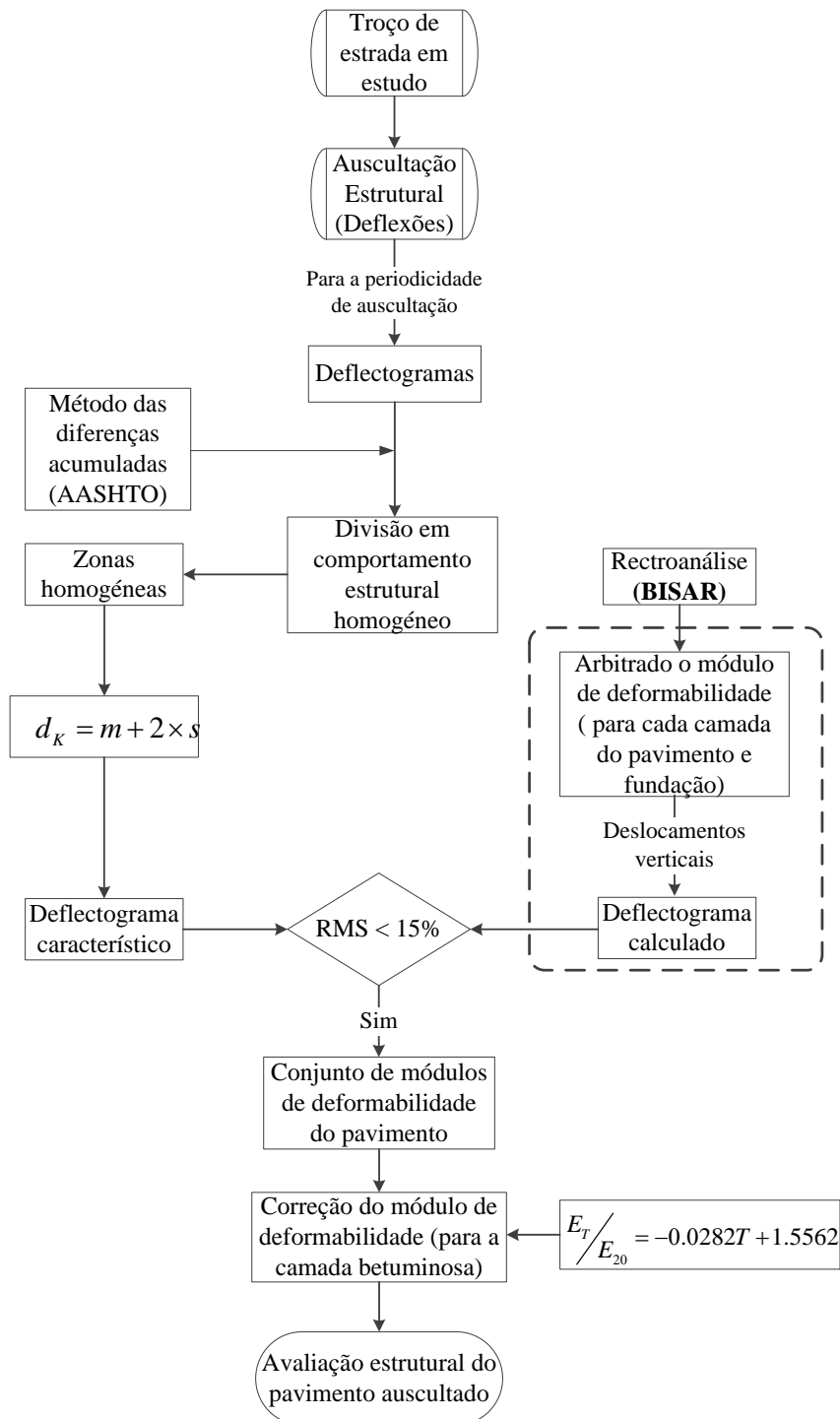


Figura 3.12 – Fluxograma para a avaliação estrutural do pavimento auscultado

### 3.3.1 Divisão em Zonas de Comportamento Estrutural Homogéneo

A avaliação estrutural de pavimentos rodoviários é realizada, em muitos casos, em trechos rodoviários de grande extensão, pelo que, é necessário uma análise estatística dos dados da auscultação do pavimento. Assim, depois da campanha da deflectometria é recomendável a divisão do troço de estrada em zonas de comportamento estrutural homogéneas.

Um trecho de estrada, em estudo, é considerado homogéneo quando se verifica uniformidade dos seguintes parâmetros:

- tipo de pavimento;
- data de construção do pavimento e obras de conservação e reforço;
- constituição do pavimento (secção transversal);
- classe de tráfego;
- tipo de solo de fundação.

A figura 3.13 ilustra os parâmetros que normalmente estão disponíveis, em dados históricos de um determinado troço de estrada, para a divisão do troço de estrada em zonas de comportamento estrutural homogéneo. Os dados disponíveis devem ser cuidadosamente analisados para que o erro de divisão em secções de comportamento homogéneo seja o menor possível. Assim, para o troço de estrada em estudo, a divisão é efetuada quando há uma mudança de um parâmetro para outro, num determinado ponto de estudo.

Segundo (Jacinto et al, 2006) as deflexões máximas, registadas para a frequência de auscultação é um dos elementos importantes para a divisão de um pavimento em zonas homogéneas, uma vez que estas deflexões fornecem uma informação global acerca da resposta do pavimento

Assim, na divisão do trecho em zonas homogéneas é utilizado o método da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). O método da AASHTO utiliza a metodologia do método das diferenças acumuladas (*Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences*).

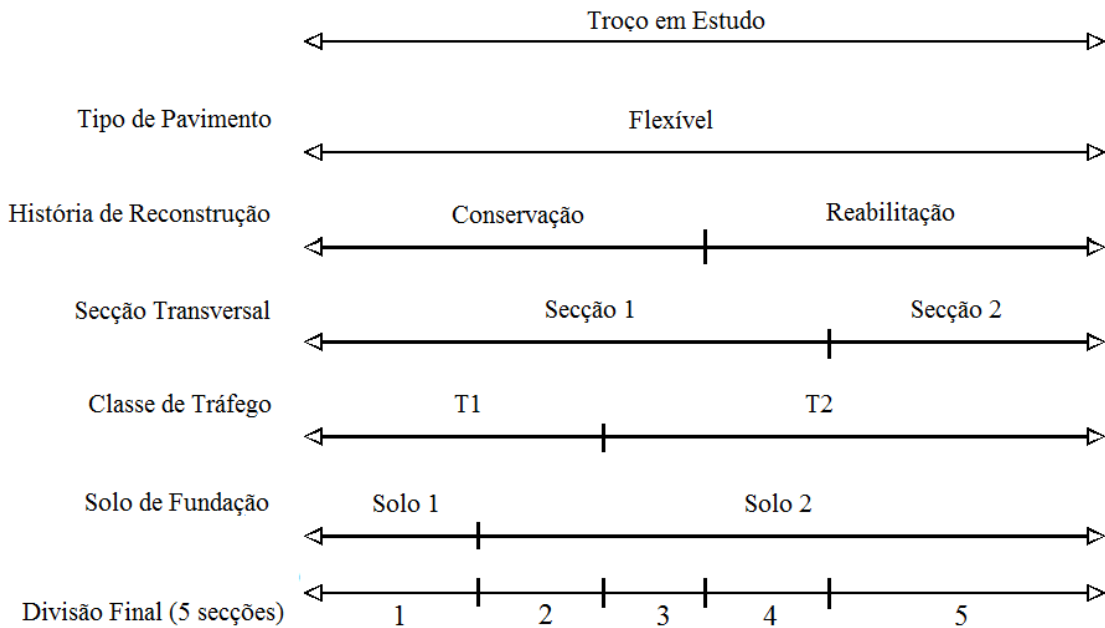


Figura 3.13 – Fatores a considerar para a divisão em comportamento homogêneo (adaptado de NCHRP, 2004)

### 3.3.1.1 Método das Diferenças Acumuladas (*Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences*)

Através da metodologia das diferenças acumuladas, a divisão do trecho de estrada em segmentos homogêneos pode ser realizada para qualquer parâmetro que for revelante. No entanto, como já referido, para a avaliação estrutural de um pavimento é utilizado a deflexão máxima resultante dos ensaios, por ser a deflexão que caracteriza globalmente o pavimento em estudo.

Assim, a divisão em zonas homogêneas pelo método da AASHTO segue o seguinte procedimento:

- cálculo da média da deflexão máxima registada para todos os pontos de ensaio do trecho de estrada auscultado;
- para os pontos de ensaio, realizados ao longo do trecho de estrada, calcular a diferença entre a deflexão máxima registada no ponto de ensaio *i* e a média da deflexão máxima. Procedimento denominado de cálculo dos desvios em relação à média da deflexão máxima;
- soma dos desvios acumulados para cada ponto de medição da deflexão máxima em todo o trecho auscultado;

- realização do gráfico em que nas abcissas se desenvolvem os pontos de ensaio ao longo do trecho auscultado e nas ordenadas os valores dos desvios acumulados.

De um modo geral, os cálculos a realizar seguem a seguinte expressão de cálculo:

$$Z_i = d_i - d_m + Z_{i-1} \quad (3.2)$$

em que

$Z_i$  = é a soma acumulada dos desvios da média ao ponto de ensaio  $i$

$d_i$  = a deflexão máxima do ponto de ensaio  $i$

$d_m$  = média da deflexão máxima para todo o trecho auscultado

A figura 3.14 ilustra um gráfico tipo obtido pelo método descrito anteriormente. Este gráfico permite delimitar as zonas homogêneas, e para cada intervalo de mudança de declive do segmento em estudo é definido uma zona de comportamento estrutural homogêneo.

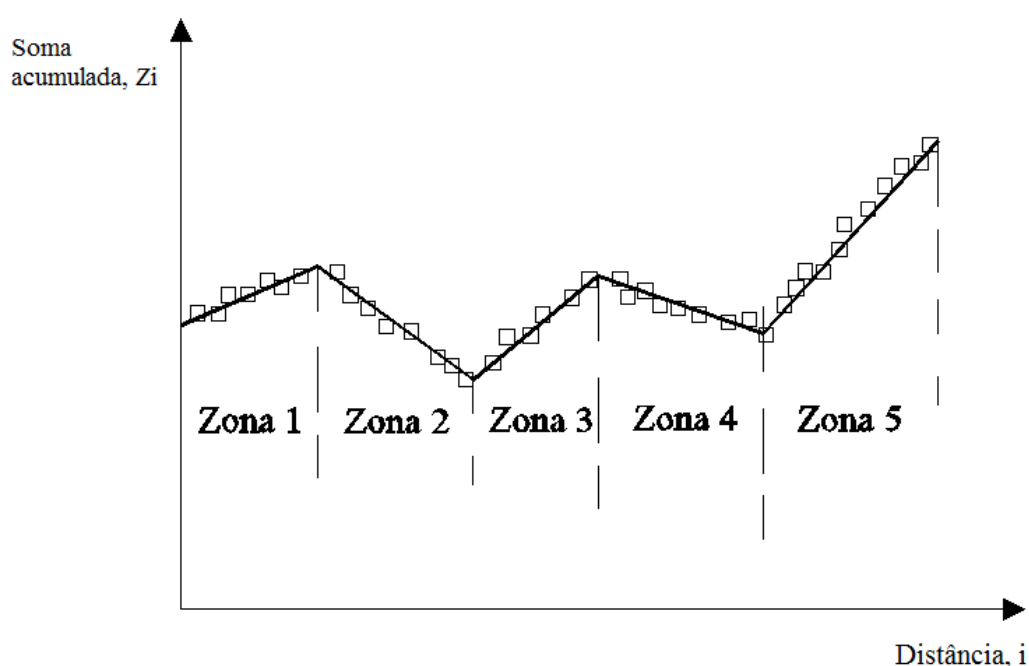


Figura 3.14 – Divisão das zonas homogêneas pelo método das diferenças acumuladas  
(adaptado de NCHRP, 2004)

### 3.3.2 Deflexão Característica

Para cada zona de comportamento estrutural homogêneo é necessário obter a deflexão característica dessa zona para que seja possível, posteriormente, uma análise do deflectograma

obtido pelas deflexões características e classificar estruturalmente o pavimento, e se necessário o estudo de uma solução de reabilitação estrutural.

Em cada tramo homogéneo, é selecionado o valor da deflexão que se considerou representativo do estado do pavimento. Normalmente utiliza-se um valor de deflexão característica,  $d_K$ , e supondo que os mesmos se distribuem segundo uma distribuição de Gauss, que poderá ser definido pela seguinte expressão (Jacinto et al, 2006):

$$d_K = m + 2 \times s \quad (3.3)$$

onde:

$$m = \sum \frac{d_i}{n} \quad (3.4)$$

$$s = \sqrt{\sum \frac{(d_i - m)^2}{(n-1)}} \quad (3.5)$$

Sendo:

$m$  = média

$d_i$  = a deflexão do ponto de ensaio  $i$

$n$  = número de pontos medidos

$s$  = desvio padrão

O coeficiente 2 indicado na equação 3.3 equivale a uma probabilidade de a deflexão característica não seja ultrapassada no sub-trecho de 97.5% (o valor 2 é uma aproximação de 1.96 que se obtém com uma distribuição normal).

No entanto, alguns projetistas consideram para a deflexão de projeto, o valor correspondente ao percentil 85%, pois o percentil de 97,5% coincide ou ultrapassa em muitas situações o valor máximo da deflexão. Por outro lado, o percentil de 85% corresponde a uma probabilidade da deflexão considerada ser ultrapassada de 15%, o que é um valor já muito conservativo (Jacinto, 2003).

### 3.3.3 Caracterização Mecânica do Pavimento

A avaliação estrutural do pavimento só fica concluída quando é conhecido os módulos de deformabilidade de cada camada e do solo de fundação que permitem caracterizar mecanicamente o pavimento existente.

O método que permite determinar o módulo de deformabilidade de cada camada e do solo de fundação é designado de retroanálise (Backcalculation). Este método é baseado num processo iterativo e consiste na comparação de deslocamentos, deslocamentos superficiais no pavimento, obtidos pelos ensaios não destrutivos, com os deslocamentos obtidos pelo programa de cálculo automático BISAR (*Bitumen Stress Analysis in Roads*). Esta comparação é realizada com o objetivo de analisar a convergência entre as duas deformadas.

Este programa é baseado nas hipóteses de cálculo consideradas por Burmister e permite calcular tensões, extensões e deslocamentos num sistema elástico de multicamadas, em que, na superfície do pavimento atua uma carga vertical uniformemente distribuída numa área circular de raio  $r$  (Figura 3.15). O sistema é definido pela seguinte configuração e comportamento do material (SHELL, 1998):

- o sistema é constituído por camadas horizontais de espessura uniforme que assentam sobre um meio semi-infinito;
- as camadas horizontais na direção horizontal são infinitas;
- o material de cada camada é homogéneo e isotrópico;
- os materiais são elásticos e têm uma relação de tensão-extensão linear.

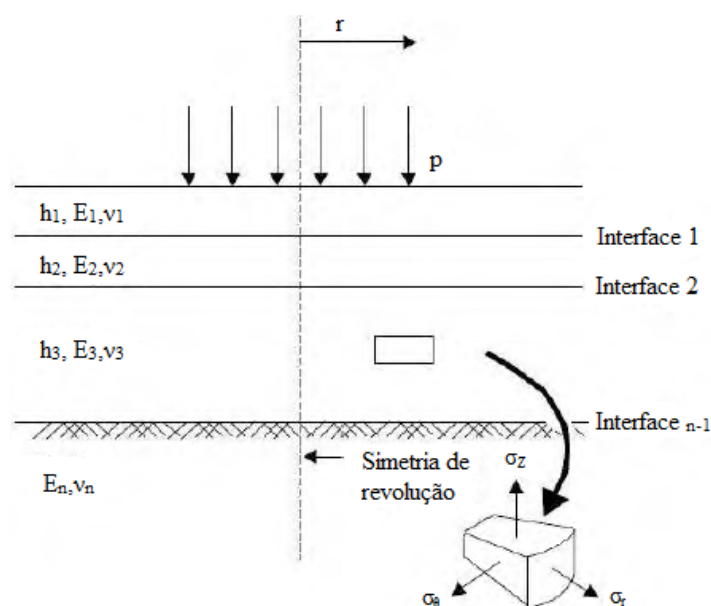


Figura 3.15 – Modelo de Burmister (Santos, 2009)

Permite ainda considerar que nas condições de continuidade entre camadas pode ser considerada duas situações: interface completamente aderente, com ligação perfeita e continuidade de tensões e deslocamentos (camadas ligadas), e interface não aderente não ocorrendo transmissão de tensões e de deslocamentos (camadas não ligadas).

Os dados iniciais de entrada no Programa BISAR que permitem dar início ao processo de retroanálise são: espessura das camadas do pavimento, respetivos coeficientes de Poisson e módulos de deformabilidade (arbitrados), e definição da ação da carga em que foram realizados os ensaios.

Os módulos de deformabilidade são arbitrados tendo em conta os valores usuais representados na tabela 3.1 e, também, da amplitude das deflexões do deflectograma característico da zona de comportamento estrutural homogéneo. Cada etapa de iteração dá origem a um conjunto de deslocamentos que definem a deformada calculada. Se o erro (RMS – *Root Mean Square*) entre a deformada calculada e a deformada medida, correspondente ao ensaio de descarga, for inferior a 15% (RMS <15%), é considerado que existe uma boa relação entre os módulos de deformabilidade encontrados com o comportamento estrutural do pavimento.

Tabela 3.1 – Módulos de deformabilidade usuais para camadas do pavimento (EP-JAE, 1995a)

Camada	Módulo de deformabilidade (MPa)
Betão betuminoso	7000 a 9000 (T=15°C) 5000 a 6000 (T=20°C) 3000 a 4000 (T=25°C)
Betão betuminoso fendilhado	500 a 1000
Penetração betuminosa	500 a 1000
Agregado tratado com cimento	10000 a 20000
Solo-cimento	1000 a 5000
Base granular britada	150 a 300
Sub-base granular britada	100 a 200
Solos seleccionados	60 a 100

Assim, a boa aproximação que pode existir entre a deformada representativa de cada zona e a obtida pelos ensaios, é avaliada por uma fórmula que minimiza a raiz quadrada dos valores médios dos quadrados das diferenças entre as deflexões medidas e calculadas divididas pelos valores médios (RMS – *Root Mean Square*) (Alves, 2007).

$$RMS(\%) = \left( \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Onde:

$n$  – número total de pontos de registo da deflexão para o ponto de ensaio  $i$

$d_{ci}$  – deflexão calculada para o ponto de ensaio  $i$

$d_{mi}$  – deflexão medida no ponto de ensaio  $i$

### 3.3.4 Correção do Módulo de Deformabilidade para a Temperatura de Projeto

Os valores do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas obtidos pelo programa de cálculo automático não traduzem o efeito da temperatura de projeto nessas camadas. Pois, os módulos de deformabilidade determinados são devidos aos valores das deflexões registadas em cada ensaio, que por sua vez, ocorrem para uma determinada temperatura à que se encontra o pavimento na altura dos ensaios. Assim, é necessário corrigir o módulo de deformabilidade, obtido para as camadas betuminosas, para uma temperatura de projeto.

O conhecimento da distribuição de temperaturas em todo o pavimento é fundamental para atribuir aos materiais betuminosos propriedades mecânicas adequadas. As propriedades térmicas dos materiais betuminosos são descritas principalmente pelo módulo de rigidez, que depende da amplitude e da forma da distribuição da temperatura pelas camadas betuminosas. Se as variações do módulo das camadas são consideradas no processo de conceção dos pavimentos, a precisão dos resultados fica melhorada (Minhoto, 2005).

Existem várias fórmulas para se proceder à correção dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas, obtidos a partir dos ensaios de carga a diversas temperaturas. Uma delas é a expressão que foi desenvolvida pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) (Alves, 2007):

$$\frac{E_T}{E_{20}} = -0.0282T + 1.5562 \quad (3.7)$$

Com:

$T$  = a temperatura dos ensaios não destrutivos, °C

$E_T$  = módulo de deformabilidade para a temperatura  $T$ , MPa

$E_{20}$  = módulo de deformabilidade para a temperatura de referência de 20 °C

Esta expressão permite transformar o módulo de deformabilidade da temperatura de ensaio para o módulo de deformabilidade da temperatura de 20°C e, posteriormente, a transformação deste módulo para o módulo correspondente à temperatura de serviço.

A temperatura de projeto (temperatura de serviço) é uma temperatura que reflete o efeito total de todas as variações de temperatura ao longo da vida do pavimento. Esta temperatura pode ser estabelecida pelo método da SHELL e depende da região onde se realiza os ensaios.

A temperatura de projeto é calculada pela seguinte forma:

Para cada uma das temperaturas médias mensais do ar (TMMA) é determinado um fator de ponderação,  $W_{fator}$ , pela seguinte expressão:

$$W_{fator} = 0.0723 \times e^{0.1296 \times TMMA} \quad (3.8)$$

A temperatura média anual ponderada (TMAP) é calculada fazendo a média dos fatores de ponderação de cada mês,  $w_m$  e determinada por:

$$TMAP = 7,7068 \times Ln(w_m) + 20,257 \quad (3.9)$$

Assim, a temperatura de projeto é estabelecida através da TMAP e depende da espessura da camada betuminosa do pavimento existente (ver figura 3.16).

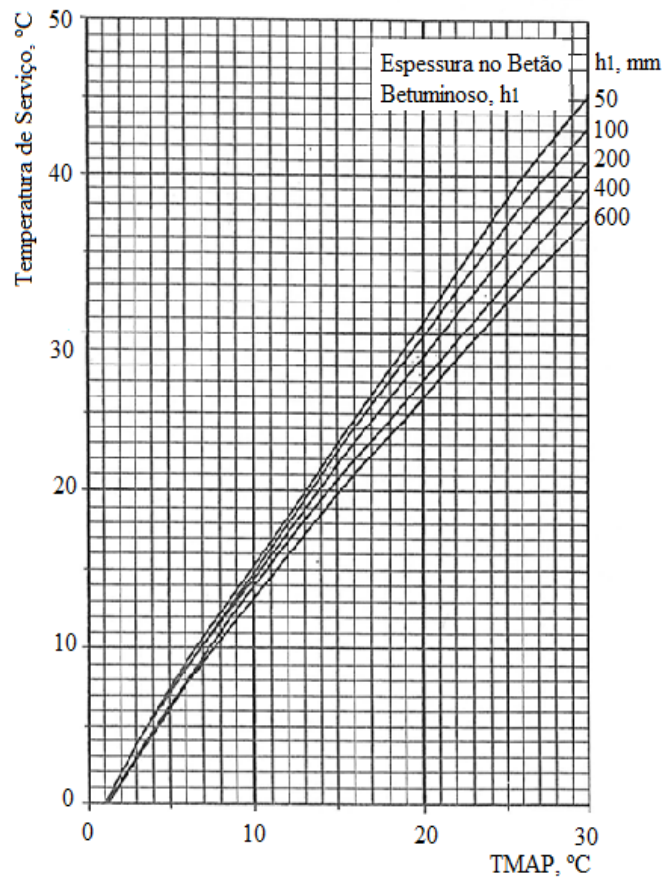


Figura 3.16 – Relação entre a temperatura de serviço em misturas betuminosas e a ambiente (Picado Santos, 1993)

### 3.4 Conclusões

No presente capítulo foi apresentado os diferentes equipamentos de auscultação estrutural aos pavimentos rodoviários flexíveis e as etapas posteriores à observação que permitem analisar os dados obtidos. Cada equipamento é identificado pelo seu próprio procedimento de ensaio.

