



**Susana Pato de Matos e Sá**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**Modelos de previsão de rodeiras em pavimentos rodoviários**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil Geotecnia

Orientador: Luís Quaresma, Professor Auxiliar Convidado,  
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Guerra

Arguente: Prof. Doutor Rui Micaelo

Vogal: Prof. Luís Quaresma



**Fevereiro 2014**



“Copyright” Susana Pato de Matos e Sá, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Dedicatória**

À memória do meu avô, pela ajuda constante, força e confiança sempre depositadas em mim.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador científico Professor Luís Quaresma pela disponibilidade, dedicação, amizade, incentivo e partilha de conhecimentos demonstrados e sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

À Instituição Estradas de Portugal pela disponibilização dos dados necessários para a elaboração desta dissertação de mestrado.

Ao Professor Rui Micaelo do DEC FCT-UNL pela ajuda prestada nas visitas realizadas às secções de estrada e pelo interesse demonstrado pelo tema.

A todos os meus amigos e colegas que me apoiaram, em particular gostaria de agradecer ao Vítor Antunes, à Rita Frade, ao Luís Rafael, à Ana Mafalda Romão, ao André Pereira, ao Rafael Wong, ao Daniel Pereira e ao João Serafim pela amizade e força permanentes.

Ao Jorge Pontes pela amizade e ajuda na partilha de conhecimentos e esclarecimento de dúvidas, os quais foram fundamentais para a realização de cadeiras mais complicadas.

Por fim, um profundo e especial agradecimento aos meus pais e à minha família, em particular à minha mãe, ao Pedro e ao meu avô por todo o apoio, esforço, incentivo, força, confiança e paciência que sempre demonstraram para comigo ao longo de toda a minha vida académica e pessoal.



# Modelos de previsão de rodeiras em pavimentos rodoviários

## Resumo

Os pavimentos rodoviários podem sofrer vários tipos de degradações e, quando atingem níveis de deterioração elevados, podem pôr em causa as condições de circulação. Para que seja possível monitorizar o estado dos pavimentos e intervir nos mesmos quando necessário, é essencial que se realize uma gestão eficiente das infraestruturas rodoviárias através do desenvolvimento de modelos de previsão de degradações.

Em Portugal, a gestão da rede nacional rodoviária é realizada através do Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP), atualmente suportado pela base de dados da Estradas de Portugal (EP). Essa base de dados contém informação sobre um número bastante significativo de secções. Alguns dos dados presentes nessa base foram fornecidos e serviram para desenvolver este trabalho.

A presente dissertação tem como principal objetivo estabelecer modelos de previsão de rodeiras de pavimentos ajustados à rede nacional rodoviária com base em modelos existentes, como é o caso do modelo HDM-4, desenvolvido pelo Banco Mundial.

Avaliou-se a forma como os parâmetros do modelo HDM-4 influenciam as rodeiras e inspecionaram-se alguns trechos de estrada presentes na base de dados fornecida pela EP para que os fenómenos que causam rodeiras fossem entendidos e caracterizados.

Para estabelecer modelos de previsão de rodeiras de uma forma correta, verificaram-se detalhadamente os dados de uma quantidade significativa de secções e introduziram-se os mesmos nos modelos HDM-4 e Austroads para prever rodeiras respetivamente em pavimentos com camadas betuminosas sobre camadas granulares e em pavimentos com tratamento superficial sobre camadas granulares. Procurou-se, ainda, verificar se existia um bom ajustamento com calibrações realizadas noutros países e elaborou-se uma calibração ajustada à rede nacional rodoviária.

Os resultados deste trabalho mostram que é possível estabelecer, para a rede nacional rodoviária, modelos com base no modelo HDM-4 para pavimentos do tipo AM (mistura betuminosa) com valores médios de rodeira na secção até 5,9 mm, sendo que a componente que mais contribui é a deformação estrutural sem fendilhamento e a que tem menos peso é a deformação estrutural fendilhada. Para valores de cavado de rodeira mais elevados, concluiu-se que o modelo HDM-4 não se ajusta bem, ou porque o efeito de alguns fatores considerados poderá não estar suficientemente bem expresso ou porque existem outros fatores que deveriam ser contabilizados no modelo, uma vez que são responsáveis pela origem de rodeiras com valores de cavado bastante significativos. A dificuldade em ajustar o modelo Austroads aos valores de rodeira medidos pela EP poderá resultar do problema de fiabilidade dos dados disponíveis relativos ao CBR da fundação, o que pode alterar significativamente o valor de SNC.

**Palavras-Chave:** Pavimentos Rodoviários, Cavado de Rodeira, Modelos de Previsão, Modelo HDM-4, Modelo Austroads, Calibração.



# Models for prediction of rut depth in road pavements

## Abstract

Road pavements can undergo several types of deteriorations that increase in extent and severity over time potentially compromising the traffic operating conditions. To be able to monitor the pavements condition repair deteriorations when necessary, it is essential to realize an efficient management of road infrastructure through the development of models for prediction of degradations.

In Portugal, the management of the national road network is accomplished through the Pavement Management System (PMS), currently supported by the database of National Road Administration (Estradas de Portugal). This database contains information on a large number of sections. The data of some of the sections present in the database were provided and served to develop the present work.

This dissertation intends to establish prediction models for rut depth adjusted to the national road network taking into account existing models such as HDM-4 model, developed by the World Bank.

The effect of the parameters of the HDM-4 model on the rut depth was evaluated and some stretches of road present in the database provided by EP were inspected so that the phenomena that cause rutting were understood and characterized.

To establish prediction models for rut depth in a correct way, data of a significant number of sections were verified in detail and were introduced in HDM-4 and Austroads models to predict rut depth respectively in pavements with bituminous layers on granular layers and pavements with surface treatment on granular layers. It was also attempted to verify whether there was a good fit with calibrations carried out in other countries and a calibration adjusted to the national road network was developed.

The results of the present work show that it is possible to establish, for the national road network, models based on HDM-4 for pavements type AM (asphaltic mix) with rut depth average values for the entire section up to 5.9 mm. The component that contributes most is the structural deformation without cracking and the component that has less weight is the structural deformation with cracking. For higher values of rut depth, it was concluded that the HDM-4 model does not fit well, either because the effect of some factors considered cannot be expressed well enough, or because there are other factors which should be accounted for in the model, since they are responsible for quite significant values of rut depth. Difficulties in adjusting the Austroads model to rut values measured by the EP may result from a lack of reliability of available data on foundation CBR, which can significantly affect the value of SNC.