A diferença no modo de funcionamento dos equipamentos está principalmente na velocidade de execução dos ensaios. A Viga Benkelman permite o registo das deflexões a uma velocidade da ordem dos 2 a 3 Km/h, o deflectómetro de impacto simula a passagem de um veículo de 60 a 80 Km/h, o deflectógrafo de Lacroix realiza a medição das deflexões quase em contínuo a uma velocidade de 3 a 8 Km/h e o curviâmetro realiza os ensaios a uma velocidade de 18 Km/h.

Independentemente do tipo de equipamento utilizado, a análise dos resultados de auscultação é efetuada pelo mesmo procedimento.

A divisão do trecho de estrada auscultado em zonas de comportamento estrutural homogéneas é importante, pois, para além de agrupar as zonas cujos parâmetros são homogéneos, nomeadamente, tipo de pavimento, secção transversal e ano de entrada em serviço, possibilita seleccionar a deflexão representativa de cada zona designa de deflexão característica.

A correção do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas, obtido por um processo iterativo, para uma temperatura de serviço, é importante para uma avaliação estrutural mais explícita e, se necessário, uma correta reabilitação ao pavimento.

## **4. REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS**

### **4.1 Introdução**

Um pavimento rodoviário flexível está sujeito a degradações ao longo do seu período de vida que reduzem a capacidade estrutural e a aptidão funcional para que foi projetado sendo, a determinado nível de degradação, necessário a sua reabilitação. Esta reabilitação é realizada atuando de diversas formas, em função do seu estado estrutural e funcional, considerando os níveis de qualidade que se pretendem manter ou atingir (Pais et al, 2000).

A adoção da medida mais adequada a cada caso requer o diagnóstico prévio das causas das degradações atuais ou previsíveis e o conhecimento tanto da estrutura do pavimento existente como das características dos seus materiais, do tráfego, do clima e de outros parâmetros da estrada, além dos diferentes procedimentos de reabilitação disponíveis (Azevedo, 1999).

Assim, a reabilitação de um pavimento rodoviário tem como objetivo a recuperação das características que os pavimentos possuíam antes de entrarem em serviço.

Existem duas principais técnicas de reabilitação do pavimento, são elas:

- **Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais** – vocacionadas para a melhoria das características funcionais do pavimento;
- **Técnicas de Reabilitação das Características Estruturais** – utilizadas como consequência do comportamental estrutural do pavimento existente e dos métodos de dimensionamento de reforços de pavimentos rodoviários flexíveis.

### **4.2 Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais**

As técnicas de reabilitação superficial atuam, na maioria dos casos, ao nível da camada de desgaste e só se devem aplicar quando os pavimentos em causa não apresentem problemas estruturais. Recorre-se a este tipo de reabilitação com mais frequência nos casos em que é necessário melhorar as características de aderência pneu-pavimento, em cuja superfície é visível a exsudação do betume, em superfícies polidas, em locais específicos como rampas, curvas, etc., em locais críticos onde a visibilidade é reduzida devido à projeção de água ou reflexão de luz (Vicente, A.M, 2006).

Existem diversas técnicas de reabilitação das características funcionais, das quais se destacam a aplicação de:

- revestimento betuminoso superficial;
- microaglomerado betuminoso a frio;
- argamassa betuminosa;
- betão betuminoso drenante.

Quando pavimento rodoviário está em boas condições, não sendo visíveis muitas degradações à superfície nem diagnosticado uma baixa capacidade de carga, uma das técnicas aplicáveis é a do “revestimento betuminoso superficial”. Este tipo de revestimento é indicado para zonas de tráfego baixo e a sua aplicação depende do tipo de pavimento existente, assim como, do tipo de tráfego.

Quando esta técnica é executada corretamente impede a entrada de água para o pavimento e, como tal, fornece uma boa impermeabilização ao pavimento, melhorando o seu comportamento, quer funcional quer estrutural.

Este tipo de revestimento é definido pelo modo de aplicação dos materiais constituintes. Pois, ele permite uma aplicação sucessiva(s) de camada(s) de ligante betuminoso seguida de camada(s) de gravilhas sobre o pavimento (Antunes, 2005). Assim, existe diversas combinações entre esses materiais, (L= Ligante betuminoso e A= agregado) que determinam a existência de vários tipos de revestimentos superficiais (ver figura 4.1):

- (1) revestimento simples (LA) ;
- (2) revestimento simples com dupla aplicação de agregado (LAa);
- (3) revestimento simples com aplicação prévia do agregado ou “Sandwich” (ALa);
- (4) revestimento duplo (LALa);
- (5) revestimento duplo com aplicação prévia de agregado (ALALA);
- (6) revestimento triplo (LALALA).

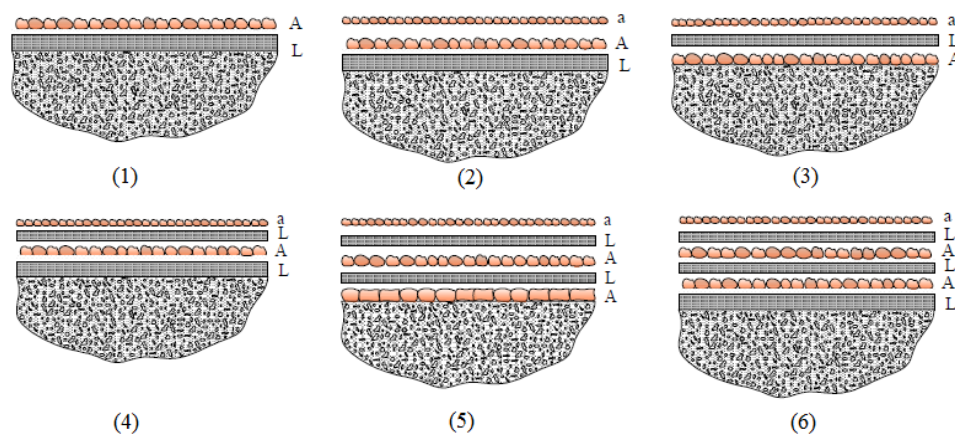


Figura 4.1 – Diversos tipos de revestimentos betuminosos superficiais (Vicente, A.M, 2006)

A técnica de microaglomerado betuminoso a frio consiste na aplicação sobre uma superfície de uma ou várias camadas de uma mistura betuminosa fabricada a frio com agregados, emulsão betuminosa, água e eventualmente aditivos. A emulsão betuminosa a utilizar é à base de ligantes puros ou modificado, sendo as mais utilizadas as emulsões betuminosas catiónicas de rotura controlada (Inteval, 2009).

Esta técnica é especialmente adaptada a locais urbanos, dado que praticamente não provoca aumento significativo de espessura, e porque origina baixo ruído em circulação. Pode ser também usada para selagem de juntas longitudinais e reparações localizadas do tipo desagregação da camada de desgaste, devido à sua reduzida espessura (Pereira & Miranda, 1999).

A argamassa betuminosa é uma mistura betuminosa a quente que, devido a sua constituição, mistura de agregado fino com ligante puro ou modificado, permite a reabilitação das características superficiais do pavimento, nomeadamente o fendilhamento, para um tipo de tráfego não muito severo. Por ser uma mistura com alguma deformabilidade permite a recuperação do estado superficial da camada de desgaste em situações de fendilhamento generalizado, o que retarda a intervenção de uma reabilitação estrutural. (Pereira & Miranda, 1999).

O betão betuminoso drenante é aplicado em pavimentos impermeáveis e sem deformações. Na sua constituição tem uma mistura de agregados de granulometria descontínua e uma mistura betuminosa a quente com ligantes betuminosos modificados. Devido às suas propriedades drenantes não é aconselhável a execução deste tipo de técnica em locais sujeitos a águas estagnadas e em zonas de fácil colmatação, pois, permitirá o ressurgimento de água à superfície (Vicente, A.M, 2006). Este tipo de mistura é usado normalmente em camada de desgaste, e permite que a drenagem da água que atinge o pavimento se dê através do interior da camada superficial até as bermas e não à superfície como é habitual (Branco et al, 2008).

### **4.3 Técnicas de Reabilitação das Características Estruturais**

A reabilitação das características estruturais procura atender ao objetivo de dotar a estrutura do pavimento de capacidade resistente, considerando um determinado período de vida e condições de solicitação. Esta reabilitação terá em conta o estado atual do pavimento e, em particular, o seu previsível estado futuro, em particular as camadas granulares e o solo de

fundação, por exemplo, em função da melhoria das condições de drenagem interna (Pereira & Miranda, 1999).

Neste domínio de reabilitação o termo mais utilizado é o “reforço do pavimento”. O reforço sobre o pavimento aumenta a capacidade de carga por forma a suportar as ações do tráfego futuro (Antunes, 2005) e, melhora, indiretamente, a aptidão funcional.

O estudo da aplicação de reforço de pavimentos deve ser realizado em função do nível de fendilhamento existente à superfície do pavimento. Um baixo nível de fendilhamento corresponde um estado superficial com uma percentagem de fendilhamento da ordem dos 10% da superfície de passagem dos rodados (Pais, 1999). Para uma percentagem de fendilhamento superior a 10% é considerado um alto nível de fendilhamento.

Se o reforço do pavimento não ocorrer quando a superfície do pavimento apresenta um baixo nível de fendilhamento, num pequeno intervalo de tempo, a área de fendilhamento da superfície do pavimento passa de um valor reduzido para um valor de difícil controlo em termos de estratégia de reforço de pavimentos (Pais, 1999).

Assim, dependendo do nível de fendilhamento do pavimento existente, as técnicas a optar para a reabilitação estrutural são diversas, como se pode observar pela figura 4.2.

Os reforços de pavimentos envolvem a aplicação de camadas betuminosas sobre o pavimento existente, sendo, por vezes, necessário a ação de algumas técnicas de reperfilamento, ou seja, técnicas de regularização do estado superficial do pavimento existente. É de referir que as técnicas que antecedem à aplicação do reforço dependem do estado superficial do pavimento, como seja, o nível de degradação superficial.

As misturas betuminosas utilizadas nas camadas de reforço dependem do tipo e critério de dimensionamento. Podem ser aplicadas numa única camada como camada de desgaste ou dividida em camadas de base, de regularização e de desgaste.

As misturas betuminosas mais utilizadas no reforço de pavimentos flexíveis são: macadame betuminoso; mistura betuminosa densa; agregado de granulometria extensa tratado com emulsão de betume e o betão betuminoso de alto módulo.

Tanto o macadame betuminoso como a mistura betuminosa densa são utilizados como camada de base ou de regularização com o intuito de melhorar as características estruturais e preparar uma superfície regular para a camada de desgaste colocada, também é aplicado em situações em que é necessário proceder ao reperfilamento da estrada (Vicente, A.M, 2006).

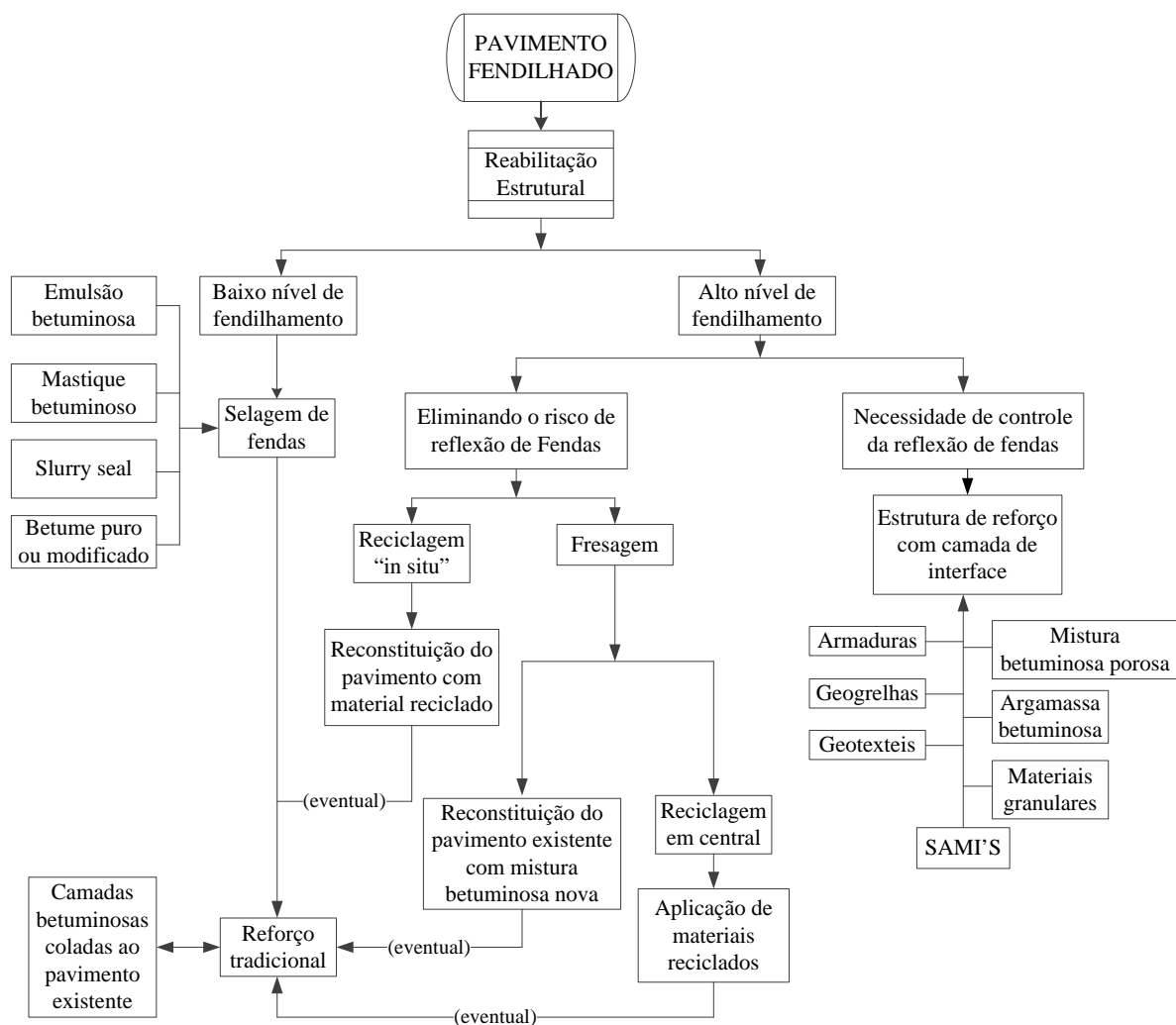


Figura 4.2 – Estratégias normalmente adotadas na reabilitação estrutural de pavimentos fendilhados (Minhoto, 2005)

A mistura de agregados de granulometria extensa tratados com emulsão de betume é utilizada para a reabilitação de pavimento com grandes deformações. Pode ser aplicada em estradas com um tipo de tráfego baixo. Neste tipo de técnicas é aconselhável a execução de uma camada de desgaste por ser uma mistura com baixas características mecânicas.

O betão betuminoso de alto módulo destina-se às camadas de base, de regularização e de desgaste. Devido à utilização de betumes mais duros, têm um melhor comportamento à fadiga e às deformações permanentes. O que permite a utilização de menores espessuras de reforço, quando comparáveis com as misturas convencionais.

Para um pavimento com um nível de fendilhamento reduzido, as técnicas de selagem de fendas, como a utilização de emulsões betuminosas, mástique betuminoso, slurry seal ou betume puro ou modificado, antecedem a um eventual reforço.

Para níveis de fendilhamento mais severos e dependendo das restrições, como por exemplo, restrições da cota, é usual a eliminação do fendilhamento por ação da técnica de fresagem. Este tipo de reabilitação permite a eliminação do risco da reflexão de fendas.

A reflexão de fendas corresponde a uma propagação do fendilhamento existente no pavimento degradado para as camadas de reforço, conduzindo ao fendilhamento prematuro destas camadas e é causada pela combinação do carregamento cíclico do tráfego com o efeito térmico das variações de temperatura (Minhoto, 2005).

A fresagem elimina as degradações do pavimento até uma determinada profundidade do mesmo. Normalmente essa profundidade cobre a totalidade da camada betuminosa mais degradada. Após à fresagem, a camada remanescente é reparada por técnicas de reperfilamento e só depois é executado o reforço.

Uma outra técnica que permite a eliminação da reflexão de fendas é reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis. Esta técnica consiste em obter novas misturas betuminosas com a utilização de material fresado dos pavimentos antigos a reabilitar, adicionando novos materiais (agregados e ligante betuminoso) (Branco et al, 2008).

Para pavimentos fendilhados sujeitos a uma ação do tráfego muito severo e da ação de extremas condições climáticas, há uma necessidade de controlar a reflexão de fendas.

Como técnicas de prevenção de reflexão de fendas utilizadas como camadas de interface, existem:

- **SAMI's (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*)** – camadas formadas por grandes quantidades de betume modificado, ao qual se adiciona um agregado de pequenas dimensões (Minhoto, 2005), capazes de absorver as tensões resultantes do movimento das fendas existentes;
- **Armaduras e geogrelhas** – membranas rígidas que reduzem a velocidade de propagação de fendas, constituídas respetivamente por malhas de ferro galvanizado ou ferro e por fibras de carbono ou aço, fibra de vidro, poliéster ou polietileno;  
**Geotexteis impregnados de betume** – membranas flexíveis capazes de absorver a atividade de movimento das fendas, constituídas por uma malha de fios de polipropileno ou poliéster, com uma espessura reduzida à qual é envolvida em betumes puros ou modificados.

## **4.4 Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**

### **4.4.1 Introdução**

Os métodos de dimensionamento do reforço de pavimentos podem ser divididos em dois tipos de categorias (Pais, 1999): os métodos empíricos e os métodos empírico-mecânicos. Sendo, estes métodos semelhantes aos métodos de dimensionamento de pavimentos novos.

Os métodos empíricos baseiam-se no controlo da deflexão máxima do pavimento antes e depois do reforço, tendo como principal objetivo a definição da espessura de reforço que diminua a deflexão máxima do pavimento para um valor considerado admissível num pavimento reforçado. Já o dimensionamento do reforço pelos métodos empírico-mecânicos, necessita da realização de uma análise da resistência à fadiga dos materiais que constituem o pavimento existente (Pais, 1999).

No dimensionamento do reforço pelos métodos empírico-mecanicistas, é necessário determinar a vida residual do pavimento, assim como, a projeção do número de eixos padrão que o pavimento reforçado suportará antes de entrar em ruína (tráfego futuro).

De um modo geral, o dimensionamento do reforço pelo método empírico-mecanicista necessita, da verificação de dois critérios (Pais, 1999):

1. O critério da extensão vertical de compressão no topo da camada de fundação, com o objetivo de controlar o aparecimento de deformações permanentes à superfície do pavimento;
2. O critério da extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas, com o objetivo de controlar o aparecimento de fendas que se propagam até à superfície do pavimento.

Caso a camada betuminosa se encontre num estado avançado de degradação, no processo de dimensionamento as camadas betuminosas são consideradas como camadas granulares e nestes casos a extensão horizontal de tração pode ser controlada na base da camada do reforço (Pais, 1999).

No presente trabalho, os métodos de dimensionamento do reforço estudados são métodos empírico-mecânicos.

Assim sendo, a seguir indicar-se-á o modo de determinação do número de eixos padrão futuro que solicitarão o pavimento reforçado e da vida restante do pavimento. Depois, será mencionado os três métodos de dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis:

- método empírico- mecanicista das EP;
- método empírico- mecanicista da SHELL;
- método empírico- mecanicista considerando a reflexão de fendas (Sousa et al, 2002).

#### 4.4.2 Número Acumulado de Eixos Padrão para o Tráfego Futuro

O tráfego é uma das ações a ter em consideração no dimensionamento de pavimentos rodoviários. Assim, é importante o estudo da evolução do tráfego para um determinado período de dimensionamento do pavimento. Para o dimensionamento do reforço de pavimentos rodoviários flexíveis, é usual considerar um período de vida útil de 5 anos ou 10 anos.

O “Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional” (MACOPAV), define a metodologia de determinação do número acumulado de eixos padrão para um período de dimensionamento.

No dimensionamento, apenas é considerado o efeito do tráfego dos veículos pesados, pelo que, o tráfego a considerar é o tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido de circulação e na via mais solicitada por esses veículos ( $(TMDA)_p$ ) (EP-JAE, 1995).

Dependendo do enquadramento do traçado da rede rodoviária, o tipo de tráfego a considerar no dimensionamento pode ser classificado em seis tipos de classes, com as respetivas taxas de crescimento anual (ver tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Fatores de agressividade de tráfego (EP-JAE, 1995)

Classe de tráfego	$(TMDA)_p$	Taxa média de crescimento anual (%)
T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub>	< 300	3
T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub>	300 – 800	4
T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub>	800 – 2000	5

Os valores indicados na tabela 4.1 são úteis principalmente quando não estão disponíveis dados relativos a evolução do tráfego da região em estudo.

Para traduzir o efeito da intensidade e variabilidade dos veículos pesados nos pavimentos rodoviários é utilizado um fator de agressividade. Este fator permite a conversão de um determinado número de passagens de veículos pesados para um número equivalente de eixo padrão de 80 KN ou de 130 KN e depende da classe de tráfego, como indicado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Fatores de agressividade do tráfego (EP-JAE, 1995)

Classe de tráfego	(TMDA) <sub>p</sub>	Fator de agressividade	
		Eixo padrão de 80 KN	Eixo padrão de 130 KN
T <sub>6</sub>	50 – 150	2	0,5
T <sub>5</sub>	150 – 300	3	0,6
T <sub>4</sub>	300 – 500	4	0,7
T <sub>3</sub>	500 – 800	4,5	0,8
T <sub>2</sub>	800 – 1200	5	0,9
T <sub>1</sub>	1200 – 2000	5,5	1,0

A projeção do número acumulado de eixos padrão de 80 KN para o período de dimensionamento do reforço é efetuada pela expressão 4.1, que depende do tipo de tráfego do ano inicial, da taxa de crescimento anual, do fator de agressividade e do período de dimensionamento.

$$N_{80}^{\text{dim}} = 365 \times (TMDA)_p \times C \times \alpha \times p \quad (4.1)$$

Com:

$N_{80}^{\text{dim}}$  = número acumulado de passagens do eixo padrão

$TMDA_p$  = tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada

$\alpha$  = fator de agressividade do tráfego

$p$  = período de dimensionamento

C = fator de crescimento do tráfego, que tem em conta o período de dimensionamento (p) e a taxa média de crescimento anual do tráfego pesado (t), sendo dado por:

$$C = \frac{(1+t)^p - 1}{p \times t} \quad (4.2)$$

#### 4.4.3 Determinação da Vida Restante

A determinação da vida restante do pavimento existente, também designada por vida residual, centraliza-se na avaliação das camadas betuminosas e da existência ou não de fendilhamento à superfície do pavimento.

A vida residual define-se como o número de passagens dum eixo de referência que levará um pavimento à ruína, num determinado momento da sua vida (Pereira, et al, 2001).

Antes de o pavimento entrar em serviço, o tráfego passado ( $N_p$ ) é nulo e a vida residual neste caso definida como a vida residual de construção, corresponde ao número total de passagens dum eixo de referência, calculado a partir do critério de ruína condicionante. Após o pavimento entrar ao serviço, a capacidade de suportar cargas vai diminuindo ao longo do tempo. A vida residual, neste caso definida como vida residual observada, corresponde ao número de passagens dum eixo de referência que o pavimento suportará a partir dum determinado momento da sua vida útil (Pereira, et al, 2001).

No caso do pavimento existente exibir um fendilhamento incipiente, pode admitir-se que não foi esgotada a sua capacidade de carga pela ação do tráfego passado, possuindo, assim, uma vida restante (Jacinto, 2003). A expressão 4.3 permite determinar a vida restante do pavimento.

$$N_f = N_{ae} - N_p \quad (4.3)$$

Com:

$N_f$  = vida restante do pavimento

$N_{ae}$  = número admissível de passagens do eixo padrão, calculado para a estrutura do pavimento existente

$N_p$  = número equivalente de passagens do eixo padrão que já solicitaram o pavimento ou que solicitarão o pavimento.

No dimensionamento do reforço, e relativamente às camadas existentes, devem ser tidas em consideração as seguintes condições (EP-JAE, 1995):

- 1) Se o pavimento não estiver fendilhado ou exibir um fendilhamento incipiente, é de admitir, que as camadas betuminosas antigas não fendilhadas apresentem um módulo de deformabilidade da ordem de grandeza do correspondente a uma camada recém-construída. Verificando-se as extensões máximas de tração nessas camadas, deverá ser tida em conta a sua vida restante, vindo:

$$\frac{N_{AEP}}{N_{ar}} \leq f \quad (4.4)$$

Com:

$N_{ar}$  = número admissível de passagens do eixo padrão, calculado para a estrutura do pavimento com reforço

$N_{AEP}$  = número admissíveis de eixos padrão

- 1) Se o pavimento tem um fendilhamento importante, admitir-se-á não haver já vida restante, pelo que as camadas betuminosas serão consideradas com módulos de deformabilidade da ordem de grandeza das camadas granulares.

#### 4.4.4 Método Empírico-Mecanicista da EP

O método empírico-mecanicista da EP (Estradas de Portugal), explanada no presente trabalho, refere-se a metodologia exposta no “Manual de Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis” (EP-JAE, 1995a). Este método distingue três níveis de intervenção de reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis.

O nível 1 baseia-se, principalmente, no estudo das ações de conservação urgentes a implementar num pavimento e não considera medidas de reforço (EP-JAE, 1995a). Este tipo de intervenção é aplicado em pavimentos com degradação superficial visível mais com alguma reserva da capacidade estrutural. Portanto, é um método que tem como objetivo uma beneficiação ao pavimento existente, em vias com um nível de tráfego não muito elevado, adiando assim a intervenção do reforço. Assim, a beneficiação do pavimento depende do tipo de degradação.

No nível 2 é estudado o dimensionamento do reforço de um pavimento, utilizando o método simplificado (EP-JAE, 1995a). Este tipo de dimensionamento é efetuado em pavimentos onde a capacidade estrutural é reduzida devido ao alto nível de degradação do pavimento.

Através da auscultação estrutural ao pavimento é possível classificar a deflexão característica máxima. Assim, o método simplificado utiliza as classificações das deflexões, os tipos de degradações existente no pavimento e a classe de degradação, assim como, as classes de tráfego.

Para o nível 1 e o nível 2 os tipos de reparações estão tabelados. Estes dois níveis de intervenção destinam-se a ser utilizados pelos serviços das EP (antiga JAE) (EP-JAE, 1995a).

No nível 3 é utilizado a metodologia de dimensionamento do reforço. Esta metodologia baseia-se, fundamentalmente, no cálculo dos estados de tensão e de deformação induzidos na estrutura do pavimento e na fundação, pela atuação de eixos de veículos pesados.

Os dados base a utilizar no estudo de dimensionamento do reforço são (EP-JAE, 1995a):

- estudo de tráfego, designadamente os dados relativos ao volume de veículos pesados que irá utilizar o pavimento durante o período de vida de projeto, expressos em número equivalente de passagens de um eixo padrão;
- elementos recolhidos em inspeção visual, ou seja, resultantes de um levantamento detalhado das degradações existentes no pavimento;
- resultados de ensaios de carga com medição de deflexões em vários pontos na superfície do pavimento;
- elementos relativos à espessura e à natureza das camadas do pavimento ao longo do traçado, obtido através de sondagens à rotação, de poços de sondagem e de ensaios laboratoriais sobre amostras colhidas das camadas do pavimento;
- elementos relativos às condições climáticas da região, que influenciam as propriedades mecânicas dos materiais;
- elementos relativos ao tipo e propriedades dos materiais a utilizar nas camadas de reforço.

Após a realização dos ensaios de auscultação, da caracterização mecânica do pavimento existente e da definição do número de eixos padrão que irão solicitar o pavimento,  $N_p$ , o procedimento de dimensionamento do reforço do pavimento existente tem a seguinte metodologia:

- Definição dos critérios de ruína

Para efeitos de análise das soluções estruturais projetadas para o reforço são estabelecidos os seguintes critérios de ruína: fendilhamento excessivo à superfície do pavimento e deformação

excessiva à superfície da camada de desgaste. Para efeitos de dimensionamento o critério de fendilhamento é tido em conta limitando a extensão máxima de tração ( $\epsilon_t$ ) na zona das camadas betuminosas e o critério de deformação é traduzido na limitação da extensão vertical de compressão ( $\epsilon_{dp}$ ) no topo da fundação do pavimento (EP-JAE, 1995a). A figura 5.3 ilustra a localização das extensões de tração e de compressão num pavimento rodoviário flexível.

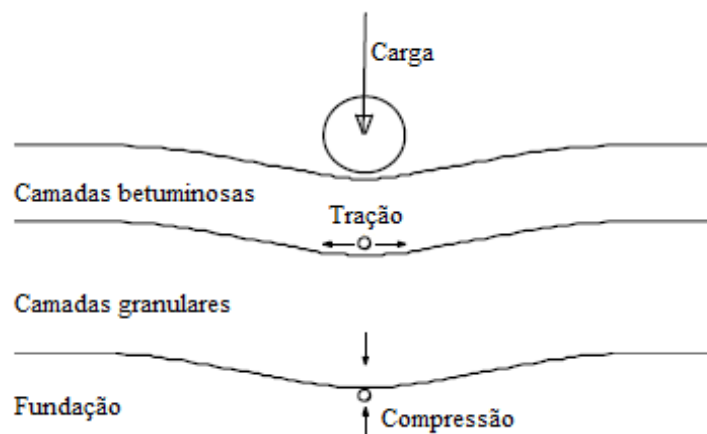


Figura 4.3 – Extensões de tração e compressão usadas como critérios de ruína (Pais, 1999)

As expressões que definem os critérios de ruína são:

**Critério de fadiga:**

$$\epsilon_t = K \times 10^{-3} \cdot N_{80}^{-0.2} \quad (4.5)$$

Onde:

$\epsilon_t$  = Extensão de tração

$N_{80}$  = número admissíveis de eixos padrão de 80 KN acumulados para o período de dimensionamento

$$K = 10^3 (0.856 \times V_b + 1.08) \times (10^6 \times E)^{-0.36} \quad (4.6)$$

Com:

$V_b$  = percentagem volumétrica de betume (%)

$E$  = módulo de deformabilidade (MPa)

**Critério de deformação excessiva à superfície:**

$$\epsilon_{dp} = 2.8 \times 10^{-2} \cdot N_{80}^{-0.20} \quad (4.7)$$

Com:

$\epsilon_{dp}$  = Extensão de compressão no topo do solo de fundação

- Determinação da espessura do reforço

A espessura de reforço é determinada através de um processo iterativo. Basicamente, o procedimento é idêntico ao dimensionamento de um pavimento novo, em que, tendo em conta as espessuras do pavimento existente e as suas características mecânicas, é arbitrado uma espessura de uma camada a aplicar no pavimento existente com determinadas características mecânicas.

Um programa de cálculo que permite a determinação das extensões de tração e de compressão é o BISAR. Este programa, por permitir o cálculo das extensões, determina o número admissível de eixos padrão para o pavimento com a camada de reforço ( $N_{ar}$ ). Esse número de eixos padrão é comparado com o número de eixos padrão que irão solicitar o pavimento ( $N_p$ ), e a espessura final do reforço é encontrada quando  $N_{ar} \geq N_p$ .

#### **4.4.5 Método Empírico-Mecanicista da SHELL**

O método de dimensionamento do reforço de pavimentos rodoviários flexíveis desenvolvido pela SHELL é um método que utiliza o programa de cálculo designado de SPDM (*Shell Pavement Design Method*).

O desenvolvimento deste método iniciou-se em 1963 com uma emissão de uma série de ábacos. Estes ábacos resultaram do estudo de diversos métodos analíticos e métodos empíricos, para a conceção da espessura de pavimentos rodoviários flexíveis. Em 1978 foi publicado o “Shell pavement design manual –asphalt pavements and overlays for road traffic” com uma evolução dos primeiros ábacos publicados. Esses ábacos resultaram de campanhas de experimentação sobre o comportamento dos materiais que usualmente são utilizados em pavimentação (SHELL, 1998a).

As etapas fundamentais para o dimensionamento do reforço são:

- avaliação do estado superficial do pavimento existente e determinação das características mecânicas do pavimento existente através de ensaios de auscultação estrutural;
- para a zona de localização do pavimento existente determinar a temperatura média anual ponderada (TMAP) e projetar o tráfego futuro do pavimento a reforçar;
- determinar a vida residual do pavimento existente e decidir se é necessário reforçar o pavimento, tendo em conta o tráfego futuro;

- determinar a composição física da mistura betuminosa a aplicar na camada de reforço e as suas características elásticas (módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson);
- espessura da camada de reforço determinada pelo critério da deformação permanente à superfície ou determinada pelo critério de fadiga.

A consideração do estado superficial do pavimento é importante, pois, no processo de dimensionamento do reforço são consideradas duas opções para o estado superficial do pavimento: superfície com baixo percentagem de degradação ou superfície com uma alta percentagem de degradação.

Caso o pavimento apresente uma camada superficial não degradada, é considerado que este ainda tem alguma percentagem de vida residual em relação à fadiga do material, mas se a vida residual for muito baixa o programa aconselha a opção de o pavimento apresentar um alto nível de degradação à superfície. Neste caso, é considerado que as camadas betuminosas têm um comportamento idêntico às das camadas granulares e, como tal, são-lhes atribuídas um módulo de deformabilidade na ordem de grandeza dessas camadas.

O processo de determinação da espessura do reforço é baseado nos ábacos que definem os critérios de dimensionamento através de uma curva de dimensionamento que está dividida em dois ramos diferentes (ver figura 4.4). Essa curva de dimensionamento depende da temperatura média anual ponderada do ar, do módulo de deformabilidade do solo de fundação, do tipo de mistura betuminosa e do número acumulado de eixos padrão de 80 KN para a vida útil do pavimento.

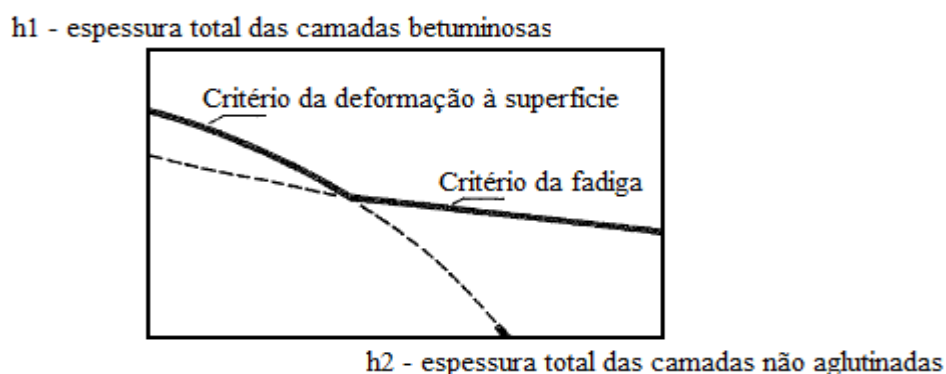


Figura 4.4 – Curva de dimensionamento (SHELL, 1978)

O ábaco que representa as curvas de dimensionamento tem no eixo das abcissas a espessura total das camadas granulares e nas ordenadas a espessura total das camadas betuminosas. Assim, dependendo da espessura total das camadas granulares, do tráfego futuro, do módulo de deformabilidade do solo de fundação, do tipo de mistura betuminosa do pavimento existente, assim como, da temperatura média anual ponderada, é selecionado o ábaco correspondente e assinalado no eixo horizontal a espessura total das camadas granulares e a curva que corresponde ao número de eixos padrão do tráfego futuro. Deste modo, a espessura total das camadas betuminosas é encontrada, e a espessura da camada de reforço é a diferença entre a espessura encontrada e a espessura total das camadas betuminosas do pavimento existente.

Um exemplo de um ábaco, utilizado num dimensionamento da camada de reforço, é o representado na figura 4.5. Neste ábaco, o tipo de mistura é caracterizado pelo código S1-F1-100. S1 representa uma curva de rigidez que é característica de uma mistura; F1 representa uma curva de comportamento à fadiga; 100 indica que o betume utilizado na mistura é um betume de penetração 100 (Picado Santos, 1993).

Código da mistura	S1 - F1 - 100	Módulo do solo de fundação, N/m <sup>2</sup>	2,5E+07
w-MAAT, °C	12	Número de eixos-padrão de 80 KN	Variável

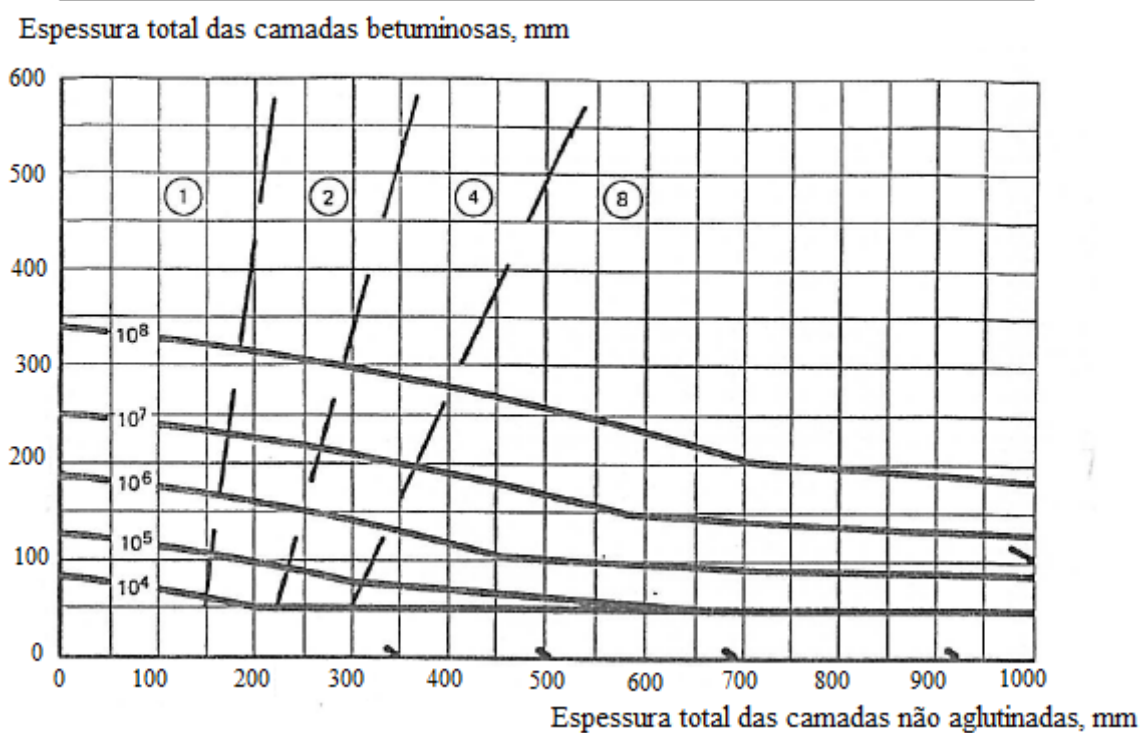


CHART HN 13

Figura 4.5 – Ábaco de dimensionamento

Dependendo dos materiais que constituem o pavimento existente e das espessuras das camadas que constituem o pavimento existente, a espessura da camada de reforço pode ser determinada atendendo ao critério da deformação à superfície ou ao critério da fadiga.

Se a espessura da camada de reforço for determinada pelo critério da deformação à superfície, o dimensionamento é realizado, apenas, para atender a evolução do tráfego futuro. Caso a espessura da camada de reforço for determinada pelo critério da fadiga já é necessário considerar um tráfego futuro fictício, calculado pela expressão 4.8 explanada na bibliografia SHELL, 1978. Este tráfego fictício é calculado para uma vida residual diferente de zero. Caso a vida residual seja nula, o tráfego fictício é igual ao tráfego futuro.

$$N_{D2} = \frac{N_{A2} \times N_{D1}}{N_{D1} - N_{A1}} \quad (4.8)$$

Com:

$N_{D1}$  = tráfego do pavimento existente, vida original

$N_{A1}$  = tráfego passado

$N_{A2}$  = tráfego futuro

$N_{D2}$  = tráfego fictício

$N_{D1} - N_{A1}$  = vida residual

#### **4.4.6 Método Empírico-Mecanicista Considerando a Reflexão de Fendas (Sousa et al, 2002)**

A existência de camadas betuminosas fendilhadas, sobre as quais são colocadas as camadas de reforço do pavimento, provoca um funcionamento estrutural do pavimento diferente daquele verificado para o caso dos pavimentos novos. Os reforços de pavimentos continuam a estar sujeitos aos mecanismos de ruína dos pavimentos novos, fendilhamento por fadiga e deformações permanentes. No entanto, além destes mecanismos de ruína, verificam-se outros fenómenos estruturais, associados ao desempenho dos materiais existentes, que condicionam o comportamento do pavimento (Pais et al, 2000).

Assim, tendo em conta o efeito das fendas sobre o reforço aplicado, foi desenvolvido um método empírico-mecanicista de conceção de reforços de pavimentos considerando a reflexão de fendas.

Este método, desenvolvido por (Sousa et al, 2002), tem a seguinte proposta de dimensionamento:

- determinação dos módulos de rigidez e das espessuras das camadas do pavimento existente;
- determinação da temperatura representativa do ar;
- seleção da percentagem de fendilhamento;
- determinação de fatores de correção;
- seleção da mistura betuminosa do reforço e suas propriedades mecânicas;
- determinação do valor de projeto da extensão de Von Mises,  $\epsilon_{VM}$ ;
- determinação da estimativa de vida útil do reforço de pavimento.

O primeiro passo de dimensionamento do reforço passa, então, pela determinação dos módulos de rigidez e das espessuras do pavimento existente, que pode ser efetuada por retroanálise e tendo como base os ensaios não destrutivos realizados por equipamentos de auscultação estrutural.

O módulo de deformabilidade obtido por retroanálise, do pavimento existente, e o módulo de deformabilidade do material do reforço do pavimento, devem ser corrigidos para a temperatura média anual ponderada (TMAA) pela seguinte expressão:

$$E(TMAA) = E(T_i) \times 10^{-0.025 \times (TMAA - T_i)} \quad (4.9)$$

Com:

$T_i$  = a temperatura (°C) na superfície do pavimento na altura da realização dos ensaios. Para o material de reforço a temperatura a considerar é  $T_i = 20^\circ\text{C}$ .

As temperaturas máximas e mínimas do ar devem ser determinadas com o grau de fiabilidade desejado para o local onde o pavimento vai ser reforçado. É também necessário calcular a temperatura média mensal do ar de acordo com o método da Shell (Sousa et al, 2002).

Assim, para as temperaturas médias mensais mensal do ar (TMMA) dos doze meses do ano é determinado um fator de ponderação,  $w$ , pela seguinte expressão:

$$w = 0,0723 e^{0,1296 \times TMMA} \quad (4.10)$$

A temperatura média anual do ar ponderada é determinada pela expressão 4.11, tendo em conta a média dos fatores de ponderação,  $w_m$ .

$$TMAA = 7,7068 \times Ln(w_m) + 20,257 \quad (4.11)$$

O terceiro passo desta metodologia de dimensionamento consiste na seleção da percentagem da área de fendilhamento da zona em estudo. O Arizona Departamento of Transportation (ADOT) sugere como valor de projeto, uma percentagem de fendilhamento de 5%.

Na quarta etapa deste dimensionamento, está a determinação dos fatores de correção. São três os fatores a considerar:

- fator corretivo relacionado com o envelhecimento das misturas, AAF;
- fator corretivo que reflete a evolução das temperaturas nas misturas betuminosas, TAF;
- fator corretivo para ajuste ao desempenho *in situ*, FAF.

Para ter em conta o envelhecimento da mistura betuminosa aplicada numa camada de desgaste, este método de dimensionamento prevê a determinação de um fator corretivo de envelhecimento (AAF). Este fator é função da temperatura máxima do ar e é determinado tendo em conta o tipo de mistura a utilizar no reforço. As expressões que permitem a determinação deste fator são dependentes do tipo de material a utilizar e são válidas para temperaturas máximas,  $T_{max}^{ar}$ , entre os 35°C e os 50°C. Assim, para mistura betuminosa convencional o fator de envelhecimento é determinado pela seguinte expressão:

$$AAF = 0.0363 \times T_{max}^{ar} + 0.3000 \quad (4.12)$$

E para misturas com betume de borracha com granulometria descontínua:

$$AAF = 0.0088 \times T_{max}^{ar} + 0.8800 \quad (4.13)$$

O efeito da evolução da temperatura nas misturas betuminosas é importante, e é principalmente para as temperaturas baixas que a reflexão de fendas ocorre predominantemente. Nestas situações, o verdadeiro mecanismo é muito complexo e vários fatores são importantes (Sousa et al, 2002):

- extensões causadas pelas cargas quando o veículo passa sobre ou perto das fendas;
- à medida que a temperatura decresce durante a sua variação diária esta pode chegar a atingir variações de 20°C a 25°C. Estas variações podem causar tensões nas camadas de reforço e são particularmente importantes na zona na fenda. São uma função da ductilidade e fluência do material. No limite estas tensões por si mesmas podem

causar a fratura térmica;

- a combinação destes dois fatores pode levar a rotura do material.

Assim, para ter em conta o efeito da evolução da temperatura nas misturas betuminosas, a presente metodologia aplica um fator de correção de temperatura, TAF. Para misturas betuminosas convencionais a expressão que permite determinar este fator é:

$$TAF = -0.0900 \times RCT + 2.5500 \quad (4.14)$$

E para misturas com betume de borracha com granulometria descontínua:

$$TAF = -0.0720 \times RCT + 1.7448 \quad (4.15)$$

Onde:

$RCT = T^{\text{ar}}_{\text{min}} + 0,5 \times [TMMA - T^{\text{ar}}_{\text{min}}]$  e define a temperatura de ocorrência de reflexão de fendas

TMMA = temperatura média do ar

$T^{\text{ar}}_{\text{min}}$  = temperatura mínima do ar

O fator corretivo para ajuste ao desempenho *in situ*, FAF, é um fator de ajuste ao campo, e relaciona as estimativas obtidas no modelo de reflexão de fendas empírico-mecanicista, com o desempenho observado *in situ*. Este fator depende da percentagem de área fendilhada, PC. Para uma percentagem de fendilhamento superior a um, a expressão que permite determinar FAF é dado pela expressão 4.16.

$$FAF = e^{0.2303 \times PC} \quad (4.16)$$

A seleção da mistura betuminosa de reforço, para este método de dimensionamento, fica condicionada a dois tipos de misturas: mistura betuminosa convencional de granulometria extensa ou mistura betuminosa com betume modificado com borracha com granulometria descontínua. A obtenção das propriedades mecânicas da mistura, nomeadamente o módulo de deformabilidade e a vida à fadiga é conseguida através de ensaios à fadiga em quatro pontos.