**Keywords:** Road Pavements, Rut Depth, Prediction Models, HDM-4 Model, Austroads Model, Calibration.



# Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objetivos e estruturação do trabalho .....	4
1.3.	Organização.....	5
2.	Métodos de Avaliação de Rodeiras .....	7
2.1.	Equipamentos .....	7
2.1.1.	Equipamentos de referência geométrica simples.....	7
2.1.2.	Equipamentos de tecnologia laser e ultrassons.....	10
2.2.	Interpretação de perfis medidos.....	12
2.3.	Comparação entre métodos de avaliação num perfil transversal.....	13
2.3.1.	Comparação entre os dois tipos de equipamentos .....	13
2.3.2.	Harmonização dos diferentes tipos de perfilómetros .....	14
2.4.	Avaliação das medições num trecho .....	15
2.4.1.	Identificação de secções homogéneas .....	15
2.4.2.	Distribuição estatística dos cavados de rodeira .....	17
3.	Modelos de Previsão de Rodeiras em Pavimentos Rodoviários.....	19
3.1.	Tipos de modelos.....	19
3.2.	Modelo HDM-4 do Banco Mundial .....	21
3.3.	Modelo Austroads .....	27
3.4.	Calibrações existentes .....	30
4.	Metodologia Adotada.....	33
4.1.	Base de dados do Sistema de Gestão de Pavimentos da EP .....	33
4.1.1.	Introdução.....	33
4.1.2.	Modelo da rede.....	33
4.1.3.	Dados incluídos na base de dados .....	34
4.1.4.	Levantamento dos parâmetros de estado do pavimento .....	35
4.1.5.	Algoritmo utilizado pela EP .....	37
4.2.	Metodologia adotada para a fenomenologia.....	38
4.3.	Metodologia adotada para a elaboração de modelos de previsão.....	38
5.	Fenomenologia da Formação de Rodeiras na Rede Nacional Rodoviária .....	39

5.1.	Avaliação da variação dos parâmetros utilizados no modelo HDM-4 .....	39
5.1.1.	Número estrutural modificado do pavimento (SNC) .....	39
5.1.2.	Tráfego .....	41
5.1.3.	Temperatura.....	43
5.1.4.	Teor em água .....	45
5.1.5.	Tipo de betume .....	49
5.1.6.	Compactação relativa .....	51
5.1.7.	Fendilhamento .....	52
5.2.	Secções avaliadas .....	53
5.2.1.	Dados fornecidos pela EP.....	54
5.2.2.	Homogeneidade.....	54
5.2.3.	Tipo de distribuição.....	61
5.3.	Inspeções visuais .....	66
5.3.1.	Aspetos observados .....	68
5.3.2.	Conclusões.....	75
6.	Modelos de Previsão de Rodeiras para a Rede Nacional Rodoviária.....	77
6.1.	Informação disponível.....	77
6.2.	Critérios de seleção das secções .....	78
6.3.	Validação dos dados fornecidos pela EP.....	79
6.3.1.	Trechos escolhidos .....	80
6.3.2.	Relações encontradas entre SNC e $N_{80Y}$ .....	83
6.3.3.	Relação entre fendilhamento e rodeiras .....	89
6.4.	Aplicação dos dados em modelos existentes.....	91
6.4.1.	Notas importantes.....	91
6.4.2.	Resultados do HDM-4 original para os trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa).....	92
6.4.3.	Resultados do Austroads original para os trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial) .....	93
6.5.	Resultados de calibrações existentes .....	94
6.5.1.	Modelo HDM-4 Chileno .....	94
6.5.2.	Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória .....	95
6.5.3.	Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia.....	96
6.5.4.	Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia.....	96

6.5.5.	Modelo HDM-4 Sul-Africano .....	97
6.5.6.	Modelo HDM-4 Indiano.....	98
6.5.7.	Conclusões.....	99
6.6.	Calibrações realizadas .....	99
6.6.1.	Avaliação de rodeiras por parcelas usando o modelo HDM-4.....	99
6.6.2.	Calibração realizada para a totalidade dos trechos .....	101
6.6.3.	Calibração realizada para os trechos com rodeiras até 5,9 mm.....	103
6.6.4.	Calibração realizada para os trechos com rodeiras superiores a 5,9 mm .....	105
7.	Considerações Finais.....	107
7.1.	Conclusões.....	107
7.2.	Trabalhos futuros.....	110
	Referências Bibliográficas .....	111
	Anexo A – Cálculo do Fendilhamento no Modelo HDM-4.....	115
	Anexo B – Cálculo do Número Estrutural Modificado do Pavimento (SNC) .....	123
	Anexo C – Valores Médios de Cavado de Rodeira e Desvio Padrão.....	127
	Anexo D – Valores de SNC e $N_{80Y}$ dos Trechos Escolhidos.....	131
	Anexo E – Fendilhamento Existente nos Trechos Escolhidos .....	135
	Anexo F – Valores Médios de Cavado de Rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 original .....	137
	Anexo G – Valores Médios de Cavado de Rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo Austroads original .....	139
	Anexo H – Valores Médios de Cavado de Rodeira medidos pela EP e os obtidos com a utilização de Calibrações .....	141
	Anexo I – Valores Médios de Cavado de Rodeira medidos pela EP e os obtidos com as Calibrações Realizadas.....	153







## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Representação esquemática das rodeiras de pequeno raio (à esquerda) e das rodeiras de grande raio (à direita) (Santucci, 2001).....	2
Figura 1.2 - Cavado de rodeira.....	2
Figura 1.3 – Avaliação das deformações observadas nos países convidados (COST, 1999).....	3
Figura 2.1 – Medição de rodeira com régua (Bennett e Wang, 2002) .....	7
Figura 2.2 – Utilização de régua de diferentes comprimentos em rodeiras de pequeno raio (N. D. Lea International Ltd, 1995).....	8
Figura 2.3 – Utilização de régua de diferentes comprimentos em rodeiras de grande raio (N. D. Lea International Ltd, 1995).....	8
Figura 2.4 – Relação encontrada entre uma régua de 1,2 m e uma régua de 2 m (N. D. Lea International Ltd, 1995).....	9
Figura 2.5 - Perfilómetro laser (Fontul, 2005) .....	10
Figura 2.6 - Equipamento multifunções (Fontul, 2005) .....	10
Figura 2.7 - Equipamento PALAS (Pereira e Miranda, 1999) .....	11
Figura 2.8 - Perfil transversal observado com o equipamento PALAS (Branco, <i>et al.</i> , 2011) .....	11
Figura 2.9 - Posicionamento dos sensores de um perfilómetro laser (Bennett e Wang, 2002).....	11
Figura 2.10 - Demonstração da determinação do valor do cavado de rodeira com o modelo do fio (Bennett e Wang, 2002).....	12
Figura 2.11 - Definição de pseudo-rodeiras (Bennett e Wang, 2002).....	12
Figura 2.12 - Implicações da escolha do método de medição da profundidade das rodeiras (Bennett e Wang, 2002) .....	13
Figura 2.13 - Transversoperfilógrafo (TPB) desenvolvido pela DCL (Bennett e Wang, 2002) .....	15
Figura 2.14 – Representação gráfica dos valores de cavado de rodeira medidos (Fridtjof, 2004).....	16
Figura 2.15 – Representação gráfica dos valores acumulados de cavado de rodeira (Fridtjof, 2004) ..	16
Figura 2.16 – Diferentes tipos de distribuição dos cavados de rodeira ao longo do período de vida útil de um pavimento (N. D. Lea International Ltd, 1995).....	18
Figura 3.1 - Fluxograma do modelo de rodeiras HDM-4 (Theyse, 2008).....	26
Figura 4.1 – Modelo da rede adotado pela EP - adaptado de (Morgado, 2011).....	34
Figura 4.2 – Viatura (à esquerda) e equipamento VIZIROAD com GPS associado (à direita) utilizados nas inspeções visuais (Santinho Horta, <i>et al.</i> , 2013) .....	36
Figura 4.3 – Perfilómetro laser utilizado nas inspeções mecânicas (à esquerda) e equipamento do operador (à direita) (Santinho Horta, <i>et al.</i> , 2013) .....	36
Figura 4.4 – Perfilómetro Laser da EP (Luz, 2011) .....	36
Figura 4.5 – Transição entre inspeções visuais e mecânicas no período compreendido entre 2009 e 2012 (Santinho Horta, <i>et al.</i> , 2013).....	37
Figura 4.6 – Exemplificação dos dois tipos de rodeira (esquerda e direita) fornecidos pela EP (Ramboll, 2010) .....	38
Figura 5.1 – Influência da variação da capacidade estrutural do pavimento (SNC) na profundidade média da rodeira (RDM) .....	40

Figura 5.2 – Influência da variação do tráfego (YE4) na profundidade média da rodeira (RDM) .....	42
Figura 5.3 – Temperatura de serviço de camadas betuminosas (Branco, <i>et al.</i> , 2011) .....	43
Figura 5.4 – Temperaturas médias anuais (IPMA, 2013).....	44
Figura 5.5 – Influência da variação da temperatura do pavimento (PT) na profundidade média da rodeira (RDM).....	45
Figura 5.6 – Precipitações acumuladas anuais (IPMA, 2013).....	46
Figura 5.7 – Influência da variação da precipitação (MMP) na profundidade média da rodeira (RDM).....	46
Figura 5.8 – Influência da variação da eficiência do sistema de drenagem e do tempo a que o pavimento está exposto à precipitação na profundidade média da rodeira (RDM).....	48
Figura 5.9 – Influência da variação da profundidade do nível freático na profundidade média da rodeira (RDM).....	49
Figura 5.10 – Influência do tipo de betume na profundidade média da rodeira (RDM) .....	51
Figura 5.11 – Influência da variação da compactação relativa na profundidade média da rodeira (RDM) .....	52
Figura 5.12 – Influência do fendilhamento na profundidade média da rodeira (RDM).....	53
Figura 5.13 – Homogeneidade da secção E527.....	55
Figura 5.14 – Homogeneidade da secção E556.....	56
Figura 5.15 – Homogeneidade da secção E749.....	56
Figura 5.16 – Homogeneidade da secção E211.....	57
Figura 5.17 – Homogeneidade da secção E237.....	57
Figura 5.18 – Homogeneidade de secção E428.....	58
Figura 5.19 – Homogeneidade da secção E708.....	58
Figura 5.20 – Comparação entre o valor médio de cavado de rodeira (RDM) e o desvio padrão (RDS) medidos pela EP.....	60
Figura 5.21 – Comparação entre o valor médio de cavado de rodeira (RDM) e o desvio padrão (RDS) obtidos pelo HDM-4.....	60
Figura 5.22 – Comparação entre o valor médio de cavado de rodeira (RDM) e o desvio padrão (RDS) das subsecções homogéneas .....	61
Figura 5.23 – Gráfico Q-Q com os valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-A.....	62
Figura 5.24 – Gráfico Q-Q com os valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-B .....	62
Figura 5.25 – Gráfico Q-Q com os valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-C.....	62
Figura 5.26 – Alguns desvios da linha de normalidade (Gerstman, 2008) .....	63
Figura 5.27 – Gráfico Q-Q com o logaritmo neperiano (ln) dos valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-A .....	64
Figura 5.28 – Gráfico Q-Q com o logaritmo neperiano (ln) dos valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-B .....	64
Figura 5.29 – Gráfico Q-Q com o logaritmo neperiano (ln) dos valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-C .....	64

Figura 5.30 – Representação gráfica dos valores de profundidade de rodeira medidos na subsecção E237-A .....	65
Figura 5.31 – Representação gráfica dos valores de profundidade de rodeira medidos na subsecção E237-B .....	65
Figura 5.32 – Representação gráfica dos valores de profundidade de rodeira medidos na subsecção E237-C .....	66
Figura 5.33 – Representação gráfica do cavado de rodeira, do bordo direito e do bordo esquerdo, e do fendilhamento medidos e observados ao longo da secção E556 .....	67
Figura 5.34 – Representação gráfica do cavado de rodeira, do bordo direito e do bordo esquerdo, e do fendilhamento medidos e observados ao longo da secção E237 .....	67
Figura 5.35 – Representação gráfica do cavado de rodeira, do bordo direito e do bordo esquerdo, e do fendilhamento medidos e observados ao longo da secção E428 .....	68
Figura 5.36 – Fendas ramificadas (à esquerda) e pele de crocodilo (à direita) .....	69
Figura 5.37 – Zona de acumulação de água e bermas em mau estado .....	69
Figura 5.38 – Zona de escavação .....	69
Figura 5.39 – Bermas revestidas (à esquerda) e reparações (à direita) .....	70
Figura 5.40 – Valetas não revestidas .....	70
Figura 5.41 – Valetas revestidas .....	70
Figura 5.42 – Subsecção de estrada sem sinais de fendilhamento .....	71
Figura 5.43 – Inexistência de valetas (à esquerda) e bermas em mau estado (à direita) .....	71
Figura 5.44 – Semáforos (à esquerda) e sinalização de controlo e limite de velocidade (à direita) .....	72
Figura 5.45 – Tráfego intenso .....	72
Figura 5.46 – Camada de desgaste constituída por agregado rolado (à esquerda) e camada de desgaste constituída por agregado britado (à direita) .....	72
Figura 5.47 – Rodeira observada junto à berma na camada de desgaste constituída por agregado rolado (à esquerda) e rodeira observada junto ao eixo da faixa de rodagem na camada de desgaste constituída por agregado rolado (à direita) .....	73
Figura 5.48 – Rodeira observada junto ao eixo da faixa de rodagem na camada de desgaste constituída por agregado britado .....	73
Figura 5.49 – Exsudação de betume .....	74
Figura 5.50 – Empolamento causado pelas raízes das árvores .....	74
Figura 5.51 – Fendilhamento de gravidade 2 (à esquerda) e fendilhamento de gravidade 3 (à direita) .....	75
Figura 5.52 – Rodeira provocada pelo fendilhamento de gravidade 3 (pele de crocodilo) .....	75
Figura 6.1 – Representação gráfica da gravidade das rodeiras nos trechos de 10 m da base de dados da EP .....	77
Figura 6.2 – Representação gráfica da gravidade das rodeiras médias nas secções da base de dados da EP .....	78
Figura 6.3 – Mapa de Portugal Continental com a localização das 56 secções escolhidas .....	79
Figura 6.4 – Delimitação das regiões com base nas precipitações acumuladas anuais (Silva, 2012) ...	84