O módulo de deformabilidade resultante dos ensaios (mistura betuminosa de reforço) deve ser ajustado, multiplicando-o pelo fator corretivo de envelhecimento, AAF.

Na sexta etapa deste dimensionamento está a determinação do valor de projeto da extensão de Von Mises,  $\epsilon_{VM}$ . Para determinar a extensão de projeto primeiro é determinado a extensão de Von Mises média nos elementos do reforço (expressão 4.17).

$$\varepsilon_{VM} (1 \times 10^{-6}) = a \times [\text{espessura do reforço} (m)]^b \quad (4.17)$$

A extensão de Von Mises é uma extensão desviatória e representa a influência das propriedades do pavimento existente no estado de tensão e de extensão no reforço. Assim, a determinação dos parâmetros a e b são obtidos pelas seguintes fórmulas:

$$a = \prod_{i=1}^6 [a_{1i} \times \ln(X_i) + a_{2i}] \quad (4.18)$$

$$b = \prod_{i=1}^6 [b_{1i} \times \ln(X_i) + b_{2i}] \quad (4.19)$$

com:

$X_i$  = as propriedades das camadas do pavimento, identificadas na tabela 4.3

$a_{ij}$  e  $b_{ij}$  = representam coeficientes estatísticos, tabela 4.4

Tabela 4.3 – Variáveis associadas às propriedades dos pavimentos

i	$X_i$
1	Espessura da camada fendilhada (m)
2	Espessura da camada granular (m)
3	Módulo de rigidez da camada de reforço (MPa)
4	Módulo de rigidez da camada fendilhada (MPa)
5	Módulo de rigidez da camada granular (MPa)
6	Módulo de rigidez da fundação (MPa)

A extensão de Von Mises de projeto é determinada afetando a extensão Von Mises média pelo fator de correção de temperatura, TAF:

$$\varepsilon_{VM} (1 \times 10^{-6}) = \varepsilon_{VM} \times TAF \quad (4.20)$$

Tabela 4.4 – Coeficientes estatísticos associados ao modelo de  $\varepsilon_{VM}$

i	$a_{1i}$	$a_{2i}$	$b_{1i}$	$b_{2i}$
1	-1,038E-04	-1,446E-01	7,169E-03	1,314E-01
2	2,777E-01	-4,022E+00	9,773E-05	-6,368E-01
3	-1,173E+00	1,212E+01	-4,946E-01	7,069E+00
4	1,281E+00	5,070E-01	3,923E-02	2,641E+00
5	-5,160E-01	6,964E+00	3,265E-02	-1,287E+00
6	-1,775E-01	2,385E+00	1,875E-03	-8,167E-01

É necessário, ainda, multiplicar a extensão de Von Mises de projeto por 86/132 (para converter  $\varepsilon_{VM}$  de eixos de 130 KN para eixos de 80 KN) (Sousa et al, 2002).

Por último, a metodologia de dimensionamento de reforço fica completa com a determinação do número total de eixos padrão de 80 KN que pode ser aplicado ao reforço antes de ocorrer a reflexão de fendas. Para misturas betuminosas convencionais esse número é determinado pela seguinte expressão:

$$NAEP = 6.4467 \times 10^{19} \times \left[ \varepsilon_{VM} (1 \times 10^{-6}) \right]^{-5.93} \quad (4.21)$$

Para misturas com betume modificado com borracha:

$$NAEP = 4.1245 \times 10^{19} \times \left[ \varepsilon_{VM} (1 \times 10^{-6}) \right]^{-4.9761} \quad (4.22)$$

Com:

$\varepsilon_{VM}$  = extensão Von Mises de projeto.

O NAEP resultante deve ser afetado pelo fator corretivo de ajuste ao desempenho *in situ* (FAF). Assim, o NAEP resultante indica o número de eixos padrão de 80KN que fazem com que o reforço atinja a percentagem de fendilhamento estudada, PC.

## 4.5 Conclusões

A reabilitação das características superficiais melhora a qualidade do pavimento, nomeadamente, a qualidade funcional. Este tipo de reabilitação permite retardar a evolução das degradações visíveis em pavimentos rodoviários ou mesmo eliminá-las, melhorando a circulação rodoviário. Assim, as técnicas de reabilitação das características superficiais dependem do tipo de degradação visível no pavimento e dependem do tipo de pavimento, assim como, do tipo de tráfego.

Já as técnicas de reabilitação estrutural melhoram a qualidade estrutural do pavimento com degradações em estado avançado e com uma baixa capacidade estrutural. Estas técnicas dependem do tipo de degradação visível no pavimento e dos condicionalismos da envolvente.

O tipo de reabilitação estrutural mais utilizado é o reforço estrutural de pavimentos. O reforço consiste na aplicação de uma camada betuminosa sobre o pavimento existente, aumentando a capacidade estrutural do mesmo de forma a suportar a ação do tráfego futuro.

A espessura da camada de reforço, a aplicar no pavimento existente, pode ser determinada por diversos métodos. O método das EP e o método da SHELL utilizam como critérios de dimensionamentos os da deformação permanente e o da fadiga. O método da reflexão de fendas centraliza-se na percentagem de fendilhamento no pavimento a reabilitar.

Todos estes métodos utilizam os resultados da análise da auscultação estrutural a um pavimento existente, nomeadamente o módulo de deformabilidade obtido. Também necessitam do conhecimento das propriedades dos materiais na mistura betuminosa a aplicar na camada do reforço.



## **5. ESTUDO PRÁTICO**

### **5.1 Introdução**

Para cumprir os objetivos iniciais do presente trabalho, foi elaborado um estudo sobre um pavimento rodoviário flexível, com o intuito de avaliar o seu comportamento estrutural e o estudo de propostas de reabilitação estrutural do mesmo.

O estudo elaborado envolve, numa primeira fase, ensaios de auscultação estrutural a um pavimento rodoviário localizado na região de Bragança. A auscultação foi realizada através de ensaios não destrutivos com a Viga Benkelman.

O pavimento em causa é um pavimento que apresenta algumas degradações, sendo de todo o interesse uma análise estrutural ao mesmo.

Numa segunda fase, os resultados obtidos da auscultação são analisados e, nesta etapa, destacam-se as que são vocacionados para a caracterização mecânica do pavimento e a sua reabilitação estrutural.

Assim sendo, neste capítulo, são apresentadas as etapas fundamentais para a caracterização mecânica do pavimento existente e soluções de reabilitação estrutural, com vista a melhoria do desempenho estrutural do pavimento auscultado.

### **5.2 Descrição do Troço de Estrada em Estudo**

O troço da via rodoviária sujeita a auscultação estrutural, Avenida Abade Baçal, localiza-se na cidade de Bragança.

Na figura 5.1 é indicada a localização da Avenida Abade Baçal, assim como, a envolvente, nomeadamente as estradas que interseam a Avenida.

A estrada é uma via urbana com alguma atividade rodoviária e, numa extensão considerável, apresenta algumas degradações à superfície, nomeadamente pele de crocodilo, rodeiras, fendas longitudinais e fendas transversais.

Esta avenida foi construída em 1995 e teve origem numa requalificação da estrada Nacional N103.

A estrutura resultante da requalificação é composta por uma espessura total de camadas granulares de 20 cm e de camadas betuminosas de 12 cm.



A tabela I.1, do anexo I, indica os dados das deflexões obtidas no momento do ensaio com a Viga Benkelman.

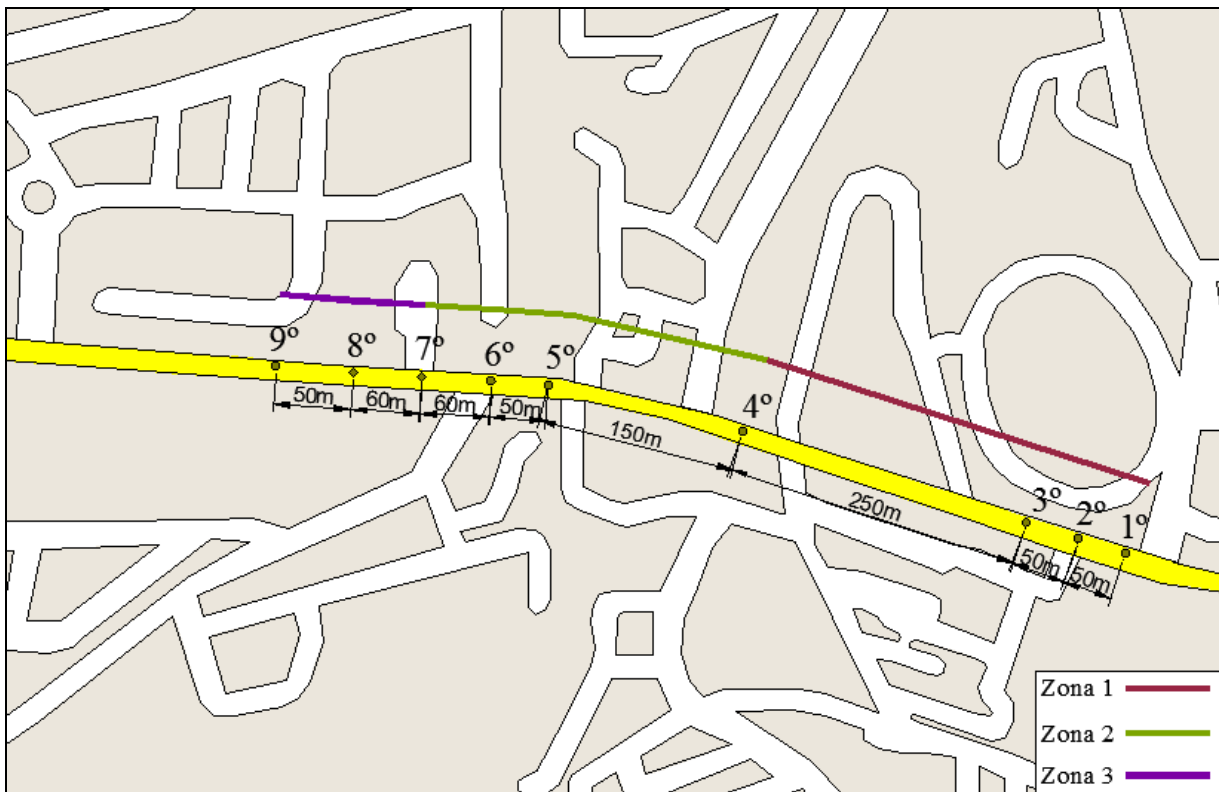


Figura 5.2 – Localização dos ensaios realizados

Na figura 5.3 é indicado o posicionamento da Viga Benkelman entre o rodado duplo do veículo pesado, no momento de cumprimento dos requisitos necessários ao início do ensaio, nomeadamente, posicionamento correto da Viga Benkelman, como seja, uma correta posição longitudinal e transversal em relação ao desnível do pavimento, e a figura 5.4 ilustra a posição da viga de referência no momento da realização de um ensaio.



Figura 5.3 – Posicionamento da Viga Benkelman

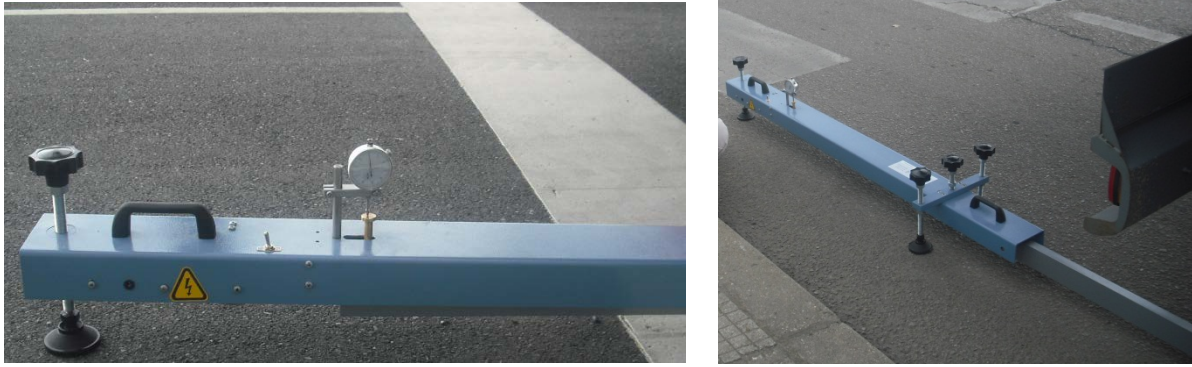


Figura 5.4 – Viga de referência da Viga Benkelman

Para efeitos do estudo do comportamento estrutural do pavimento auscultado, o ponto de leitura -1.00 metro não é considerado na composição da linha de influência a estudar na retro-análise. Pois, os pontos da linha de influência que permitem o estudo do comportamento estrutural do pavimento são: 0.00 m; 0.25 m; 0.50 m; 1.00 m; 2.50 m; 3.70 m e 5.00 m, definidos na fase de descarga do ensaio.

Os resultados de deflexão obtidos no extensômetro da Viga Benkelman, registados no momento dos ensaios, representam uma fração da deflexão na ponta apalpadora, devido à proporção entre “braços” da Viga e, como tal, devem ser corrigidos. Essa correção é realizada por uma expressão de regressão linear que foi obtida pela calibração, em laboratório, da Viga Benkelman, apresentando uma correlação de  $R^2 = 0,999$ :

$$y = 2,00947 \times x + 0,35964 \quad (5.1)$$

Com:

$y$  = deflexão na ponta apalpadora (mm)

$x$  = deflexão no extensômetro (mm)

Os dados da tabela I.2 do anexo I indicam as deflexões corrigidas para a ponta apalpadora, dos nove pontos de ensaio.

A verdadeira caracterização estrutural do pavimento só é possível pela análise das deflexões elásticas e, como tal, para as deflexões corrigidas, devem ser obtidas as correspondentes deflexões elásticas, através da diferença da deflexão entre cada ponto da linha de influência e o valor final da deflexão da mesma linha de influência. (Resultados na tabela I.3 do anexo I).

Na figura 5.5 representam-se os resultados das deflexões nos diversos pontos da estrada, podendo-se observar a relação obtida entre as deflexões elásticas ao longo do trecho em estudo. Pode-se verificar que a máxima amplitude de deflexão ocorre aos 1335 metros, a qual corresponde ao 7º ponto de ensaio, e onde se observou uma zona com maior degradação superficial, nomeadamente do tipo rodeiras.

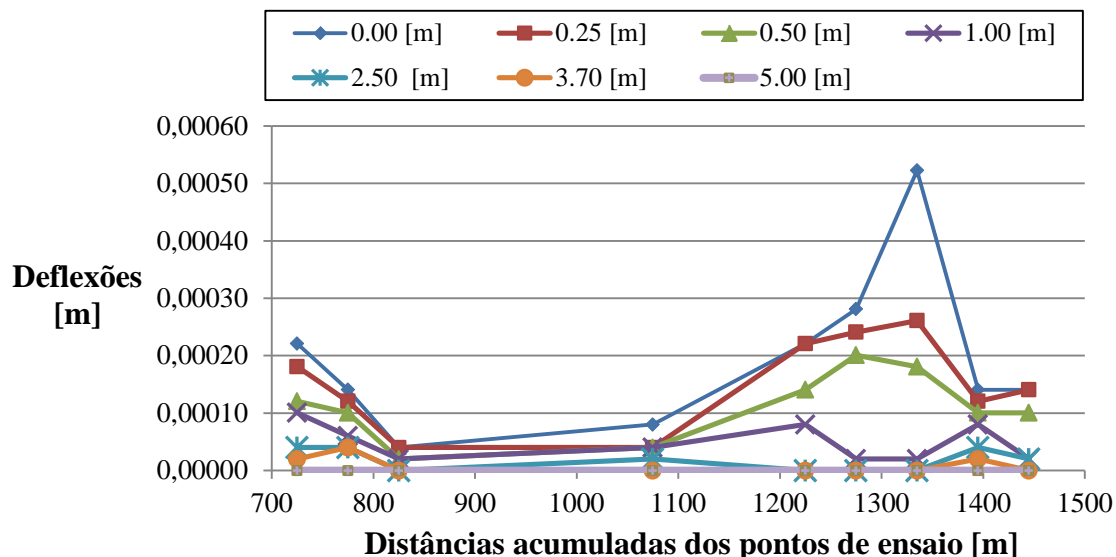


Figura 5.5 – Relação entre as deflexões para cada ponto de ensaio

### 5.4 Caracterização Mecânica – backcalculation

A divisão de comportamento estrutural homogéneo, do trecho de pavimento auscultado, permitiu destacar três zonas de comportamento estrutural homogéneo, como ilustrado na figura 5.6. A figura 5.2 também identifica os pontos de ensaios pertencentes a cada zona.

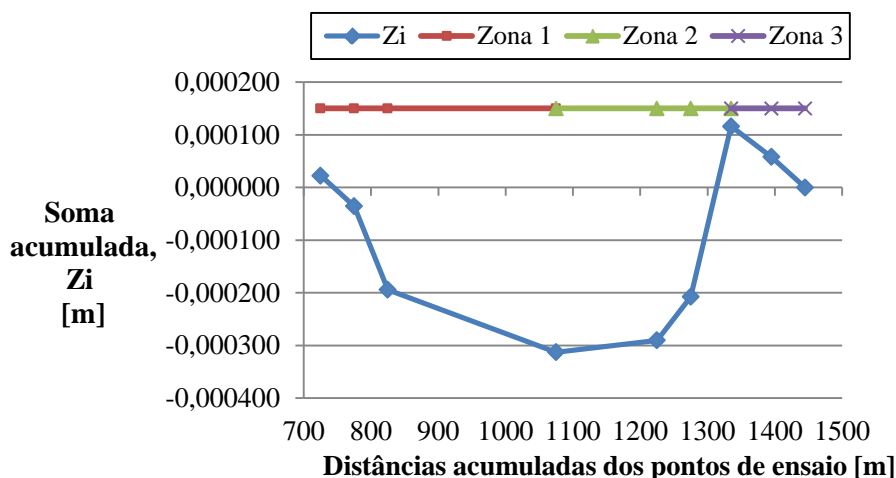


Figura 5.6 – Divisão em zonas de comportamento estrutural homogéneo

As zonas de comportamento estrutural homogêneo foram obtidas através da metodologia do método das diferenças acumuladas explanada no capítulo 3 e pela expressão 5.2, também explanada no capítulo 3. A deflexão utilizada para a definição das zonas de comportamento homogêneo foi a deflexão elástica máxima de cada uma das linhas de influência dos nove pontos de ensaio realizados.

$$Z_i = d_i - d_m + Z_{i-1} \quad (5.2)$$

Posteriormente pela expressão 5.3, explanada no capítulo 3, foi determinado o deflectograma característico de cada zona de comportamento estrutural homogêneo, correspondente a um percentil de 97.5 %.

$$d_K = m + 2 \times s \quad (5.3)$$

Os deflectogramas que representam as deflexões características para cada zona estão representados na figura 5.7 e 5.8. Os dados da tabela I.4, do anexo I, indicam as deflexões características das três zonas homogêneas que permitem obter os deflectogramas.

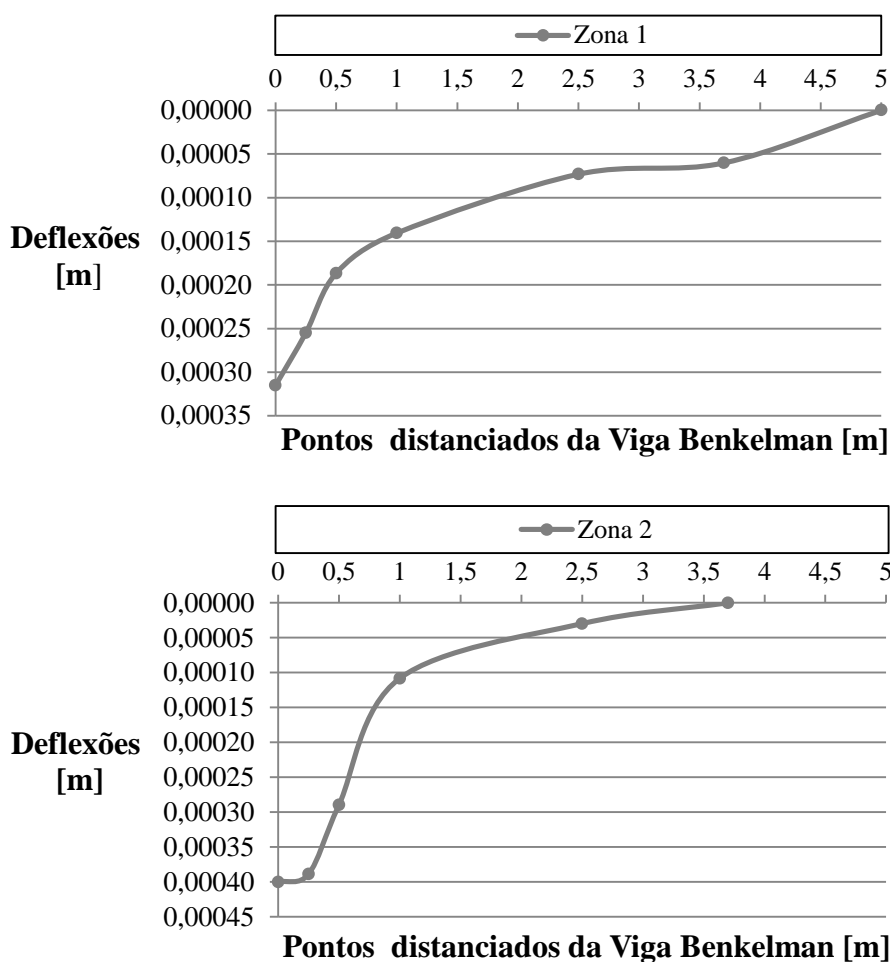


Figura 5.7 – Deflectograma característico da zona 1 e zona 2

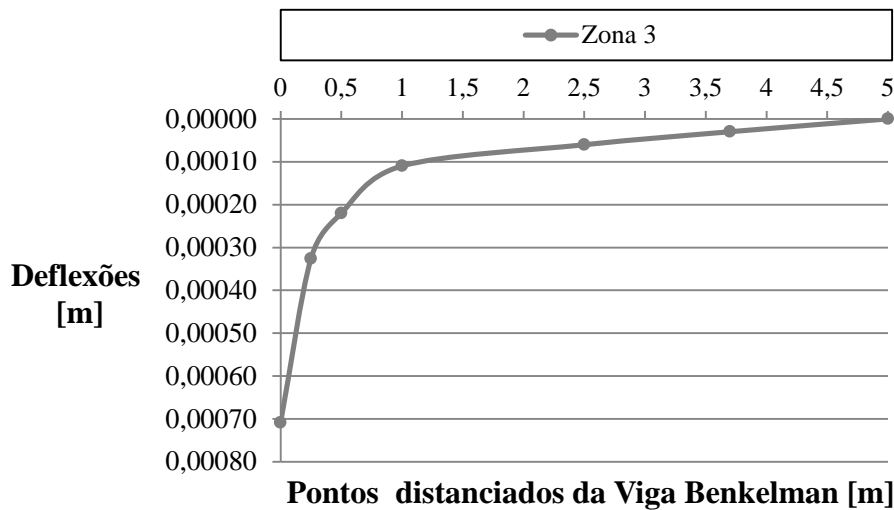


Figura 5.8 – Deflectograma característico da zona 3

A maior influência do carregamento é observado para os deflectogramas característicos da zona 1 e da zona 3, pois, são zonas com existência de deformações reversíveis até à distância de 5.00 metros do ponto de deslocação da ponta apalpadora de registo das deflexões. Em relação ao deflectograma da zona 2, este tem uma deflexão máxima intermédia, entre os da zona 1 e zona 3 e a influência do carregamento é perceptível aproximadamente até aos 3.70 metros, sendo que para este caso a área de influência do carregamento é menor.

Em relação à forma da bacia de deformação, a deflexão máxima da zona 2 está entre a deflexão máxima da zona 1 e zona 3, e a curvatura da bacia de deformação é maior para a zona 2, como se pode ver na figura 5.9. Esta forma da bacia de deflexão pode ser influenciada pela qualidade das camadas superiores, assim como, uma má qualidade do solo de fundação.

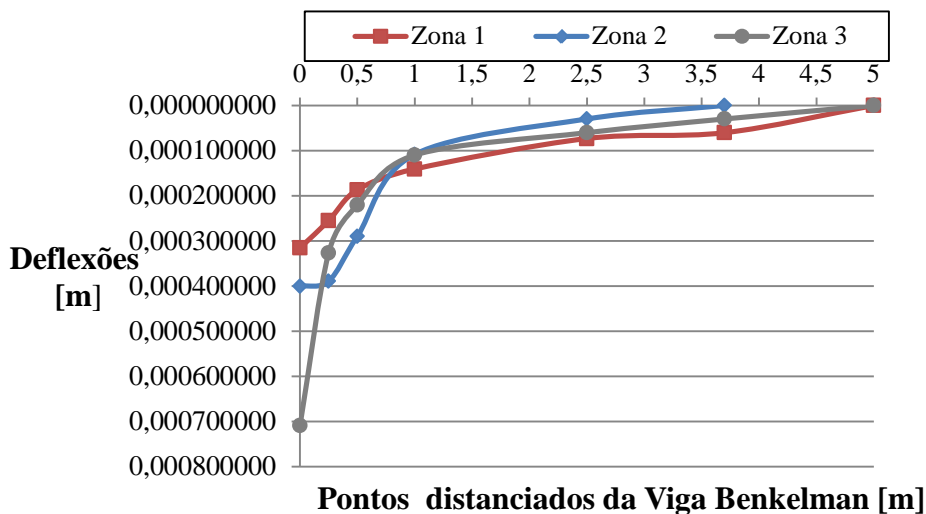


Figura 5.9 – Comparação entre os deflectogramas característicos de cada zona

A zona 1 e zona 3 apresentam uma curvatura da bacia de deflexão baixa. Para o caso da zona 1, como tem uma deflexão menor de entre as três, a camada superior do pavimento é a camada que pode comprometer a capacidade estrutural do pavimento. A zona 3, uma grande deflexão máxima associada com uma baixa curvatura da bacia de deflexão, indica que tanto as camadas superiores como as camadas inferiores influenciam a má capacidade estrutural do pavimento, sendo possível classificar o pavimento com uma baixa capacidade estrutural. Esta baixa capacidade estrutural pode ser definida para baixos módulos de deformabilidade das camadas do pavimento existente, o que é uma consequência das degradações visíveis à superfície do pavimento.

Para perceber melhor a forma das bacias de deflexão e classificar estruturalmente o trecho de estrada auscultado, foi determinado o conjunto dos módulos de deformabilidade para cada zona de comportamento estrutural homogêneo.

O módulo de deformabilidade foi calculado iterativamente pelo método da retroanálise (explanado no capítulo 3) e com o auxílio do programa de cálculo BISAR. A geometria do pavimento auscultado e as deflexões obtidas em campo são dois parâmetros necessários nesta fase de aproximação da deformada obtida em campo com a deformada calculada. A figura 5.10 indica a geometria do pavimento auscultado.



Figura 5.10 – Geometria do pavimento auscultado

As etapas de introdução de dados no programa BISAR são:

- definição da ação da carga “Loads”;
- definição do módulo de deformabilidade e dos coeficientes de Poisson “Layers”;
- definição das posições de determinação dos deslocamentos à superfícies “Positions”.

A ação que um rodado de um veículo transmite a um pavimento é traduzida por uma superfície de contacto aproximadamente elíptica. Essa superfície depende da pressão de enchimento do pneu, da carga descarregada pelo rodado, assim como, do tipo de pneu. No entanto, para o dimensionamento de um pavimento, a superfície de forma elíptica é considerada como uma superfície semelhante a um círculo, sendo, a área superficial circular definida pela seguinte expressão 5.4. (ver figura 5.11).

$$A = \frac{P}{p} \quad (5.4)$$

Com:

A = área de contacto (circular)

P = carga aplicada por roda

p = pressão de enchimento do pneu

Para um eixo-padrão simples, com rodados duplos, a distribuição da superfície de contacto sobre o pavimento é idêntica a ilustrada na figura 5.11, a distância L define o afastamento entre os pneus do rodado e o raio da superfície circular, r, depende do eixo-padrão. Para um eixo-padrão de 80 KN, o método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da Shell considera os seguintes valores: a pressão de enchimento de 0.6 MPa, o raio é aproximadamente de 105 mm e a distância L= 105 mm.

No dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis, os valores a utilizar, para traduzir a superfície de contacto do pneu com o pavimento são os descritos anteriormente. No entanto, no presente trabalho, como o veículo pesado utilizado na auscultação do trecho de estrada, tinha um eixo traseiro de 80 KN e uma pressão de enchimento do pneu de 120 Psi (0,827 MPa), na etapa de introdução dos dados no BISAR em “Loads” os dados introduzidos são os indicados na figura 5.12. Cada pneu do rodado duplo externo transmite ao pavimento uma carga de 20 KN e o raio da superfície de contacto do pneu é de 0.0877 metros.

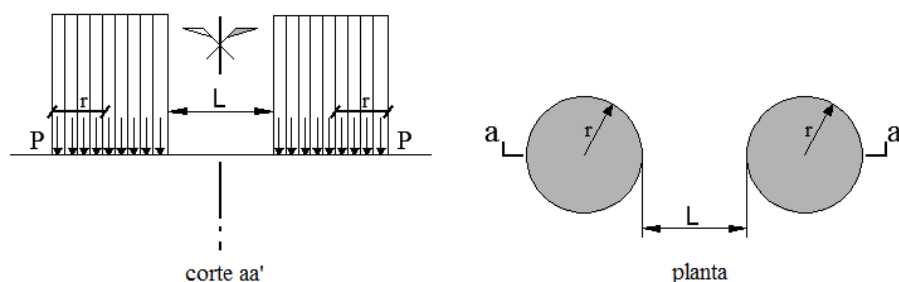


Figura 5.11 – Esquematização geral adotada para a ação de um eixo-padrão sobre um pavimento (Branco et al, 2008)

Use Standard Dual Wheel?

Mode of Load: 2 - Load and Radius

No of Circular Loads (1-10): 2

Load Number	Vertical Load (kN)	Radius (m)	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Horizontal Load (kN)	Shear Direction (degr.)
1	20,000	0,0877	-0,1402	0,0000	0,000	0,0
2	20,000	0,0877	0,1402	0,0000	0,000	0,0

Figura 5.12 – Introdução de dados no BISAR: Loads

Full Friction Between Layers?

No of Layers (1-10): 3

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0,120	6,50E+03	0,35
2	0,200	1,80E+03	0,30
3		7,30E+01	0,35

Figura 5.13 – Introdução de dados no BISAR: Layers

Na etapa do BISAR “Layers” (ver figura 5.13) são introduzidos os dados referentes a geometria do pavimento auscultado, nomeadamente a espessura das camadas que constituem o pavimento e os módulos de deformabilidade (arbitrados) para cada camada e para o solo de fundação, assim como, os coeficientes de Poisson.

A influência do coeficiente de Poisson no cálculo dos deslocamentos e também das tensões é pequena e, estão, normalmente, definidos para cada tipo de material do pavimento rodoviário. Para misturas betuminosas e para o solo de fundação, o coeficiente de Poisson toma o valor de 0.35, enquanto que, para as camadas granulares o coeficiente de Poisson é de 0.30.

Select Positions for Standard Dual Wheel

No of Position Entries (1-10): 7

Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No
1	0,0000	0,0000	0,0000	1
2	0,0000	0,2500	0,0000	1
3	0,0000	0,5000	0,0000	1
4	0,0000	1,0000	0,0000	1
5	0,0000	2,5000	0,0000	1
6	0,0000	3,7000	0,0000	1
7	0,0000	5,0000	0,0000	1

Figura 5.14 – Posição dos pontos da linha de influência no BISAR

Os pontos de leitura são introduzidos no Bisar numa entrada denominada de “Positions” que define os locais de medição das deflexões em campo. No Bisar as mesmas posições limitam os pontos de determinação dos deslocamentos à superfície e que permitem a determinação da linha de influência. Ver figura 5.14

Os dados de saída do programa, nomeadamente os deslocamentos verticais, UZ, para as sete posições definidas (ver tabela 5.1) permitem a comparação com a deformada das deflexões característica da zona em estudo. Como enunciado no capítulo 3, o desvio de valores da deformada obtida em campo com a deformada calcula é avaliada pela fórmula que minimiza a raiz quadrada dos valores médios dos quadrados das diferenças entre as deflexões medidas e calculadas divididas pelos valores médios, RMS.

Tabela 5.1 – Alguns dados de saída do programa BISAR

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Displacements		
					UX (μm)	UY (μm)	UZ (μm)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,944E+02
2	1	0,000E+00	2,500E-01	0,000E+00	-1,075E-07	-1,322E+01	2,629E+02
3	1	0,000E+00	3,000E-01	0,000E+00	9,754E-09	-1,493E+01	2,224E+02
4	1	0,000E+00	1,000E+00	0,000E+00	2,775E-08	-1,239E+01	1,555E+02
5	1	0,000E+00	2,500E+00	0,000E+00	-1,673E-09	-4,207E+00	6,238E+01
6	1	0,000E+00	3,700E+00	0,000E+00	-3,421E-10	-2,261E+00	4,021E+01
7	1	0,000E+00	5,000E+00	0,000E+00	1,923E-10	-1,590E+00	2,955E+01

Assim, a definição do comportamento estrutural do pavimento auscultado ficou completa, com a iteração que aproximou o mais possível a deformada real, obtida pelos ensaios em campo, com a deformada obtida pelo BISAR, caracterizada pelos deslocamentos superficiais.

Para o presente trabalho uma boa aproximação entre as deformadas foi definida para um RMS inferior a 15%. Para a zona 1 foi possível obter uma boa aproximação entre os pontos definidores da deformada para um RMS de 9.78%. Devido a forma do deflectograma, o cálculo do RMS foi determinado para os quatro pontos que menor desvio tinham aquando da iteração. O mesmo aconteceu com a zona 2 onde o RMS é de 13.77%. Em relação a zona 3, foi possível obter uma boa aproximação para todos os pontos do deflectograma, com um RMS de 14.88%. (Resultados da iteração e da aproximação das deformadas no anexo II).

Na tabela 5.2 estão identificados o conjunto dos módulos de deformabilidade obtidos para as três zonas de comportamento estrutural homogéneo. É verificado que as zonas 1 e 2 são as

que apresentam um pavimento com melhor comportamento estrutural, pois, são as zonas que apresentam a deflexão máxima com menor amplitude, menores degradações superficiais e maiores módulos de deformabilidade da camada betuminosa.

Tabela 5.2 – Módulos de deformabilidade do pavimento auscultado

Zona	Módulo de Deformabilidade [MPa]			RMS [%]
	Solo de Fundação	Camada Granular	Camada Betuminosa	
1	73	1800	6500	9,78
2	92	180	5000	13,77
3	91	185	595	14,88

No processo iterativo de determinação dos módulos de deformabilidade foi possível verificar a influência que cada camada do pavimento tem na definição da bacia de deformação.

Na figura 5.15 é observado que o solo de fundação determina todas as deflexões que definem a bacia de deformação, sendo, principalmente nos últimos dois pontos de registo da deflexão, que a fundação tem uma maior influência. Em relação as camadas betuminosas, estas têm um peso maior até uma distância de 0,5 metros do ponto de posicionamento da ponta apalpadora da Viga Benkelman e qualquer alteração do módulo de deformabilidade dessas camadas, as deflexões nos dois primeiros pontos de definição da linha de influência são afetados. Já as características mecânicas das camadas granulares permitem definir o comportamento estrutural do pavimento até uma distância de 2,5 metros.

Para uma correta avaliação dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas, estes são corrigidos para uma temperatura de projeto, utilizando a expressão 5.5, já explanada no capítulo 3.

$$\frac{E_T}{E_{20}} = -0.0282T + 1.5562 \quad (5.5)$$

Para a correção do módulo de deformabilidade para a temperatura de projeto, foram usadas as temperaturas médias mensais registadas na região de Bragança no ano de 2011 (Instituto de Meteorologia, IP Portugal), da utilização do método da Shell e da espessura da camada betuminosa. (Dados das temperaturas médias mensais indicados na tabela II.1 do anexo II).

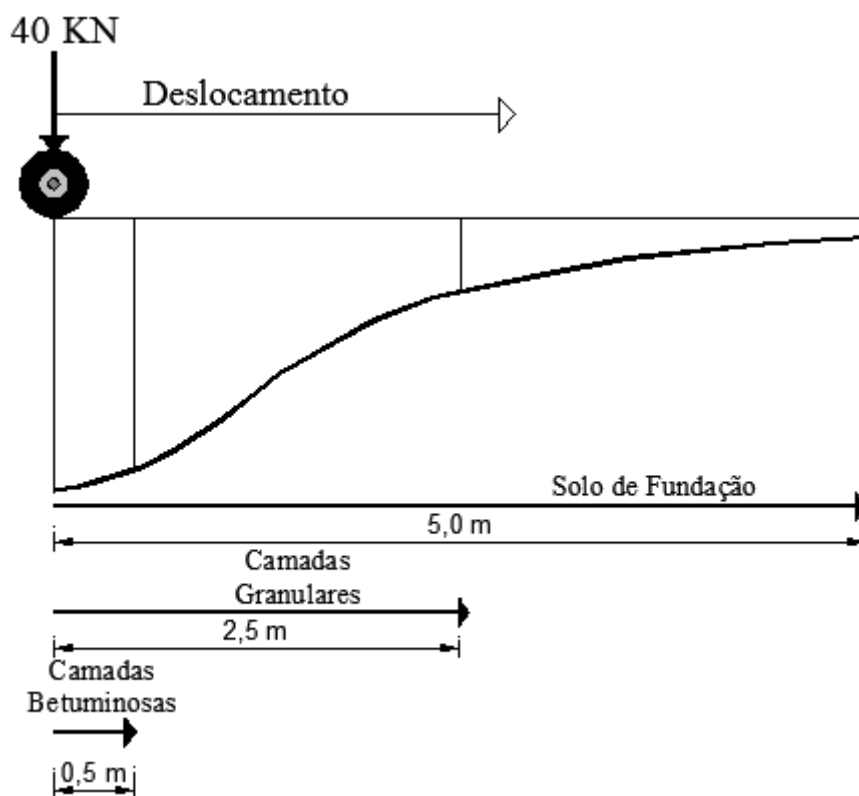


Figura 5.15 – Influência das camadas do pavimento na definição da bacia de deformação

Para uma espessura total das camadas betuminosas de 12 cm a temperatura de projeto é de 23,50 °C. A determinação da temperatura de projeto segue a explanação do capítulo 3. Primeiro foi determinado o fator de ponderação,  $W_{fator}$ ; posteriormente, foi determinado a temperatura média anual ponderada (TMAP), depois, com TMAP e para uma espessura de 12 cm de camadas betuminosas, pela figura 3.16 do capítulo 3, foi determinado uma temperatura de serviço de 23,50 °C. Com esta temperatura, é verificado uma diminuição dos módulos de deformabilidade (ver tabela 5.3), pois, a temperatura de projeto é maior que aquela que foi registada à superfície do pavimento no momento dos ensaios. A variação da temperatura influencia o comportamento das camadas betuminosas devido à presença de betume nessas camadas. No caso de um aumento da temperatura, a capacidade estrutural dessas misturas tende a diminuir, ou seja o módulo de deformabilidade da camada diminui.

Tabela 5.3 – Módulo de deformabilidade da camada betuminosa para a temperatura de projeto

Camada Betuminosa	T [°C]	ET [MPa]	E20 [MPa]	Tp [°C]	Etp [MPa]
Zona 1	18,20	6500	6232,26	23,50	5568,53
Zona 2	17,00	5000	4643,39	23,50	4148,87
Zona 3	17,00	595	552,56	23,50	493,72

## 5.5 Determinação da Espessura do Reforço

A reabilitação estrutural ao troço de estrada auscultado, visa principalmente repor as características do pavimento e, como tal, conferir-lhe qualidades funcionais e estruturais. Neste ponto de vista, no presente trabalho, a reabilitação centraliza-se apenas no reforço ao pavimento.

Assim, para os pontos de ensaio de menor capacidade estrutural, deflexões elevadas associadas com a existência de degradações, foi analisado e projetado o reforço ao pavimento existente.

Os métodos de dimensionamento do reforço ao pavimento auscultado, já mencionados no capítulo 3 são: método empírico-mecanicista das EP; método empírico-mecanicista da SHELL e método que considera a reflexão de fendas (Sousa et al, 2002).

### 5.5.1 Estudo do Tráfego Futuro

O tráfego é um dos agentes de degradação que maior importância tem no estudo da evolução do desempenho dos pavimentos. Se a evolução do tráfego real for superior à estimada no projeto, em princípio, o pavimento terá uma vida útil inferior (Pereira, et al, 2001).

Para o presente trabalho e para a via urbana estudada, a evolução do tráfego foi estimada pelo método do MACOPAV, como já referido no capítulo 4.

Devido às características que a via urbana estudada apresenta, com uma velocidade de circulação dos veículos de 50 Km/h e, devido ao seu posicionamento, como rede rodoviário de acesso principal à cidade de Bragança, foi considerado uma taxa de crescimento anual média e uma classe de tráfego intermédio.

Tabela 5.4 – Projeção do  $NAEP_{80KN}$  pelo método do MACOPAV

Classe de Tráfego	TMDA pesados	Taxa Média de Crescimento Anual	Fator de Agressividade [ $\alpha$ ]	Período de Dimensionamento [anos]	Número Acumulado de Eixos Padrão de 80 KN ( $N_p$ )
T4	300	0,04	4	10	<b>5258674,92</b>

Assim, considerando uma classe de tráfego T4 e um tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura de 300 veículos, o número acumulados de eixos padrão de 80 KN, para um período de dimensionamento de 10 anos e uma taxa de crescimento de 4%, é de 5258675 eixos de 80 KN, como indicado na tabela 5.4.

### 5.5.2 Propriedades dos Materiais Utilizados

As misturas betuminosas são caracterizadas pelo módulo de deformabilidade e pelo comportamento à fadiga e à deformação permanente. Assim, no presente trabalho, é apresentado a lei de fadiga para os materiais utilizados na camada de reforço, assim como, o módulo de deformabilidade, obtidos para misturas usadas no estudo desenvolvido por Minhoto, 2005.

As misturas betuminosas utilizadas no estudo da reabilitação ao pavimento rodoviário são: mistura betuminosa convencional (MC) e uma mistura betuminosa com betume modificado com borracha (BMB), de granulometria descontínua.

Trata-se de duas misturas normalmente apontadas como solução para camadas de reforço de pavimentos, em particular a mistura com BMB, à qual se atribuem qualidades orientadas para a resistência à reflexão de fendas (Minhoto, 2005).

#### *Vida à Fadiga*

A vida à fadiga das misturas betuminosas pode ser obtida pelo modelo desenvolvido pela Shell (expressão 5.6), na qual, relaciona a vida à fadiga com o nível de extensão e com a rigidez da mistura betuminosa:

$$N_f = \left( \frac{\varepsilon_t}{(0.85V_b + 1.08) E^{-0.36}} \right)^{-5} \quad (5.6)$$

Com:

$N_f$  = resistência à fadiga

$\varepsilon_t$  = extensão de tração

$E$  = módulo de rigidez da mistura betuminosa

$V_b$  = volume de betume da mistura betuminosa

No entanto, (Minhoto, 2005) estudou em laboratório a vida à fadiga das duas misturas betuminosas apresentadas. Para uma mistura convencional com uma percentagem em betume de 10.8% do tipo (50/70). E para a mistura com betume modificado com borracha com uma percentagem de betume de 17.5%.

Os estudos apresentados em, Minhoto 2005, mostraram a relação entre a extensão de tração com o módulo de rigidez em função da temperatura. Dessa relação resultou a lei de fadiga desenvolvida pela expressão 5.7.

$$N_f = \left( \frac{\varepsilon_t}{(aV_b + b)E^{-c}} \right)^{-d} \quad (5.7)$$

Com:

$N_f$  = resistência à fadiga

$\varepsilon_t$  = extensão de tração

E = módulo de rigidez da mistura betuminosa

a, b, c d = coeficientes adimensionais ajustáveis aos ensaios realizados

$V_b$  = volume de betume da mistura betuminosa

Os coeficientes que definem as leis de fadiga obtidas em laboratório para cada uma das misturas betuminosas são os que se apresentam na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Coeficientes da lei da Shell para misturas estudadas (Minhoto, 2005)

Coeficientes	Mistura convencional	Mistura com BMB
a	1,009E0	1,957E0
b	9,283E-1	9,258E-1
c	3,372E-1	4,344E-1
d	3,961E0	6,941E0
$R^2$	9,857E-1	9,864E-1

### ***Módulo de Deformabilidade***

A determinação do módulo de deformabilidade ou módulo de rigidez é efetuada pela expressão 5.8, desenvolvida através de um modelo linear, que exprime a evolução do módulo de rigidez em função da temperatura e da frequência de carregamento através de ensaios de flexão em 4 pontos efetuados às misturas betuminosas:

$$E = a + b \times T \quad (5.8)$$

Com:

E = módulo de rigidez

T = temperatura de ensaio

a, b = constantes, função do material e da frequência

A aplicação da expressão 5.8 aos ensaios, permitiu determinar os coeficientes a e b para cada tipo de mistura. Assim, a tabela 5.6 indica esses coeficientes determinados em função da temperatura.