Figura 6.5 – Relações entre SNC e $N_{80Y}$ dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) .....	87
Figura 6.6 – Densificação inicial, $R_0$ , versus número estrutural modificado do pavimento, SNC (Hickson, 2010).....	88
Figura 6.7 – Relação linear entre SNC e $N_{80Y}$ dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial).....	89
Figura 6.8 – Relação logarítmica entre SNC e $N_{80Y}$ dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial).....	89
Figura 6.9 – Representação gráfica do fendilhamento existente nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta.....	90
Figura 6.10 – Representação gráfica do fendilhamento existente nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia .....	90
Figura 6.11 – Representação gráfica do fendilhamento existente nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa.....	90
Figura 6.12 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 original dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa).....	92
Figura 6.13 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo Austroads original dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial) .....	93
Figura 6.14 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Chileno dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa).....	94
Figura 6.15 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) .....	95
Figura 6.16 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) .....	96
Figura 6.17 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa).....	97
Figura 6.18 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Sul-Africano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) .....	97
Figura 6.19 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Indiano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa).....	98
Figura 6.20 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 calibrado da totalidade dos trechos .....	102
Figura 6.21 – Representação gráfica do peso de cada uma das componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira da totalidade dos trechos .....	102
Figura 6.22 – Comparação das correlações usando um ponto de transição em valores medidos de 5,9 mm.....	103
Figura 6.23 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 calibrado dos trechos com rodeiras até 5,9 mm .....	104
Figura 6.24 – Representação gráfica do peso de cada uma das parcelas que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras até 5,9 mm .....	104

## Índice de Quadros

Quadro 1.1 – Significado dos valores utilizados para avaliar o comportamento de pavimentos rodoviários (COST, 1999).....	3
Quadro 2.1 - Diferentes medidas encontradas para a régua metálica utilizada para medir rodeiras .....	7
Quadro 3.1 – Classificação dos modelos de comportamento (Branco, <i>et al.</i> , 2011).....	19
Quadro 3.2 – Classificação do modelo HDM-4 .....	21
Quadro 3.3 – Classificação do modelo Austroads criado para prever rodeiras em pavimentos com tratamento superficial sobre camadas granulares .....	21
Quadro 3.4 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo da densificação inicial (Theyse, 2008).....	22
Quadro 3.5 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual da deformação estrutural (Theyse, 2008).....	23
Quadro 3.6 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual da deformação plástica quando as propriedades do ligante são desconhecidas (Theyse, 2008).....	23
Quadro 3.7 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual da deformação plástica quando as propriedades do ligante são conhecidas (Theyse, 2008) .....	24
Quadro 3.8 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo da redução anual do valor dos vazios da mistura (Theyse, 2008) .....	24
Quadro 3.9 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual de SP (Theyse, 2008).....	25
Quadro 3.10 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual do desvio-padrão da profundidade média da rodeira (Theyse, 2008).....	25
Quadro 3.11 – Níveis de rodeira imediatamente após a aplicação de tratamentos (N. D. Lea International Ltd, 1995).....	27
Quadro 3.12 – Diferentes Tipos de Clima existentes com os respectivos Índices de Humidade de <i>Thornthwaite</i> (Thornthwaite, 1948) .....	29
Quadro 3.13 - Custos anuais típicos de manutenções de rotina (Hickson, 2010) .....	29
Quadro 3.14 - Custos típicos de tratamentos superficiais e de manutenções periódicas (Hickson, 2010).....	29
Quadro 3.15 – Coeficientes de calibração adotados pelo Chile (De Solminhac, <i>et al.</i> , 2004).....	30
Quadro 3.16 – Coeficientes de calibração adotados pela Austroads (Hickson, 2008).....	31

Quadro 3.17 – Coeficientes de calibração adotados pela África do Sul (Rohde, <i>et al.</i> , 1998).....	31
Quadro 3.18 – Coeficientes de calibração adotados pela Índia (Thube, 2011) .....	32
Quadro 4.1 – Dados propostos para descrição do estado do pavimento (EP, 2009a) .....	34
Quadro 4.2 – Degradações e níveis de gravidade para os pavimentos flexíveis (EP, 2009a) .....	35
Quadro 5.1 – Características do pavimento considerado .....	39
Quadro 5.2 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação do SNC.....	40
Quadro 5.3 – Classes de tráfego e fatores de agressividade do tráfego no MACOPAV (JAE, 1995) ..	41
Quadro 5.4 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação do tráfego .....	42
Quadro 5.5 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação da temperatura.....	44
Quadro 5.6 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação da precipitação .....	46
Quadro 5.7 – Descrição das 4 situações consideradas .....	47
Quadro 5.8 – Parâmetros utilizados nas 4 situações.....	47
Quadro 5.9 – Valores estimados de CBR (N. D. Lea International Ltd, 1995).....	48
Quadro 5.10 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação da profundidade do nível freático .....	49
Quadro 5.11 – Propriedades tabeladas dos dois tipos de betume considerados .....	50
Quadro 5.12 – Propriedades calculadas dos tipos de betume considerados .....	50
Quadro 5.13 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação do tipo de betume .....	51
Quadro 5.14 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação da compactação relativa .....	52
Quadro 5.15 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação do fendilhamento.....	53
Quadro 5.16 – Lista das 7 secções visitadas.....	54
Quadro 5.17 – Intervalos adotados para as 7 secções visitadas.....	55
Quadro 5.18 – Definição das 3 subsecções homogéneas da secção E527 .....	56
Quadro 5.19 – Definição das 6 subsecções homogéneas da secção E556 .....	59
Quadro 5.20 – Definição das 6 subsecções homogéneas da secção E749 .....	59
Quadro 5.21 – Definição das 3 subsecções homogéneas da secção E211 .....	59
Quadro 5.22 – Definição das 3 subsecções homogéneas da secção E237 .....	59
Quadro 5.23 – Definição das 9 subsecções homogéneas da secção E428 .....	59
Quadro 5.24 – Definição das 5 subsecções homogéneas da secção E708 .....	60

Quadro 5.25 – Fatores responsáveis pela origem de rodeiras nas secções inspeccionadas .....	76
Quadro 6.1 – Níveis de gravidade de rodeiras adotados para trechos de 10 m – adaptado de (EP, 2009a).....	77
Quadro 6.2 – Níveis de gravidade de rodeiras adotados para o comprimento total da secção.....	78
Quadro 6.3 – Lista dos 50 trechos de gravidade alta.....	80
Quadro 6.4 – Lista dos 50 trechos de gravidade alta (continuação).....	81
Quadro 6.5 - Lista dos 19 trechos de gravidade intermédia .....	82
Quadro 6.6 – Lista dos 22 trechos de gravidade baixa.....	83
Quadro 6.7 – Coeficientes estruturais propostos pela AASHTO para camadas de misturas betuminosas existentes (AASHTO, 1993) .....	84
Quadro 6.8 – Coeficientes de drenagem consoante a região do país (Silva, 2012).....	85
Quadro 6.9 – Valores de R recomendados (AASHTO, 1993) .....	86
Quadro 6.10 – Valores típicos de $S_0$ (AASHTO, 1993).....	86
Quadro 6.11 – Secções excluídas devido ao fendilhamento .....	91
Quadro 6.12 – Diferentes Tipos de Clima existentes em Portugal Continental com os respetivos Índices de Humidade de <i>Thornthwaite</i> .....	92
Quadro 6.13 – Valores das componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras de gravidade alta.....	100
Quadro 6.14 – Valores das componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras de gravidade intermédia.....	101
Quadro 6.15 – Valores das componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras de gravidade baixa .....	101
Quadro 6.16 – Coeficientes obtidos com o Lab Fit Curve considerando a totalidade dos trechos .....	102
Quadro 6.17 – Coeficientes obtidos com o Lab Fit Curve considerando os trechos com rodeiras até 5,9 mm.....	104
Quadro 6.18 – Coeficientes obtidos com o Labfit considerando os trechos com rodeiras superiores a 5,9 mm.....	105



## Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

### Abreviaturas e Siglas

AASHO – American Association of State Highway Officials

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AC – Betão betuminoso (*Asphalt concrete*)

AM – Mistura betuminosa (*Asphaltic mix*)

AMGB – Mistura betuminosa sobre base granular (*Asphalt mix & granular base*)

BD – Betão betuminoso em camada de desgaste

CBR – Índice Californiano de capacidade de carga (*California Bearing Ratio*)

CM – Mistura betuminosa a frio (*Cold Mix*)

DCL – Data Collection Ltd.

DS – Revestimento superficial duplo (*Double Seal*)

DSSAMI – Revestimento superficial duplo com membrana anti fissura (*Double Seal with Strain Alleviating Membrane*)

DSSR – Revestimento superficial duplo com betume modificado com granulado de borracha (*Double Seal with Scrap Rubber*)

EP – Estradas de Portugal

FWD – Defletómetro de impacto (*Falling Weight Deflectometer*)

GB – Base granular (*Granular base*)

GCF – Fator de calibração global para estradas interurbanas (*Global calibration factor for rural roads*)

GS – Revestimento com pré-aplicação de geotêxtil (*Geotextil Seal*)

HDM – Highway Design and Maintenance Standards Model

HRD – Harmonisation of Rut Depth Software

IP – Índice de Plasticidade

IQ – Índice de Qualidade

IRI – Índice de Irregularidade Longitudinal (*International Roughness Index*)

JAЕ – Junta Autónoma de Estradas

kip – 1000 libras força (*kilopound*)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Log-normal – Distribuição estatística log-normal, cujo logaritmo tem distribuição normal

MACF – Fator de calibração médio para terrenos montanhosos (*Mountainous terrain average calibration factor*)

MACOPAV – Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Nacional Rodoviária

Max – Máximo

MB – Macadame betuminoso

MESALs – Milhão de passagens de um eixo-padrão (*Million of Equivalent Standard Axle Road*)

MMP – Precipitação média mensal (*Mean Monthly Precipitation*)

PACF – Fator de calibração médio para terrenos planos (*Plain terrain average calibration factor*)

PSI – Índice de Aptidão de Serviço (*Present Serviceability Index*)

psi – Libra força por polegada quadrada (*Pound force per Square Inch*)

Q-Q – Gráficos do tipo Quantil-Quantil

RACF – Fator de calibração médio para terrenos ondulados (*Rolling terrain average calibration factor*)

SbG – Material britado de granulometria extensa em camada de sub-base

SCRIM – *Sideway Coefficient Resistance Investigation Machine*

SGP – Sistema de Gestão de Pavimentos

SGPav – Sistema de Gestão de Conservação de Pavimentos das Estradas de Portugal

SS – Revestimento superficial simples (*Single Seal*)

SSPMB – Revestimento superficial simples com betume modificado com polímeros (*Single Seal with Polymer modified Binder*)

SSSC – Revestimento superficial simples com dupla aplicação de agregado (*Single Seal with Surface Correction*)

SSSR – Revestimento superficial simples com betume modificado com granulado de borracha (*Single Seal with Scrap Rubber*)

ST – Tratamento superficial (*Surface Treatment*)

TMDA – Tráfego Médio Diário Anual

TMDA<sub>p</sub> – Tráfego Médio Diário Anual de Veículos Pesados

TPB – Transversoperfilógrafo (*Transverse Profile Beam*)

## **Símbolos**

a – Coeficiente estrutural

ACA – Área de fendilhamento total

ACA<sub>a</sub> – Área de fendilhamento total no início do ano em análise

ACA<sub>b</sub> – Área de fendilhamento total no final do ano em análise

ACA<sub>i</sub> – Área de fendilhamento total no início do período de previsão de fendilhamento