Tabela 5.6 – Coeficientes para o modelo do módulo de rigidez em função da temperatura  
(Minhoto, 2005)

Material	Coeficientes	Frequência (Hz)				
		10	5	2	1	0.5
Mistura com BMB	a	3803	3600	3285	3050	2811
	b	-113	-111	-108	-101	-100
	R <sup>2</sup>	0,993	0,991	0,987	0,982	0,976
Mistura Convencional	a	14790	14117	13182	12374	11512
	b	-384	-402	-423	-429	-426
	R <sup>2</sup>	0,986	0,990	0,995	0,996	0,993

### 5.5.3 Soluções Projetadas

A reabilitação estrutural ao pavimento auscultado, mais propriamente o reforço estrutural, foi projetado para 10 anos e para um tráfego futuro de 5258675 eixos de 80 KN.

O reforço foi estudado para cada uma das três zonas de comportamento estrutural homogéneo, e dependeu da vida residual do pavimento auscultado, ou seja, do número acumulado de eixos padrão que o pavimento auscultado ainda resiste antes de entrar em ruína.

A vida residual do pavimento existente foi determinada pelo programa BISAR, em que através dos critérios de ruína do pavimento e das extensões de tração de compressão, é determinado a vida admissível do pavimento.

Os dados de entrada no programa são idênticos aos utilizados no processo de retroanálise dos módulos de deformabilidade. Nesta etapa para além de entrar os módulos determinados anteriormente, o eixo-padrão a utilizar como definidores das cargas aplicadas sobre o pavimento é o definido pelo método da Shell.

Na tabela 5.7 apresenta-se a vida residual do pavimento,  $N_{ae}$  de 80 KN, para cada uma das zonas. É verificado que para a zona 1, a que tem uma menor deflexão, tem uma vida superior daquela que foi projetada para 10 anos.

Para as restantes zonas a vida residual do pavimento é inferior ao do tráfego futuro, necessitando, neste caso, de uma reabilitação estrutural. Assim, o estudo do reforço foi realizado, apenas, para a zona 2 e zona 3.

Relativamente à zona 1, visto que o pavimento nesta zona apresenta algumas degradações, nomeadamente, fendilhamento de baixo nível, e tem uma vida residual superior ao tráfego

futuro projetado, é sugerido, como medidas de reabilitação funcional do pavimento, por exemplo, a execução de técnicas de selagem de fendas, seguida, de técnicas de reabilitação das características superficiais com, por exemplo a aplicação de revestimento betuminoso superficial, com vista a melhorar a permeabilidade, rugosidade e regularidade do pavimento.

Tabela 5.7 – Vida residual do pavimento para as zonas de comportamento estrutural homogéneo

Zona	Deflexão máxima [10 <sup>-2</sup> mm]	N <sub>ae 80 KN</sub>	N <sub>p</sub> = 5258674,92 de 80 KN
1	31,52	28986692,36	N <sub>ae</sub> > N <sub>p</sub>
2	40,05	2803693,84	N <sub>ae</sub> < N <sub>p</sub>
3	70,88	441238,19	N <sub>ae</sub> < N <sub>p</sub>

Uma outra análise, às deflexões máximas, permite concluir que realmente a zona 1 tem uma vida superior às restantes. Pela análise da tabela 5.8, que exprime a classe de deflexão e a classe de NEEP (número equivalente de eixos-padrão) em função da deflexão (1/100 mm), é concluído que a zona 1 tem uma classe de deflexão 1 e classe de NEEP 3. Com esta conclusão e na tabela 5.9 é retirado um NEEP > 500.

A mesma análise para as restantes zonas permite concluir que têm classes de NEEP de 2, e como tal, um NEEP < 500.

Tabela 5.8 – Classes de deflexão (Pereira & Miranda, 1999a)

Classes de deflexão	Classes de NEEP		
	1	2	3
1	< 100	< 70	< 40
2	100 - 150	70 - 120	40 - 80
3	> 150	> 120	> 80

Tabela 5.9 – Classes de TMDA e do NEEP (Pereira & Miranda, 1999a)

Classes de TMDA/NEEP	Valores do TMDA	Valores do NEEP de 130 KN
1	< 3000	< 100
2	3000 - 8000	100 - 500
3	8000	> 500

A figura 5.16 ilustra o procedimento adotado para o dimensionamento da camada de reforço das duas zonas de comportamento estrutural homogéneo.

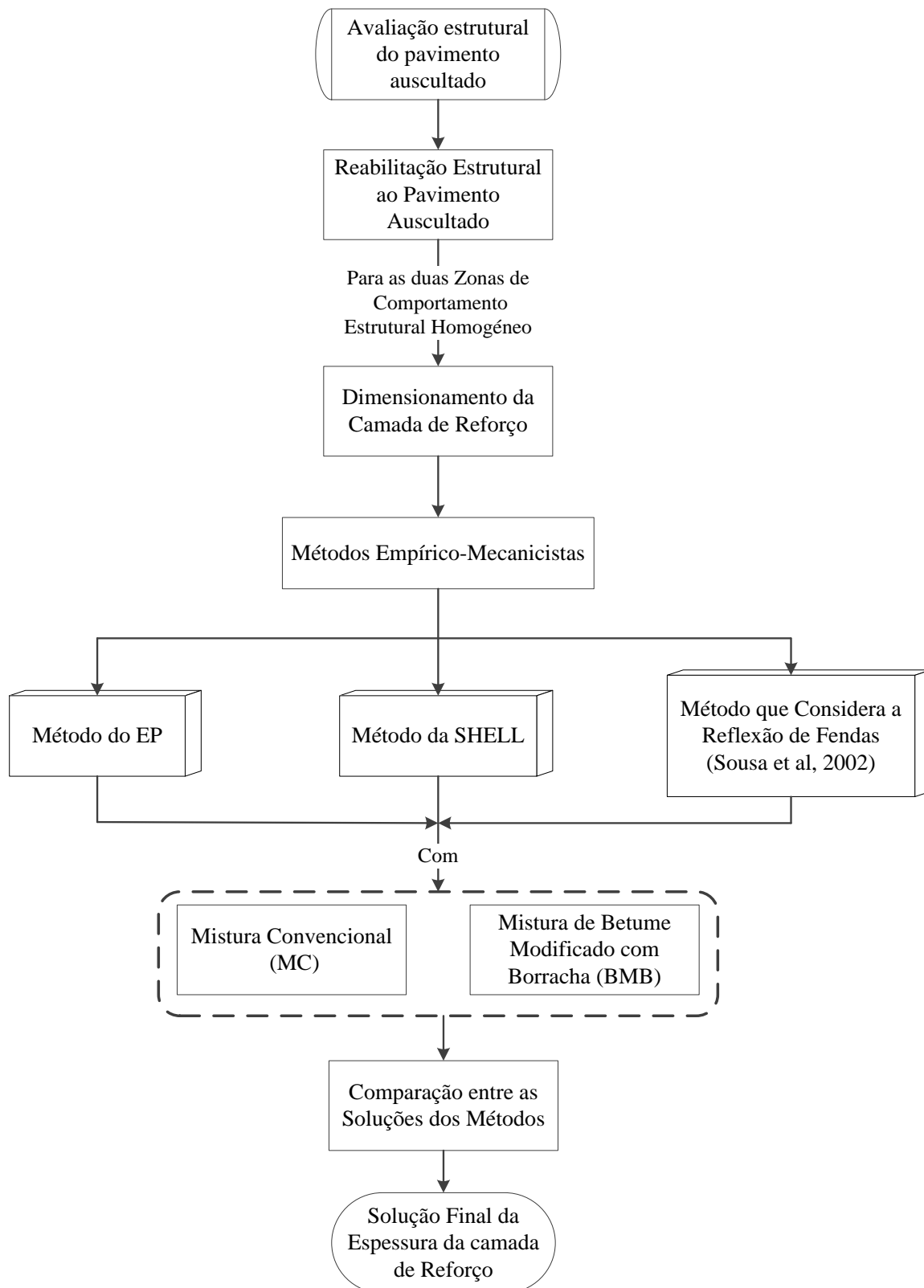


Figura 5.16 – Procedimento adotado para o dimensionamento da camada de reforço

## Método das EP

O método das EP utilizado no dimensionamento do reforço foi o método do nível 3, ou seja, o da metodologia de dimensionamento do reforço.

A espessura do reforço, pelo programa BISAR, foi obtido iterativamente, em que numa primeira fase foi arbitrado a espessura do reforço e verificado se o número admissíveis de eixos-padrão, determinados pelos critérios de ruína, é superior ou igual ao tráfego futuro.

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0,070	5,54E+03	0,35
2	0,120	4,15E+03	0,35
3	0,200	1,80E+02	0,30
4		9,20E+01	0,35

Figura 5.17 – Introdução de dados no BISAR

O módulo de deformabilidade do material a utilizar no reforço depende da espessura do reforço, pois, pela expressão 5.5, o  $T$  é a temperatura de projeto determinado pelo método da Shell e, como tal, depende da espessura do material adicionado ao pavimento existente.

Os parâmetros  $a$  e  $b$  a utilizar na fórmula 5.5 são definidos para uma frequência de 10 Hz. Assim, na figura 5.17 indica-se os dados utilizados no BISAR, nomeadamente, a espessura da camada do reforço e o módulo de deformabilidade, que neste caso são os dados da iteração final para a zona 2 e para um reforço de mistura convencional.

Na tabela 5.10 são indicadas as espessuras finais da camada do reforço, para a zona 2 e 3, e considerando as situações de aplicação dos dois tipos de misturas: mistura convencional (MC) e mistura betuminosa com betume modificado com borracha (BMB).

Tabela 5.10 – Espessura da camada de reforço obtida pelo programa BISAR

		Módulo das camadas betuminosas do pavimento existente ( $E_{tp}$ ) [MPa]	Módulo do reforço [MPa]	Espessura do reforço [m]
Zona 2	MC	4148,87	5228,40	0,04
	BMB		989,30	0,02
Zona 3	MC	493,72	5689,20	0,12
	BMB		1068,40	0,07

Uma análise à tabela 5.11 permite referir que para o caso da zona 2 e fazendo uma análise aos critérios de ruína, o número admissíveis de eixos-padrão foi determinado pelo critério da fadiga para a mistura convencional e para a mistura com BMB, verificando, uma extensão máxima de tração na base da camada betuminosa do pavimento existente, pois na base da camada de reforço as extensões são de compressão, sendo que a lei de fadiga utilizada neste caso foi a explanada no capítulo 4 e apresentada pela expressão 5.9. Já para a zona 3 e para uma mistura convencional na camada de reforço o critério determinante foi o da fadiga, com a extensão máxima de tração na base da camada de reforço, e a lei de fadiga utilizada foi a obtida pelo estudo desenvolvido por Minhoto, 2005 (expressão 5.7 do presente capítulo) enquanto que, para a mistura de betume modificado com borracha o critério decisivo foi o da deformação permanente.

Os números admissíveis obtidos pelo critério da fadiga resultaram de um ajustamento da expressão 5.9 já explanada no capítulo 4. Esse ajustamento resultou de uma multiplicação da vida útil obtida pela expressão 5.9 por 2,5, para ter em conta a distribuição lateral do tráfego; e para ter em conta o efeito dos gradientes de temperatura a vida útil foi dividida por 2 (valores de ajustamento retirados em Branco et al, 2008).

$$\varepsilon_t = K \times 10^{-3} \cdot N_{80}^{-0.2} \quad (5.9)$$

Tabela 5.11 – Número admissíveis de eixos-padrão, obtidos pelos critérios de ruína

		Critério de ruína	
		Fadiga (eixos de 80 KN)	Deformação permanente (eixos de 80 KN)
Zona 2	MC	5881921,25	35991424,80
	BMB	30121550,67	77524120,90
Zona 3	MC	5365064,14	54021595,13
	BMB	3131374280,87	6236625,06

Para a zona 3, onde a extensão máxima de tração ocorre na base da camada betuminosa do reforço, é verificado um melhor comportamento à fadiga para a mistura de betume modificado com borracha, pois, em relação à mistura convencional, a mistura BMB oferece ao pavimento existente uma resistência à fadiga maior. Que é confirmado pelos estudos de (Minhoto, 2005).

## Método da SHELL

Para este método de dimensionamento, o módulo de deformabilidade utilizado na camada de reforço, tal como no método das EP, depende da temperatura de projeto e esta depende da espessura da camada do reforço. Este módulo é determinado através da expressão 5.5 do presente capítulo.

O programa de cálculo utilizado neste estudo, SPDM, desenvolvido pela SHELL permite introduzir os dados necessários do pavimento existente, assim como, as características dos materiais do reforço. O funcionamento deste programa considera a metodologia explanada no capítulo 4 (Método empírico-mecanicista da SHELL).

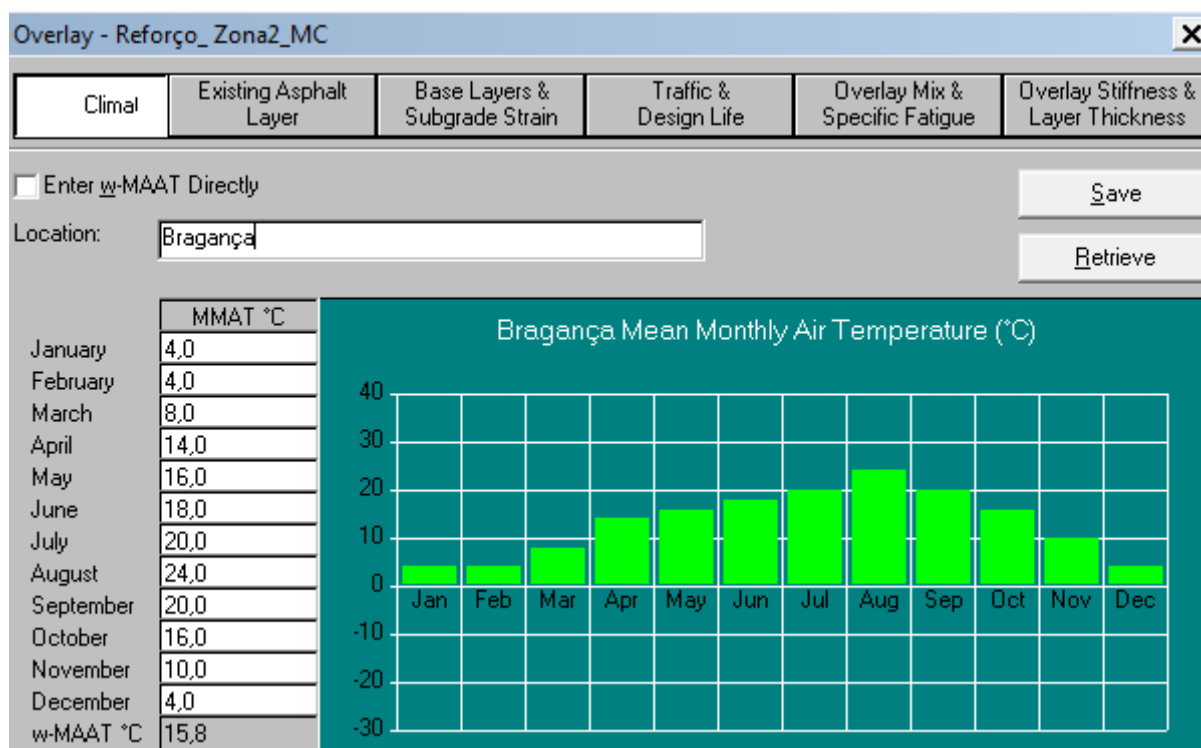


Figura 5.18 – Introdução de dados no SPDM: clima

Numa primeira etapa é necessário indicar ao programa as temperaturas médias mensais da região de Bragança do ano de 2011. O próprio programa calcula a temperatura média mensal ponderada, que é de 15,8 °C. Desta forma é definido o clima da região onde se insere o pavimento. Na figura 5.18 é indicado a primeira janela de introdução de dados no SPDM que é a definição do clima.

Figura 5.19 – Introdução de dados no SPDM: camada betuminosa do pavimento existente

A definição das características mecânicas da camada betuminosa do pavimento existente, assim como, a sua espessura, é efetuada com a introdução dos dados numa janela denominada de camada betuminosa existente, como indicado na figura 5.19. Nesta figura são apresentados os dados relativos à zona 2.

Nesta fase é necessário indicar ao programa o estado superficial das camadas betuminosas, que pode ser: camada betuminosa com pequenas degradações superficiais ou camada betuminosa com alto nível de degradação superficial. É necessário ainda introduzir a percentagem de betume ( $V_b$ ) utilizado no fabrico da mistura da camada betuminosa, que para o pavimento existente e para mistura convencional (MBD) foi suposto um valor de 11%, valor este retirado no Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) indicado na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Características volumétricas das misturas betuminosas a quente (EP-JAE,1995)

	Código	Composição volumétrica (%)		
		Agregado ( $V_a$ )	Betume ( $V_b$ )	Vazios ( $V_v$ )
Betão betuminoso em camada de desgaste	BD	84	12	4
Mistura betuminosa densa em camada de regularização	MBD	84	11	5
Macadame betuminoso em camada de regularização	MB	84	9	7

Overlay - Reforço\_Zona 2\_MC

Climate Existing Asphalt Layer Base Layers & Subgrade Strain Traffic & Design Life Overlay Mix & Specific Fatigue Overlay Stiffness & Layer Thickness

Sub-base Modulus Options:

- Enter sub-base modulus
- Calculate at 50% confidence level
- Calculate at 85% confidence level
- Calculate at 95% confidence level

Description:

Save Retrieve

	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
Sub-base:	0,200	180,00	0,30
Subgrade:	infinite	92,00	0,35

Permissible Subgrade Strain Criterion:

- Use specific criterion
- Default criterion at 50% confidence level
- Default criterion at 85% confidence level
- Default criterion at 95% confidence level

Figura 5.20 – Introdução de dados no SPDM: camadas granulares e solo de fundação

Numa terceira etapa, como dados necessários ao desenvolvimento do programa, está a introdução das características estruturais das camadas granulares e do solo de fundação do pavimento existente, assim como, as respetivas espessuras das camadas.

Na figura 5.20, como exemplo, temos os dados referentes à zona 2. Neste caso, os módulos introduzidos no programa são os resultantes da auscultação estrutural.

Nesta etapa também é definido o critério de ruína de deformação à superfície, que é definido para um nível de confiança de 50%.

Overlay - Reforço\_Zona 2\_MC

Climate Existing Asphalt Layer Base Layers & Subgrade Strain Traffic & Design Life Overlay Mix & Specific Fatigue Overlay Stiffness & Layer Thickness

Enter Equivalent Number of Standard Axles per Lane for Future Period

Save Retrieve

Equivalent Number of Standard Axles per Lane for Future Period: 5,2587E+06

Equivalent Number of Standard Axles per Lane for Original Design: 1,5934E+06

Percentage Residual Life of Existing Asphalt Layer (%): 2,50

Lateral Distribution Factor for the Traffic in the Lane: 2,0

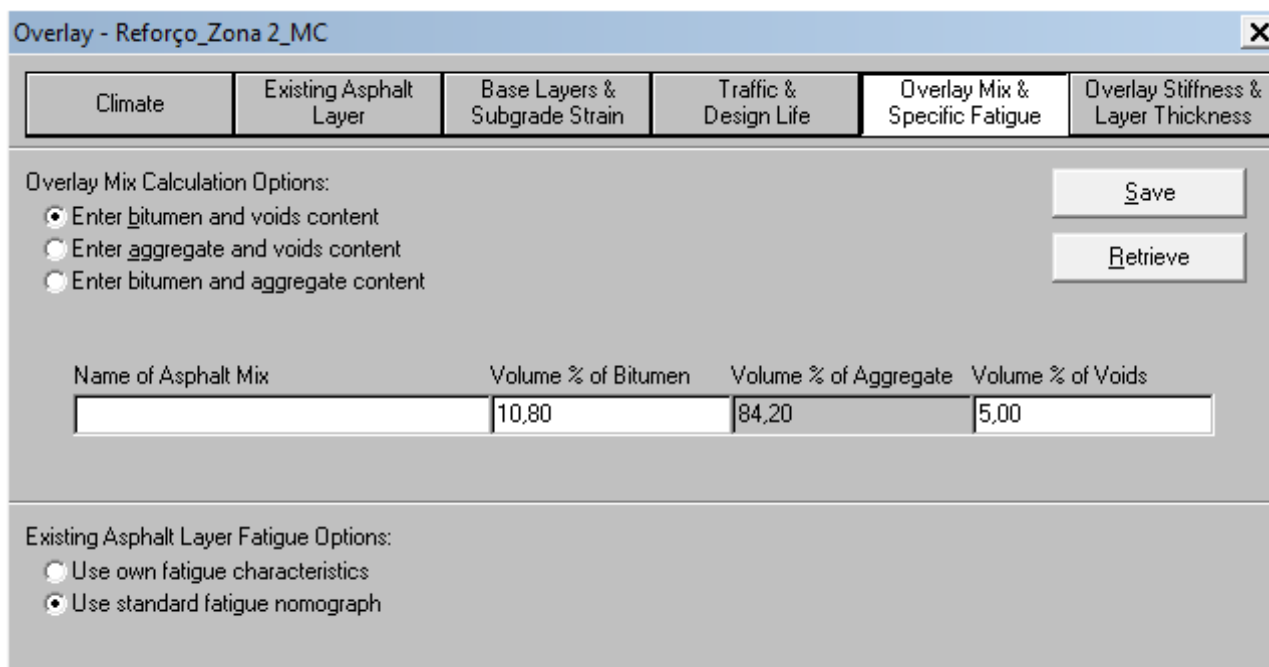
Healing Factor for the Pavement under Traffic Conditions: 5,0

Figura 5.21 – Introdução de dados no SPDM: tráfego

Os dados do tráfego são introduzidos numa quarta etapa (figura 5.21). O número acumulado de eixos-padrão para o futuro do pavimento pode ser introduzido diretamente, assim como, a vida residual do pavimento auscultado.

Como a vida residual é inferior ao número de eixos do tráfego futuro, é considerado uma percentagem mínima de vida residual, que o programa define como 2,5%.

Para ter em conta a distribuição lateral do tráfego e os gradientes da temperatura no pavimento, o programa considera, por defeito, os fatores de ajustamento de 2 e 5 respetivamente. Assim, a vida do pavimento dimensionado é afetado por estes dois fatores, dividindo a vida do pavimento obtida numa primeira fase pelos dois fatores.