ACW – Área de fendilhamento aberto

ACW<sub>a</sub> – Área de fendilhamento aberto no início do ano em análise

ACW<sub>b</sub> – Área de fendilhamento aberto no final do ano em análise

ACW<sub>i</sub> – Área de fendilhamento aberto no início do período de previsão de fendilhamento

ACX – Área de fendilhamento prevista pelos modelos HDM

AGE<sub>1</sub> – Tempo que decorreu desde a construção ou última reabilitação do pavimento

AGE<sub>2</sub> – Tempo que decorreu desde a colocação de uma nova camada de desgaste

AGE<sub>3</sub> – Tempo que decorreu desde a última reabilitação

AGE<sub>4</sub> – Tempo que decorreu desde a última reconstrução ou construção nova

a<sub>i</sub> – Coeficiente estrutural da camada i

a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub> e a<sub>4</sub> – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4

C – Fator de crescimento do tráfego

CDS – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento

COMP – Índice de compactação relativa do pavimento

CRP – Atraso da progressão do fendilhamento

CRT – Tempo que levou ao atraso do fendilhamento devido à execução de reparações

C<sub>t</sub> – Área com fendilhamento no final do ano t

c<sub>1a</sub> – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4

c<sub>1w</sub> – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento aberto no modelo HDM-4

d – Coeficiente de drenagem

dACA – Incremento anual da área de fendilhamento total

dACW – Incremento anual da área de fendilhamento aberto

DEF – Deflexão média anual da viga de Benkelman

$d_i$  – Coeficiente de drenagem da camada  $i$

$H_i$  – Espessura da camada  $i$

$HS$  – Espessura da camada betuminosa

$ICA$  – Tempo para o início do fendilhamento total

$ICW$  – Tempo para o início do fendilhamento aberto

$IQ_t$  – Índice de qualidade no final do ano  $t$

$K$  – Coeficiente de calibração global para a progressão da rodeira

$k$  – Coeficiente de calibração

$K_{cia}$  – Coeficiente de calibração para o tempo para o início do fendilhamento

$K_{cpa}$  – Coeficiente de calibração para o tempo para a área do fendilhamento total

$K_{cpw}$  – Coeficiente de calibração para o tempo para a área do fendilhamento aberto

$K_{rds}$  – Coeficiente de calibração do desvio padrão da profundidade da rodeira

$K_{rid}$  – Coeficiente de calibração para a densificação inicial

$K_{rpd}$  – Coeficiente de calibração para a deformação plástica

$K_{rst}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural

$K_{rst (crk)}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural com fendilhamento

$K_{rst (uc)}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural sem fendilhamento

$me$  – Despesa anual de manutenção do pavimento

$MEAS$  – Valor do cavado de rodeira medido com o perfilómetro laser, usando o algoritmo da régua de 2 m

$Mr$  – Módulo resiliente efetivo para a fundação

$N_{80t}$  – Número acumulado de passagens de um eixo-padrão de 80 kN por via, durante um período  $t$

$N_{80Y}$  – Número de passagens por ano de um eixo-padrão de 80 kN

$p$  – Período de dimensionamento

$(pen_{25})_i$  – Penetração inicial a 25°C no betume (0,1 mm)

$(pen_{25})_r$  – Penetração a 25°C no betume recuperado de misturas betuminosas após aplicação (0,1 mm)

$p_i$  – Nível de serviço inicial

$PT$  – Temperatura do pavimento a 20 mm de profundidade

$P_t$  – Área de zonas reparadas no final do ano  $t$

$p_t$  – Nível de serviço final

RD – Cavado de rodeira

RDM – Profundidade média da rodeira de ambos os lados da via

RDM<sub>a</sub> – Profundidade média da rodeira no início do ano em análise

RDM<sub>b</sub> – Profundidade média da rodeira no final do ano em análise

RDM<sub>i</sub> – Profundidade média da rodeira no início do período de previsão de rodeira

RDM<sub>2,0</sub> – Profundidade da rodeira usando uma régua de 2 m de comprimento

RDM<sub>1,2</sub> – Profundidade da rodeira usando uma régua de 1,2 m de comprimento

RDPD – Cavado de rodeira por deformação plástica

RDS<sub>a</sub> – Desvio padrão da profundidade da rodeira no início do ano em análise

RDS<sub>b</sub> – Desvio padrão da profundidade da rodeira no final do ano em análise

RDST<sub>crk</sub> – Cavado de rodeira estrutural com fendilhamento

RDST<sub>uc</sub> – Cavado de rodeira estrutural sem fendilhamento

RD0 – Cavado de rodeira por densificação inicial

R<sub>t</sub> – Profundidade média das rodeiras no final do ano t

rut – Profundidade da rodeira em pavimentos com tratamento superficial sobre camadas granulares

R<sub>0</sub> – Profundidade da rodeira inicial após a densificação do primeiro ano

SCA – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4

SCW – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento aberto no modelo HDM-4

SN – Número estrutural

SNC – Número estrutural modificado

Sh – Velocidade dos veículos pesados

SNSG – Contribuição estrutural da fundação

SP – Temperatura de amolecimento

SP<sub>a</sub> – Temperatura de amolecimento no início do ano em análise

SP<sub>b</sub> – Temperatura de amolecimento no final do ano em análise

S<sub>t</sub> – Área com desagregação superficial de materiais (covas e peladas) no final do ano t

S<sub>0</sub> – Desvio padrão que atende ao efeito dos erros na previsão do tráfego e na previsão do desempenho

t – Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado

T<sub>ar</sub> – Temperatura do ar

$(T_{ab})_r$  – Temperatura de amolecimento do betume recuperado de misturas betuminosas após aplicação

$TI_i$  – Índice de humidade de *Thornthwaite*, no tempo  $i$

VIM – Vazios na mistura

$VIM_a$  – Vazios na mistura no início do ano em análise

$VIM_b$  – Vazios na mistura no final do ano em análise

$W_{18}$  – Número equivalente de eixos-padrão de 18 kip=18000 lb (cerca de 80 kN)

$\bar{x}$  – Valor da média do cavado de rodeira observado na secção de estrada analisada

$x_i$  – Valor do cavado de rodeira no local  $i$

$Y_A$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4

$Y_w$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento aberto no modelo HDM-4

YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM

$z_A$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4

$z_w$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento aberto no modelo HDM-4

$z_i$  – Valor acumulado da diferença entre a medição no local  $i$  e a deflexão média

$Z_r$  – Valor padronizado

$\alpha$  – Fator de agressividade do tráfego

$\Delta ACX$  – Variação prevista da área fendilhada

$\Delta ACX'$  – Máximo entre ( $\Delta ACX$ , 0)

$\Delta RDM$  – Aumento gradual da profundidade média total da rodeira

$\Delta RDPD$  – Aumento anual da deformação plástica

$\Delta RDS$  – Aumento anual do desvio padrão da profundidade média da rodeira

$\Delta RDST$  – Aumento anual da deformação estrutural

$\Delta rut$  – Aumento gradual da profundidade da rodeira

$\Delta SP$  – Aumento anual do valor da temperatura de amolecimento

$\Delta T$  – Fração do ano considerada

$\Delta VIM$  – Redução anual dos vazios na mistura

$\delta t_A$  – Fração do ano aplicada na progressão do fendilhamento total

$\delta t_w$  ou  $\delta t'_w$  – Fração do ano aplicada na progressão do fendilhamento aberto

$\sum_{i=1}^n$  – Somatório de  $i=1$  a  $n$

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

O transporte rodoviário é o mais importante modo de transporte de superfície na Europa, e é fundamental para o seu desenvolvimento social e económico.

Devido ao grande desenvolvimento e modernização dos transportes rodoviários verificou-se no século XX, um aumento do tráfego rodoviário na Europa, representando cerca de 70% do transporte de passageiros, devido ao facto do transporte rodoviário ser o meio de transporte mais utilizado na deslocação de pessoas e de bens, por ser rápido, cómodo e flexível, permitindo o transporte porta a porta (Quaresma, 2010).

A intensidade do tráfego é uma das possíveis causas que podem levar ao aparecimento de degradações nos pavimentos rodoviários mas não é a única, a qualidade dos materiais usados na pavimentação, as altas temperaturas, que podem ser observadas no sul de Portugal, ou a precipitação elevada, que ocorre no norte de Portugal, são outros fatores que podem influenciar a sua origem (Menezes, 2008).

Os pavimentos rodoviários podem sofrer vários tipos de degradações, sendo as rodeiras um desses tipos de degradações. As rodeiras resultam de deformações permanentes das camadas de pavimento e da fundação, que ocorre nos pavimentos rodoviários. Este tipo de deformação é transversal e é provocado pela sucessiva passagem dos rodados dos veículos, desenvolvendo-se, por isso, longitudinalmente na banda de ação dos mesmos (Maia, 2012).

Existem rodeiras de (Pereira e Miranda, 1999):

- Pequeno raio (camadas superiores);
- Grande raio (camadas inferiores).

As rodeiras de pequeno raio apresentam uma deformação transversal ao eixo da via. As possíveis causas que levam ao seu aparecimento são as seguintes (Maia, 2012):

- 1) Cargas induzidas pelo tráfego lento e pesado, que ocorre geralmente nas faixas de autocarros ou nas vias de lentos, onde os veículos circulam durante muito tempo seguido, causando um elevado aquecimento dos pneus essencialmente em dias quentes e nas zonas onde estão parados, junto a semáforos;
- 2) Resistência insuficiente à deformação plástica das camadas betuminosas (ver Figura 1.1) que é normalmente originada devido à utilização de ligantes demasiado moles, de agregados de fraca qualidade ou de uma incorreta dosagem da mistura.

As rodeiras de grande raio são causadas por (Maia, 2012):

- 1) Assentamentos do solo de fundação causados pela reduzida capacidade estrutural das camadas granulares do pavimento que se deformam quando o pavimento é submetido a solicitações elevadas (ver Figura 1.1). O teor de humidade afeta muito o comportamento estrutural do solo. Quanto maior o teor de humidade do solo, pior é o comportamento estrutural do solo;

- 2) Problemas nos elementos de drenagem da via de circulação, decorrentes da ineficácia da drenagem para o traçado projetado.

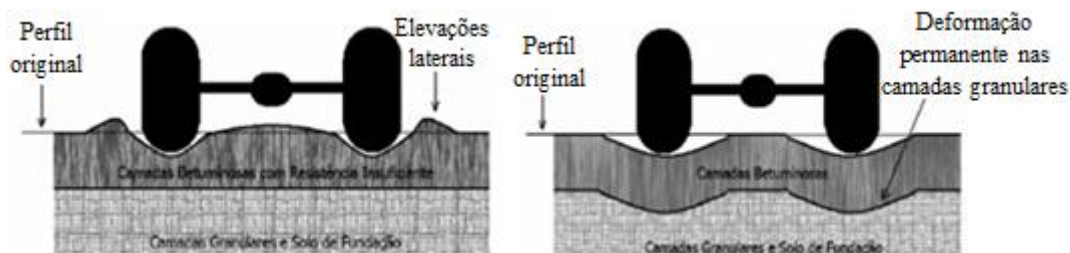


Figura 1.1 - Representação esquemática das rodeiras de pequeno raio (à esquerda) e das rodeiras de grande raio (à direita) (Santucci, 2001)

A gravidade das rodeiras depende do valor do seu cavado, sendo as rodeiras mais gravosas aquelas que apresentam um cavado de rodeira elevado.

Tal como se pode observar na Figura 1.2, o chamado “cavado de rodeira” é a profundidade da rodeira, que pode ser determinada com o auxílio de uma régua.

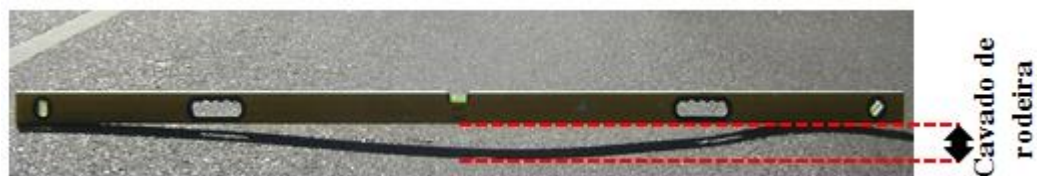


Figura 1.2 - Cavado de rodeira

Se as rodeiras atingirem valores de profundidade elevados podem causar deficiências na regularidade geométrica levando à perda do controlo direcional do veículo fazendo com que seja posta em causa a segurança das condições de circulação dos veículos e, consequentemente, dos seus condutores e ocupantes.