Overlay - Reforço\_Zona 2\_MC

Climate Existing Asphalt Layer Base Layers & Subgrade Strain Traffic & Design Life Overlay Mix & Specific Fatigue Overlay Stiffness & Layer Thickness

Overlay Mix Calculation Options:

- Enter bitumen and voids content
- Enter aggregate and voids content
- Enter bitumen and aggregate content

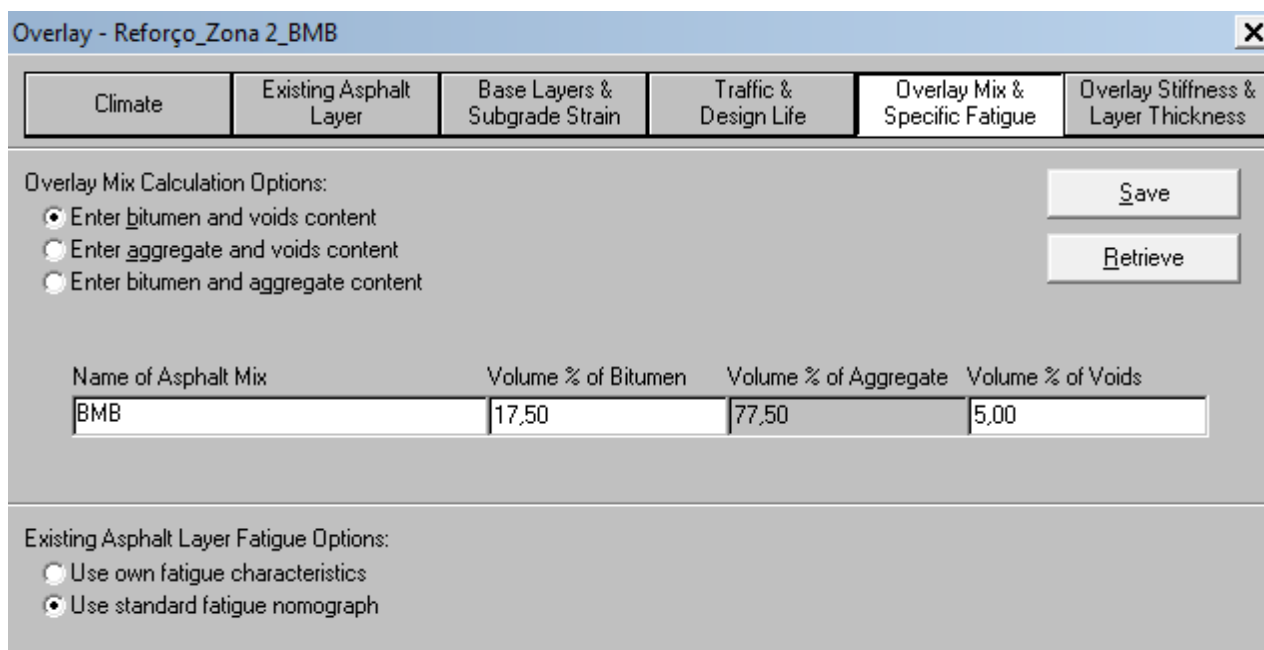
Save Retrieve

Name of Asphalt Mix	Volume % of Bitumen	Volume % of Aggregate	Volume % of Voids
	10,80	84,20	5,00

Existing Asphalt Layer Fatigue Options:

- Use own fatigue characteristics
- Use standard fatigue nomograph

Figura 5.22 – Introdução de dados no SPDM: características volumétricas da mistura convencional da camada do reforço



Overlay - Reforço\_Zona 2\_BMB

Climate Existing Asphalt Layer Base Layers & Subgrade Strain Traffic & Design Life Overlay Mix & Specific Fatigue Overlay Stiffness & Layer Thickness

Overlay Mix Calculation Options:

Enter bitumen and voids content  
 Enter aggregate and voids content  
 Enter bitumen and aggregate content

Save Retrieve

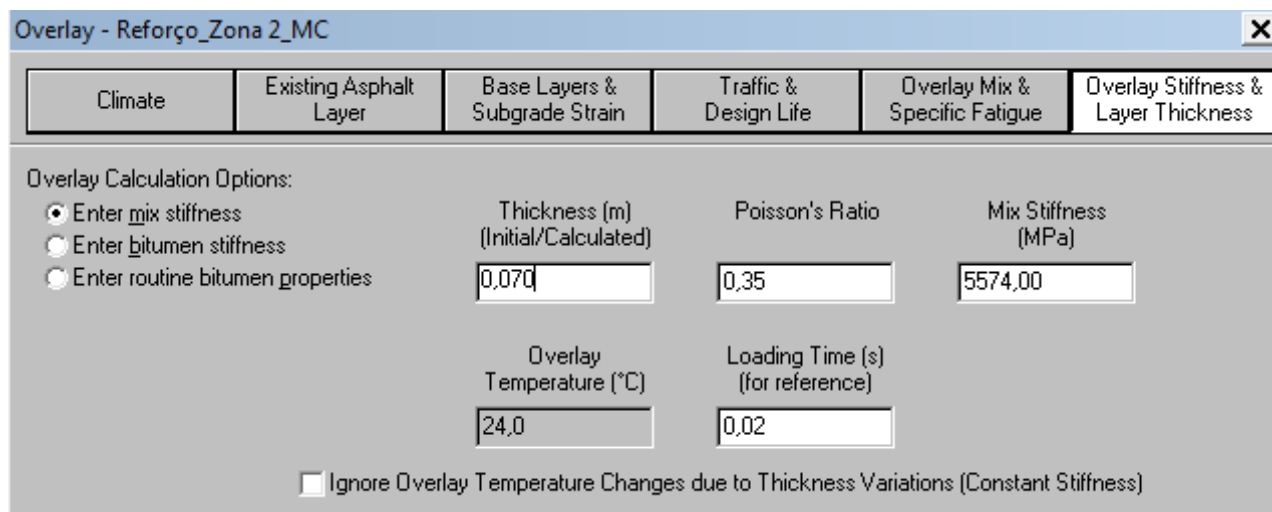
Name of Asphalt Mix	Volume % of Bitumen	Volume % of Aggregate	Volume % of Voids
BMB	17,50	77,50	5,00

Existing Asphalt Layer Fatigue Options:

Use own fatigue characteristics  
 Use standard fatigue nomograph

Figura 5.23– Introdução de dados no SPDM: características volumétricas da mistura de BMB como camada do reforço

As características volumétricas das misturas a utilizar como camada de reforço são as definidas em: propriedades dos materiais utilizados, do presente trabalho. Na figura 5.22, os dados inseridos referem-se à mistura convencional e a figura 5.23 refere-se à mistura BMB.



Overlay - Reforço\_Zona 2\_MC

Climate Existing Asphalt Layer Base Layers & Subgrade Strain Traffic & Design Life Overlay Mix & Specific Fatigue Overlay Stiffness & Layer Thickness

Overlay Calculation Options:

Enter mix stiffness  
 Enter bitumen stiffness  
 Enter routine bitumen properties

Thickness (m) (Initial/Calculated)	Poisson's Ratio	Mix Stiffness (MPa)
0,070	0,35	5574,00
Overlay Temperature (°C)	Loading Time (s) (for reference)	
24,0	0,02	

Ignore Overlay Temperature Changes due to Thickness Variations (Constant Stiffness)

Figura 5.24 – Introdução de dados no SPDM: espessura do reforço e características mecânicas para MC

Figura 5.25 – Introdução de dados no SPDM: espessura do reforço e características mecânicas para BMB

Por fim, a definição do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa do reforço é introduzida na sexta e última etapa de dimensionamento do reforço do SPDM. No caso referido na figura 5.24, a temperatura é de 24°C e o módulo de 5574 MPa, para mistura convencional, para mistura betuminosa modificada com borracha (BMB), figura 5.25, o módulo é de 1091 MPa. Estes valores, assim como, o valor da espessura da camada de reforço, foram obtidos por um processo iterativo que o próprio programa executa.

As espessuras obtidas pelo programa SPDM estão representadas na tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Espessura da camada de reforço obtida pelo programa SPDM

		Módulo das camadas betuminosas do pavimento existente ( $E_{tp}$ ) [MPa]	Módulo do reforço [MPa]	Espessura do reforço [m]
Zona 2	MC	4148,87	5574,00	0,07
	BMB		1091,00	0,072
Zona 3	MC	454,00	5420,40	0,038
	BMB		1068,40	0,061

Em relação a zona 2, numa primeira fase de dimensionamento, foi introduzido no programa que a camada superficial do pavimento se encontrava com baixas degradações superficiais, mas o facto de o pavimento existente apresentar uma baixa vida residual, a consideração de razoáveis condições superficiais poderia levar a espessuras elevadas, como tal, foi aceite a opção de considerar que o pavimento existente apresenta uma superfície bem degradada.

Os critérios de ruína que definiram o dimensionamento foram, para a maioria, o da deformação permanente, no entanto, para zona 2, com uma mistura convencional como camada de reforço, o critério que definiu o dimensionamento foi o da fadiga. Na tabela 5.14 é indicado o número admissível de eixos de 80 KN que o pavimento reforçado registre antes de entrar em ruína, para as quatro soluções de dimensionamentos, assim como, o critério que o definiu.

Tabela 5.14 – Número de eixos-padrão definidos pelos critérios de ruína

		Critério de ruína	
		Fadiga (eixos de 80 KN)	Deformação permanente (eixos de 80 KN)
Zona 2	MC	5300000 (reforço)	9680000
	BMB	8177000 (reforço)	7580000
Zona 3	MC	29060000 (reforço)	5350000
	BMB	4743560000(reforço)	7510000

Em relação ao critério de fadiga, o programa identifica em que camada o critério de fadiga é determinante, se é na base das camadas betuminosas do pavimento existente ou na base da camada do reforço. Para o caso em estudo, para as quatro soluções de reforço o critério de fadiga foi definido na base da camada do reforço.

Uma comparação ao método anterior, permite referir que, em relação a zona 2 os critérios de ruína que definem o número de eixos-padrão que o pavimento resistirá são maiores para o método das EP. Sendo que, o critério que condiciona o dimensionamento para o método do SPDM e para a mistura de BMB é o da deformação permanente.

Em relação a zona 3, o número de eixos-padrão definidos pelos critérios de ruína já são mais aproximados ao método anterior, com a diferença de que, o critério que define o número de eixos-padrão para a mistura convencional ser o da deformação permanente.

**Método que considera a reflexão de fendas (Sousa et al, 2002)**

O procedimento utilizado para o dimensionamento do reforço controlando a reflexão de fendas, foi o método desenvolvido por Sousa et al, 2002, já mencionado no capítulo 4.

Para este método o módulo de deformabilidade determinado pela expressão 5.10 para cada mistura de reforço é definido para uma temperatura constante de 20°C. Os parâmetros  $a$  e  $b$  são referentes à uma frequência de 10 Hz.

$$E = a + b \times T \quad (5.10)$$

O módulo de deformabilidade, assim obtido, é corrigido para uma temperatura média anual ponderada, pela expressão 5.11.

$$E(TMAA) = E(T_i) \times 10^{-0.025 \times (TMAA - T_i)} \quad (5.11)$$

Com:

$T_i$  a temperatura de 20°C e TMAA uma temperatura de 15,80 °C obtida pelo método da Shell e para as temperaturas médias mensais do ar no ano 2011 da região de Bragança.

Os módulos de deformabilidade, assim determinados, devem ser afetados por um fator corretivo de envelhecimento da mistura do reforço, AAF, multiplicando este fator pelo módulo de deformabilidade obtido anteriormente para as misturas a utilizar na camada de reforço.

O módulo de deformabilidade da camada betuminosa do pavimento existente, caracterizado pelos ensaios com a Viga Benkelman, também é corrigido pela expressão 5.11. Neste caso, e para ambas as zonas de comportamento estrutural homogéneo, a temperatura  $T_i = 17$  °C é a temperatura da superfície do pavimento na altura de execução dos ensaios com a Viga Benkelman.

O dimensionamento do reforço com este método de dimensionamento foi realizado através duma folha em EXCEL, (desenvolvida por Dr. J. Sousa, professor J. Pais, Dr. R. Saim, G. Way e D. Stubstad) que está representada nas figuras 5.26 e 5.27. Estas figuras ilustram os dados de entrada na folha de EXCEL, necessários para o dimensionamento da camada de reforço pelo método da reflexão de fendas, assim como, os gráficos que permitem a leitura da espessura da camada de reforço para ambas as misturas betuminosas, respetivamente para a zona 2 e zona 3.

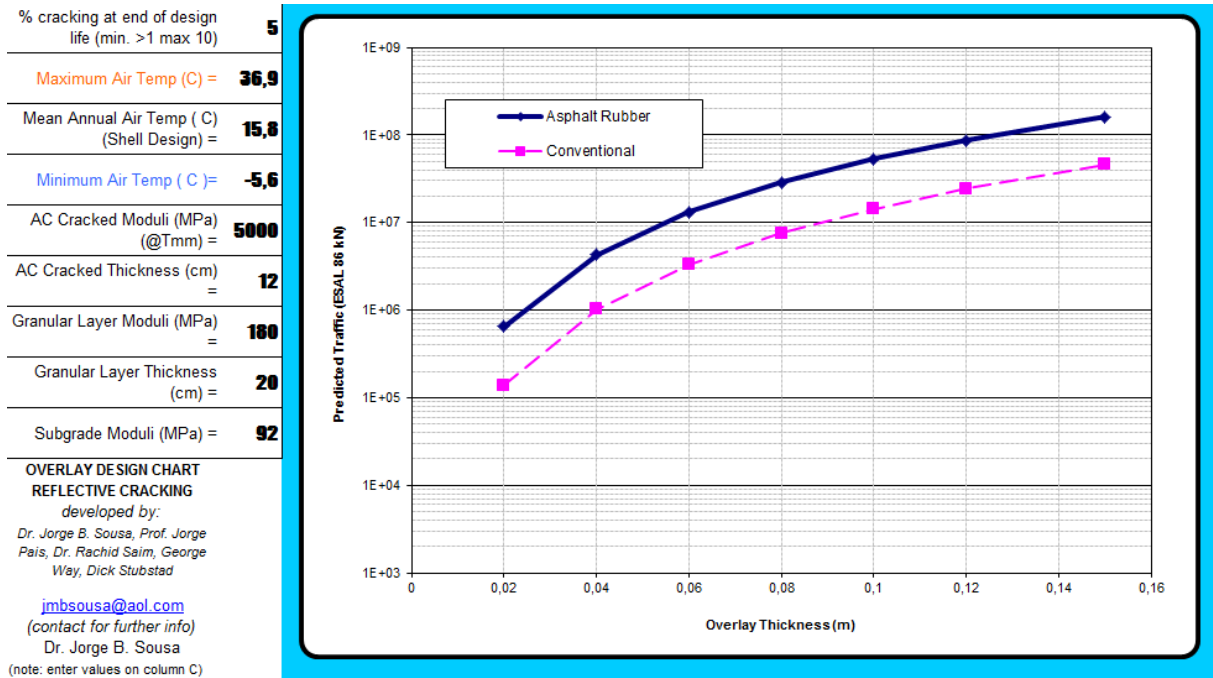


Figura 5.26 – Introdução dos dados/espessuras – Zona 2

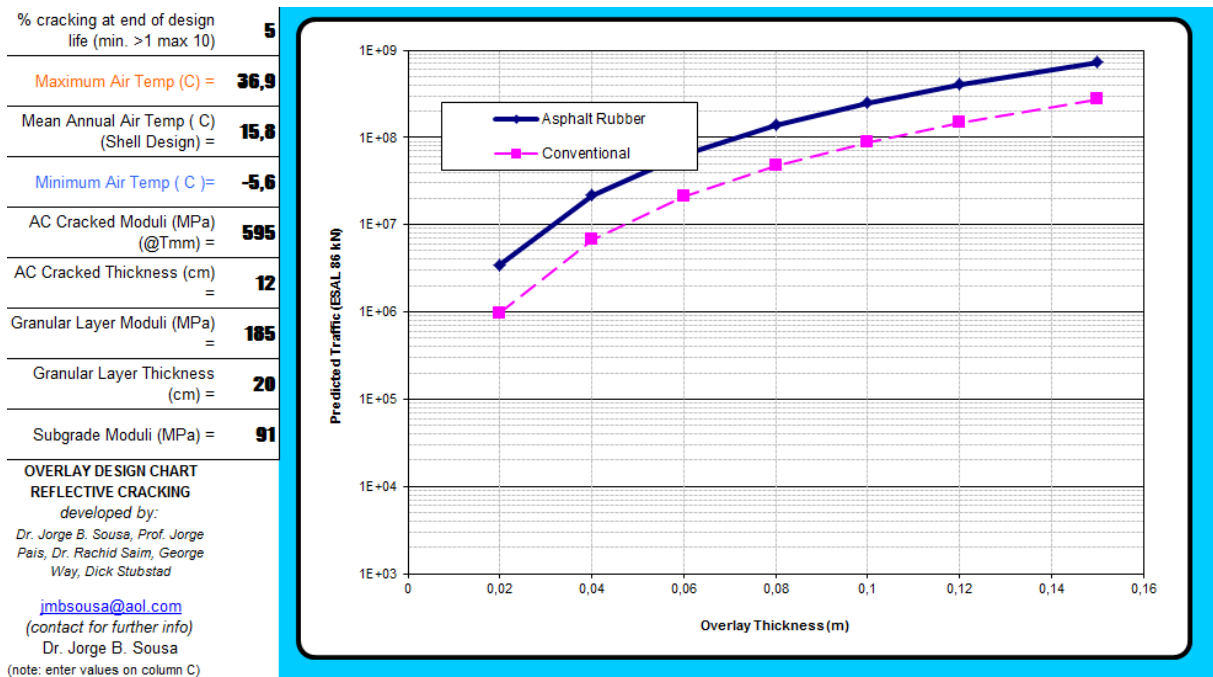


Figura 5.27 – Introdução dos dados/espessuras – Zona 3

A tabela 5.15 indica as espessuras da camada do reforço obtidas pelo método da reflexão de fendas.

Tabela 5.15 – Espessura da camada de reforço obtida pelo método da reflexão de fendas

		Módulo das camadas betuminosas do pavimento existente ( $E_{tp}$ ) [MPa]	Módulo do reforço [MPa]	Espessura do reforço [m]
Zona 2	MC	5357,60	11483	0,072
	BMB		5993	0,045
Zona 3	MC	637,55	11483	0,037
	BMB		5993	0,027

### 5.5.4 Comparação entre Soluções

Os três métodos apresentados no estudo da reabilitação do pavimento auscultado para as duas misturas, a mistura convencional e o betume modificado com borracha, conduziram a diferentes espessuras de reforço.

Na tabela 5.16 estão indicadas as espessuras da camada de reforço determinadas pelos três métodos estudados, para as duas zonas de comportamento estrutural homogêneo, com as respectivas misturas.

Em relação ao método da reflexão de fendas, conduziu a uma espessura da camada de reforço maior para a mistura convencional, para ambas as zonas, do que se deduz que a mistura betuminosa com BMB apresenta melhor desempenho quando sujeito à reflexão de fendas.

Já o método da SHELL, para a zona 2 e zona 3, obteve uma maior espessura da camada de reforço para a mistura betuminosa com BMB. Enquanto que, para o método das EP, a espessura de reforço com mistura convencional é maior, para as duas Zonas.

Tabela 5.16 – Comparação entre as espessuras da camada de reforço pelos três métodos

		Espessura da camada de reforço [m]		
		EP (BISAR)	SHELL (SPDM)	Reflexão de Fendas
Zona 2	MC	0,040	0,070	0,072
	BMB	0,020	0,072	0,045
Zona 3	MC	0,12	0,038	0,037
	BMB	0,07	0,061	0,027

A figura 5.28 ilustra a camada de reforço sobre o pavimento existente com uma determinada espessura e para uma determinada mistura betuminosa.

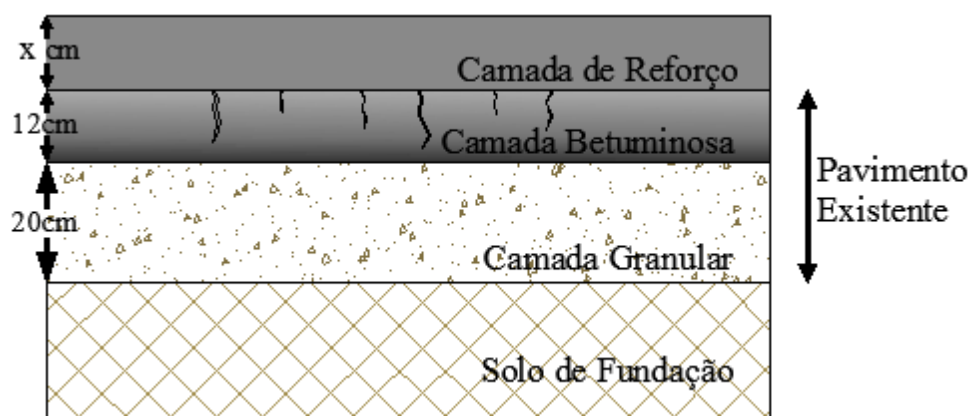


Figura 5.28 – Aplicação da camada de reforço no pavimento auscultado

Devido às melhores capacidades estruturais da mistura betuminosa com betume modificado com borracha, relativamente à mistura convencional, nomeadamente, a boa resistência à fadiga, a maior flexibilidade e elasticidade, como também, o melhor comportamento à deformação plástica, esta seria a mistura escolhida para a reabilitação estrutural do pavimento auscultado.

O método da reflexão de fendas, como considera a percentagem de fendilhamento no pavimento existente e a reflexão de fendas, as espessuras da camada de reforço calculadas por este método devem ser escolhidas para a reabilitação do pavimento auscultado, uma vez que o pavimento auscultado apresenta degradações pertencentes à família do fendilhamento.

Assim, a espessura da camada de reforço a aplicar no pavimento auscultado, com o objetivo de melhorar a sua capacidade estrutural e também funcional são respetivamente para a zona 2 e zona 3 de 4.5 cm e 2.7 cm.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A auscultação estrutural a um pavimento rodoviário flexível existente envolve um conjunto de métodos que, quando executados corretamente, permitem o conhecimento dos módulos de deformabilidade do solo de fundação, da camada granular e da camada betuminosa do pavimento auscultado.

O conhecimento do módulo de deformabilidade das camadas que constituem o pavimento e o solo de fundação é possível através da análise dos dados de ensaios realizados ao pavimento, nomeadamente deflexões reversíveis.

O equipamento utilizado na realização dos ensaios em campo, no trecho de estrada auscultado, Viga Benkelman, permite medir a deflexão reversível do pavimento quando solicitado por uma carga rolante de um rodado duplo, dum eixo de 80 KN, dum veículo pesado. Devido a imposição de uma velocidade de deslocamento lenta do camião (2 a 3 Km/h), a dificuldade em controlar o deslocamento do mesmo aumenta, o que, em certos momentos, quando a velocidade é excedida, pode dificultar as leituras das deflexões no extensómetro.

O método da divisão do trecho de estrada em zonas de comportamento estrutural homogéneo, permitiu a distinção de três zonas e os respetivos deflectogramas característicos destacaram a influência do carregamento na definição do deflectograma, verificando que o deflectograma da zona 2 representa uma menor área de influência do carregamento.

As características mecânicas das camadas que constituem o pavimento auscultado influenciam a forma da bacia de deflexão. No presente trabalho, através da iteração efetuada no método de retroanálise foi possível distinguir a camada que influencia a forma da bacia até uma certa distância do ponto de ensaio.

O conhecimento do conjunto dos módulos de deformabilidade para cada zona de comportamento estrutural homogéneo, determinados pelo método da retroanálise, possibilitou estimar a vida residual do pavimento e, assim, averiguar a necessidade de uma reabilitação estrutural ao mesmo.

Das três zonas estudadas, a zona um é a que tem uma vida residual superior ao tráfego futuro projetado e, como tal, não necessita de uma reabilitação estrutural. As restantes zonas como têm uma vida residual inferior àquela que foi projetada, foi estudada uma reabilitação

estrutural ao pavimento dessas zonas.

Os três métodos de dimensionamento do reforço estrutural ao pavimento auscultado expostos e utilizados no presente trabalho, utilizam metodologias próprias e apresentam os mesmos critérios de ruína de base ao dimensionamento de pavimentos rodoviários: critério da fadiga e critério da deformação permanente à superfície do pavimento. No entanto, o método que considera a reflexão de fendas tem em conta a existência de fendas do pavimento existente e, como tal, considera o “fenómeno da reflexão de fendas” e, por isso, é o método mais adequado ao dimensionamento de reforço de um pavimento rodoviário flexível com uma considerável degradação superficial, nomeadamente o fendilhamento.

A determinação do número admissível de eixos-padrão de 80 KN, pelo critério de fadiga utilizado no dimensionamento da camada de reforço pelo método das EP, envolveu a aplicação de duas expressões, uma expressão utilizada quando a extensão máxima de tração ocorre na base das camadas betuminosas do pavimento existente (expressão desenvolvida pela SHELL) e outra cujo valor dependerá das misturas aplicadas da camada de reforço (MC e BMB), desenvolvida por Minhoto, 2005 e, portando, aplicada para a ocorrência de extensões máximas de tração na base da camada de reforço. Já em relação ao método da SHELL a lei de fadiga utilizada no dimensionamento foi a desenvolvida pela SHELL e foi igual para ambas as zonas e para as duas misturas utilizadas.

Em relação às misturas betuminosas utilizadas no estudo do reforço, concretamente uma mistura convencional e uma mistura betuminosa com betume modificado com borracha (BMB), a aplicação dos métodos de dimensionamento, permitiram verificar que a mistura betuminosa com BMB apresenta, na maioria dos casos, melhor comportamento à fadiga do que a mistura convencional, pois os números de eixos-padrão admissíveis determinados pelo critério da fadiga são superiores quando comparados com os da mistura convencional.

O reforço de pavimentos constituído por uma mistura com BMB melhora o comportamento do pavimento principalmente devido às suas propriedades de boa flexibilidade, boa resistência à fadiga e uma boa contribuição para o comportamento global do pavimento à deformação permanente. O bom desempenho descrito contribui significativamente para uma boa resposta do reforço relativamente ao fenómeno da reflexão de fendas, apresentando, neste domínio, uma maior eficiência quando comparada com as misturas convencionais.

Com a aplicação do reforço sobre o pavimento auscultado, a circulação rodoviária e a comodidade é melhorada, pois aumenta a aptidão estrutural do pavimento, aumentando também a vida do pavimento em serviço.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, T. S. (2007). *"Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários - Aplicação Prática do Radar de Prospeção e do Deflectómetro de Impacto"*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Antunes, L. (1999). *"Gestão da Conservação de Pavimentos -As Técnicas de Avaliação da Características Estruturais dos Pavimentos "*. Centro Rodoviário Português (C.R.P). Lisboa.
- Antunes, M. d. (2005). *"Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários"*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Antunes, M. d., Branco, F., & Barros, R. (2004). *"Avaliação"IN-SITU" das Condições de Fundação dos Pavimentos Rodoviários com Base em Ensaio de Carga"*.
- Azevedo, M. d. (1999). *"Gestão da Conservação de Pavimentos - As Técnicas de Reabilitação Estrutural dos Pavimentos"*. Centro Rodoviário Português (C.R.P). Lisboa.
- Branco, F., Pereira, P., & Picado Santos, L. (2008). *"Pavimentos Rodoviários"*. Edições Almedina. Coimbra
- Das, A. (2010). *"Interpretation of Falling Weight Deflectometer Data"*.
- Dias, C. H., & Dominguez, F. S. (2011). *"Auscultacion de las Características Estructurales de una Red de Carreteras con Equipo de Alto Rendimiento" - Curviâmetro MT. CONINFRA 2011 - 5º Congresso de Infraestruturas de Transportes. Brasil.*
- EP-JAE. (1995). *"Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional" (MACOPAV)*. EP - Estradas de Portugal.
- EP-JAE. (1995a). *"Manual de Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Flexíveis"*.
- EUROCONSULT, S. (2004). *"Structural Road Monitoring with Curviameter"*. Lisboa.
- Google, M. (2012). Obtido de Google Maps: <http://maps.google.com/>

- InIR. (2009). *"Diretivas para a Conceção de Pavimentos" - Critérios de Dimensionamento. Documento Base*. Lisboa: Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P.
- Interactive, P. (2008). *"Pavement Types"*. Obtido de <http://www.pavementinteractive.org/>
- Inteval. (2009). *"Aspectos Técnicos na Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários - Processos Construtivos nas Técnicas de Conservação e Reabilitação"*. Gestão Integral Rodoviária, SA. Lisboa.
- Jacinto, M. A. (2003). *"Caracterização Estrutural de Pavimentos"*. Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Jacinto, M., Ribeiro, J., & Azevedo, M. M. (2006). *"Caracterização Estrutural de Pavimentos Rodoviários - Correlação entre a Deflexão Máxima e a Espessura de Reforço"*. V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias.
- Minhoto, M. J. (2005). *"Consideração da Temperatura no Comportamento à reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis"*. Tese de Doutotamento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães.
- NCHRP. (2004). *"Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilittaded Pavement Structures"*. Part 2. Design Inputs. Chapter 5. Evaluation of Existing Pavements for Rehabilitation.
- Pais, J. (1999). *"Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis"*. Tese de Doutaramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães.
- Pais, J., Pereira, P., & Azevedo, M. D. (2000). *"A Reflexão de Fendas no dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis"*. A Qualidade Rodovária na Viragem do Século, 1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000, (pp. 627-637). Lisboa.
- Pais, J., Pereira, P., & Azevedo, M. d. (2000). *"Ensaio Mecânicos para Caracterização de Misturas Betuminosas"*. 1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000, (pp. 639-649). Lisboa.

- Pereira, P. A., & Freitas, E. F. (2001). "*Estudo da Evolução de Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis*". Revista engenharia Civil da Universidade do Minho, nº11. Guimarães, pp. 47-58.
- Pereira, P., & Miranda, V. (1999). "*Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*". Universidade do Minho. Braga.
- Pereira, P., & Miranda, V. (1999a). "*Gestão da Conservação de Pavimentos - Os métodos e programas de apoio à gestão dos pavimentos da rede rodoviária nacional*". Centro Rodoviário Português (C.R.P). Lisboa.
- Picado Santos, L. (1993). "*Método de Dimensionamento da SHELL para pavimentos Rodoviários Flexíveis*" (adaptação às condições portuguesas). Departamento de Engenharia civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra.
- Pinto, J. I. (2003). "*Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários*" . Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- SACR. (2012). Obtido de "*Societe D'Analyses et Controles Routiers*": [http://www.sacr.ch/fr/pdf.php?pdf=Resu\\_2008\\_LACROIX.pdf](http://www.sacr.ch/fr/pdf.php?pdf=Resu_2008_LACROIX.pdf)
- Santos, M. (2009). "*Dimensionamento de Camadas de Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*". Dissertação para a Obtenção do Graua de Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.
- SHELL. (1978). "*Shell pavement design manual - asphalt pavements and overlays for road traffic*". Shell International Petroleum Company Limited. Londres.
- SHELL. (1998). "*BISAR - User Manual*". Bitumen Business Group.
- SHELL. (1998a). "*SPDM - User Manual*". Bitumen Business Group.
- SINA, G. (2012). "*Non Distructive Technologies*"- Curviametre. Obtido de <http://www.gruppo-sina.it/main.asp?sezione=10&lingua=eng&soc=sineco&pag=menu&fam=Prodotti%20e%20servizi&livello=1>

Sousa, J., & Pais, J. (2002). "*Método de Dimensionamento de Reforços para Controlar a Reflexão de Fendas*". 2º Congresso Rodoviário Português - Estradas 2002, pp.281-294.

TNZ T/1. (1977). "Standard Test Procedure for Benkelman Beam Deflection Measurements TNZ T/1". Transit New Zealand.

Vicente, A. M. (2006). "*A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis*". Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.





## **ANEXOS**

**Anexo I – Dados dos ensaios *in-situ* com a Viga Benkelman (VB)**

**– Deflexões elásticas. Deflexões Características**

**Anexo II – Determinação da temperatura de projeto**

**– Retroanálise**

## **Anexo I**

As tabelas e figuras anexadas neste anexo referem-se aos dados obtidos do ensaio de auscultação e aos dados resultantes da análise que permitem obter as deflexões corrigidas para a ponta apalpadora, deflexões elásticas e as deflexões características.

Tabela I.1 – Deflexões *in situ* do trecho auscultado (Avenida Abade Baçal)

	Distância acumulada [m]	Degradações Visíveis	Hora	Dist. à bermas [m]	Temp <sup>a</sup> do ar [°C]	Temp <sup>a</sup> à sup. Pavimento [°C]	Deflexões [mm] nos pontos distanciados da VB de:								
							-1.0 [m]	0.00 [m]	0.25 [m]	0.50 [m]	1.00 [m]	2.50 [m]	3.70 [m]	5.00 [m]	
1°	725	Pete de crocodilo	15h00	0,63	16,70	18,20	0,05	0,20	0,18	0,15	0,14	0,11	0,10	0,09	
2°	775		15h07	0,83	15,70	20,60	0,01	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,06	0,04	
3°	825		15h13	0,50	16,80	19,70	0	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	
4°	1075		15h23	0,55	15,00	19,70	0,04	0,14	0,12	0,12	0,12	0,11	0,10	0,10	
5°	1225	Movimento de materiais (ex sudagão)	15h34	0,45	15,40	17,00	0,02	0,11	0,11	0,07	0,04	0	0	0	
6°	1275		Fenda Transversal	15h42	3,43	15,60	17,00	0,02	0,17	0,15	0,13	0,04	0,03	0,03	0,03
7°	1335		Fenda Ramificada (RODEIRAS)	15h50	3,66	15,50	17,00	0,20	0,35	0,22	0,18	0,10	0,09	0,09	0,09
8°	1395	Fenda Longitudinal (eixo)	16h03	3,38	15,60	17,00	0,01	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	
9°	1445		16h12	3,07	15,40	17,00	0,02	0,15	0,13	0,13	0,09	0,08	0,08	0,08	

Tabela I.2 – Deflexões corrigidas para a ponta apalpadora

Deflexões [mm] nos pontos distanciados da VB de:									
	-1.0 [m]	0.00 [m]	0.25 [m]	0.50 [m]	1.00 [m]	2.50 [m]	3.70 [m]	5.00 [m]	
1º	0,460115	0,761536	0,721347	0,661063	0,640968	0,580684	0,560589	0,540494	0,540494
2º	0,379737	0,580684	0,560589	0,540494	0,500305	0,480210	0,480210	0,440021	0,440021
3º	0,359642	0,580684	0,580684	0,560589	0,560589	0,540494	0,540494	0,540494	0,540494
4º	0,440021	0,640968	0,600778	0,600778	0,600778	0,580684	0,580684	0,560589	0,560589
5º	0,399831	0,580684	0,580684	0,500305	0,440021	0,359642	0,359642	0,359642	0,359642
6º	0,399831	0,701252	0,661063	0,620873	0,440021	0,419926	0,419926	0,419926	0,419926
7º	0,761536	1,062957	0,801726	0,721347	0,560589	0,540494	0,540494	0,540494	0,540494
8º	0,379737	0,600778	0,580684	0,560589	0,540494	0,500305	0,480210	0,460115	0,460115
9º	0,399831	0,661063	0,661063	0,620873	0,540494	0,540494	0,520400	0,520400	0,520400

Tabela I.3 – Deflexões elásticas

	Deflexões [m] nos pontos distanciados da VB de:									
	-1.0 [m]	0.00 [m]	0.25 [m]	0.50 [m]	1.00 [m]	2.50 [m]	3.70 [m]	5.00 [m]		
1º	-0,00008038	0,00022104	0,00018085	0,00012057	0,00010047	0,00004019	0,00002009	0,0000		
2º	-0,00006028	0,00014066	0,00012057	0,00010047	0,00006028	0,00004019	0,00004019	0,0000		
3º	-0,00018085	0,00004019	0,00004019	0,00002009	0,00002009	0,00000000	0,00000000	0,0000		
4º	-0,00012057	0,00008038	0,00004019	0,00004019	0,00004019	0,00002009	0,00000000	0,0000		
5º	0,00004019	0,00022104	0,00022104	0,00014066	0,00008038	0,00000000	0,00000000	0,0000		
6º	-0,00002009	0,00028133	0,00024114	0,00020095	0,00002009	0,00000000	0,00000000	0,0000		
7º	0,00022104	0,00052246	0,00026123	0,00018085	0,00002009	0,00000000	0,00000000	0,0000		
8º	-0,00008038	0,00014066	0,00012057	0,00010047	0,00008038	0,00004019	0,00002009	0,0000		
9º	-0,00012057	0,00014066	0,00014066	0,00010047	0,00002009	0,00000000	0,00000000	0,0000		

Tabela I.4 – Deflexões características

		Deflexões Características[m] elásticas																			
		Deflexões [m] nos pontos distanciados da VB de:																			
		0.00 [m]			0.25 [m]			0.50 [m]			1.00 [m]			2.50 [m]			3.70 [m]				
	Média	Desvio	Padrão	Deflexão Característica	Média	Desvio	Padrão	Deflexão Característica	Média	Desvio	Padrão	Deflexão Característica	Média	Desvio	Padrão	Deflexão Característica	Média	Desvio	Padrão	Deflexão Característica	
1º	Zona 1			0,0003396	9,06121E-05	0,0001387	7,05703E-05	0,000255	0,0001867	0,0001407	0,0000732	0,0000603	0,0002009	2,00947E-05	0,0000000	0,0000000	0,0000670	0,0000116	0,0000000	0,0000000	
2º	Zona 2			0,0001925	0,000103118	0,00016746	0,000110673	0,0003888	0,0002897	0,0001083	0,0000299	0,0000000	0,0000000	1,16017E-05	0,0000000	0,0000000	0,0000670	0,0000201	0,0000000	0,0000000	
3º	Zona 3			0,00026793	0,000220432	0,00017415	0,0000761	0,0003263	0,0002201	0,0001098	0,0000603	0,0000299	0,0000000	0,00004019	0,0000348	0,00004019	0,00002009	0,0000201	0,0000000	0,0000000	
4º																					
5º																					
6º																					
7º																					
8º																					

**Anexo II**

No presente anexo são apresentados os dados que permitem obter a temperatura de projeto. Também são referidos os módulos de deformabilidade, das três zonas de comportamento estrutural homogêneo, de cada camada do pavimento auscultado, resultante do processo de retroanálise, assim como, os valores dos deslocamentos obtidos, de cada zona homogênea, pelo BISAR da última iteração.

Tabela II.1 – Determinação da temperatura de projeto

	<b>Temperatura média do ar [°C] TMMA 2011</b>	<b>Fator de Ponderação Wf</b>
<b>Janeiro</b>	4	0,121416
<b>Fevereiro</b>	4	0,121416
<b>Março</b>	8	0,203899
<b>Abril</b>	14	0,443733
<b>Mai</b>	16	0,575031
<b>Junho</b>	18	0,745179
<b>Julho</b>	20	0,965672
<b>Agosto</b>	24	1,621690
<b>Setembro</b>	20	0,965672
<b>Outubro</b>	16	0,575031
<b>Novembro</b>	10	0,264231
<b>Dezembro</b>	4	0,121416
	Média	0,560
	TMAP	15,80
	Temperatura de projeto [°C]	23,50

Tabela II.2 – Resultados da retroanálise da zona de comportamento estrutural homogénea 1

Módulo de Deformabilidade [MPa]		Pontos Distanciados da Viga Benkelman [m]		Deflexões da Viga Benkelman [m]	Deslocamentos no BISAR [m]
Camada Betuminosa	6500	D1	0,00	0,0003152	0,0002944
12 cm		D2	0,25	0,0002550	0,0002629
Camada Granular	1800	D3	0,50	0,0001867	0,0002224
20 cm		D4	1,00	0,0001407	0,0001555
Solo de Fundação	73	D5	2,50	0,0000732	0,0000624
Semi- infinito		D6	3,70	0,0000603	0,0000402
		D7	5,00	0,0000	0,0000296
				RMS [%]	9,78

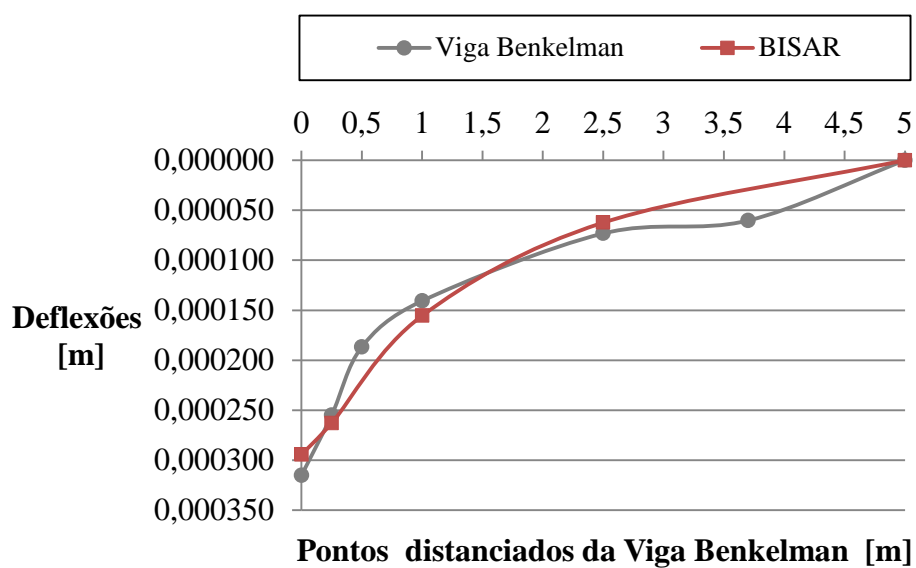


Figura II.1 – Comparação das deformadas (zona 1)

Tabela II.3– Correção do módulo de deformabilidade da camada betuminosa (zona 1)

Camada Betuminosa	T [°C]	ET [ Mpa]	E20 [ Mpa]	Tp [°C]	E <sub>TP</sub> [ Mpa]
	18,2	6500	6232,26	23,50	5568,526

Tabela II.4 – Resultados da retroanálise da zona de comportamento estrutural homogénea 2

Módulo de Deformabilidade [MPa]		Pontos Distanciados da Viga Benkelman [m]		Deflexões da Viga Benkelman [m]	Deslocamentos no BISAR [m]
Camada Betuminosa	5000	D1	0,00	0,0004005	0,00042630
12 cm		D2	0,25	0,0003888	0,00034000
Camada Granular	180	D3	0,50	0,0002897	0,00023580
20 cm		D4	1,00	0,0001083	0,00012410
Solo de Fundação	92	D5	2,50	0,0000299	0,00004712
Semi-infinito		D6	3,70	0,0000	0,00003191
		D7	5,00	0,0000	0,00002369
				RMS [%]	13,77

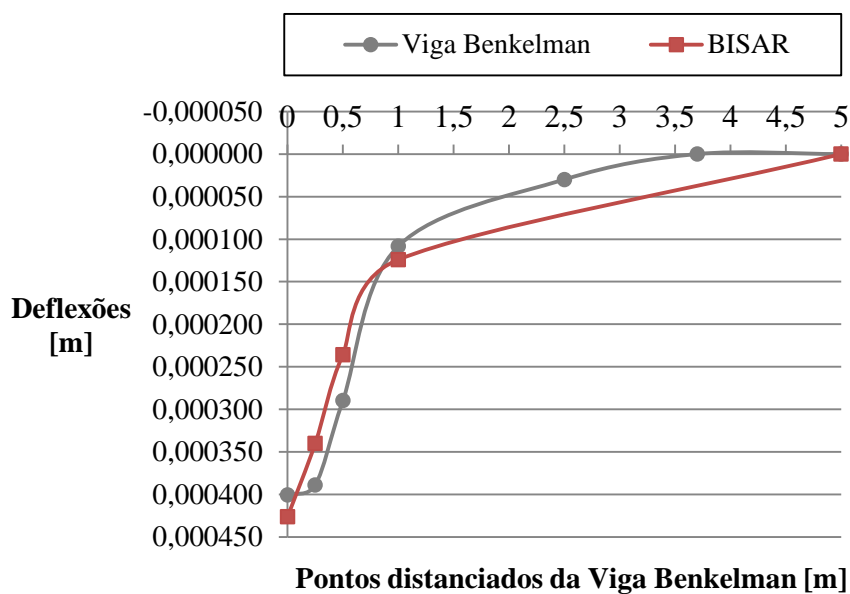


Figura II.2 – Comparação das deformadas (zona 2)

Tabela II.5 – Correção do módulo de deformabilidade da camada betuminosa (zona 2)

Camada Betuminosa	T [°C]	ET [ Mpa]	E20 [ Mpa]	Tp [°C]	E <sub>Tp</sub> [ Mpa]
	17	5000	4643,39	23,50	4148,867

Tabela II.6 – Resultados da retroanálise da zona de comportamento estrutural homogénea 3

Módulo de Deformabilidade [MPa]		Pontos Distanciados da Viga Benkelman [m]	Deflexões da Viga Benkelman [m]	Deslocamentos no BISAR [m]
Camada Betuminosa	595	D1	0,00	0,000708794
12 cm		D2	0,25	0,000326309
Camada Granular	180	D3	0,50	0,000220080
20 cm		D4	1,00	0,000109800
Solo de Fundação	91	D5	2,50	0,000060284
Semi-infinito		D6	3,70	0,000029902
		D7	5,00	0,0000
			RMS [%]	14,88

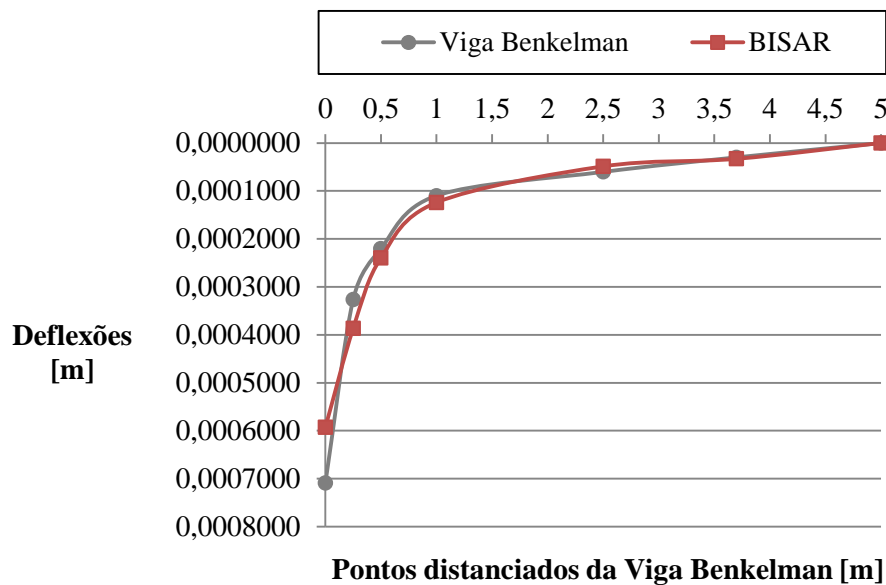


Figura II.3 – Comparação das deformadas (zona 3)

Tabela II.7 – Correção do módulo de deformabilidade da camada betuminosa (zona 3)

Camada Betuminosa	T [°C]	ET [ Mpa]	E20 [ Mpa]	Tp [°C]	E <sub>Tp</sub> [ Mpa]
	17	595	552,56	23,50	493,715