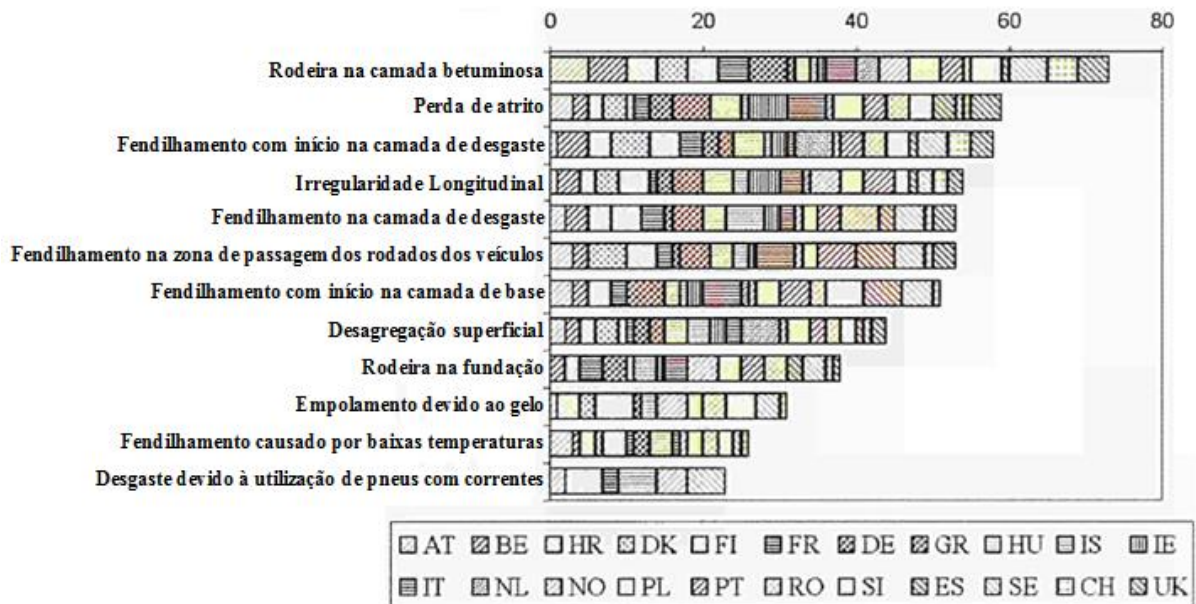
O aparecimento deste tipo de deformação prejudica também a capacidade de drenagem do pavimento, favorecendo assim a acumulação de água sobre este, reduzindo a aderência pneu/pavimento, pondo em causa, mais uma vez, a segurança de circulação dos veículos e, consequentemente, dos seus condutores e ocupantes, uma vez que a acumulação de água pode originar fenómenos de hidroplanagem (Soares, 2008).

Para avaliar o comportamento de pavimentos rodoviários, convidaram-se vários países (indicados pelas suas abreviaturas na Figura 1.3) a indicar as formas mais comuns de degradação observadas nas suas estradas usando uma escala crescente entre os valores de 0 a 5 (COST, 1999). Cada um dos valores que fazem parte desse intervalo tem um significado que se encontra representado no Quadro 1.1.

**Quadro 1.1 – Significado dos valores utilizados para avaliar o comportamento de pavimentos rodoviários (COST, 1999)**

Valores	Significado
0	Não ocorre
1	Ocorre ocasionalmente
5	Ocorre com regularidade

As pontuações acumuladas para cada tipo de degradação encontram-se resumidas na Figura 1.3.



**Figura 1.3 – Avaliação das deformações observadas nos países convidados (COST, 1999)**

A Figura 1.3 mostra que as rodeiras, na camada betuminosa, são o tipo de degradação mais comum nos pavimentos rodoviários dos países que colaboraram nesta avaliação sendo, por isso, de grande importância controlar e evitar este tipo de degradação nos pavimentos rodoviários (COST, 1999).

“Muitos milhares de milhões de euros são gastos em construção e manutenção de estradas a cada ano na Europa, e há uma necessidade de utilização de métodos mais eficientes para projeto do pavimento que produzam soluções que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente e ao usuário da estrada” (COST, 1999).

Uma vez que os pavimentos rodoviários estão expostos a muitos fatores que podem levar à origem de degradações nos mesmos, é importante saber qual o estado dos pavimentos para se poder intervir quando os mesmos necessitam de reparações. Para avaliar a qualidade dos pavimentos, o Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP) da Estradas de Portugal (EP) adotou um índice de qualidade global. Este índice caracteriza o estado dos pavimentos para cada trecho da rede, em função das informações obtidas a respeito das degradações superficiais (fendilhamento, covas, peladas, reparações), irregularidade longitudinal e rodeiras (EP, 2009a).

O índice de qualidade (IQ) que se propõe para efetuar a avaliação da qualidade baseia-se no valor do índice de aptidão de serviço (PSI) do pavimento, desenvolvido com base na informação

obtida no ensaio AASHO (AASHO, 1962), e adotado pelo SGP do Estado do Nevada (Sebaaly, *et al.*, 1996).

O valor de IQ no final do ano t é determinado da seguinte maneira (Santinho Horta, *et al.*, 2013):

$$IQ_t = 5 \times e^{-0,0002598/2 \times IRI_t} - 0,002139 \times R_t^2 - 0,1 \times (C_t \times S_t \times P_t)^{0,5} \quad (1.1)$$

Onde:

$IQ_t$  – Índice de qualidade no final do ano t;

$IRI_t$  – Irregularidade longitudinal do pavimento no final do ano t (mm/km);

$R_t$  – Profundidade média das rodeiras no final do ano t (mm);

$C_t$  – Área com fendilhamento no final do ano t ( $m^2/100m^2$ );

$S_t$  – Área com degradação superficial de materiais (covas e peladas) no final do ano t ( $m^2/100m^2$ );

$P_t$  – Área de zonas reparadas no final do ano t ( $m^2/100m^2$ ).

O valor de IQ depende assim da profundidade de rodeira e pode variar entre os valores 0 (pavimento em muito mau estado) e 5 (pavimento em muito bom estado) (Sebaaly, *et al.*, 1996).

Com o objetivo de criar métodos mais eficientes para gestão de pavimentos, várias instituições têm-se preocupado em desenvolver modelos de evolução de degradações, como por exemplo o Banco Mundial (Morosiuk, *et al.*, 2004). Hoje em dia, existem diversos modelos de previsão de rodeiras disponíveis (Veiga, 2012).

Pelas razões referidas anteriormente é fundamental que, em Portugal, durante a vida útil de um pavimento rodoviário flexível, uma vez que representam 99% da rede nacional rodoviária, as rodeiras sejam evitadas para que se consigam manter as características funcionais e estruturais para as quais os pavimentos foram dimensionados (Picado Santos, *et al.*, 2006; Fontul, 2005). Para isso, é necessário que se realize uma gestão eficiente das infraestruturas rodoviárias. Essa gestão é realizada através do SGP (Pereira e Miranda, 1999), atualmente suportado pela base de dados da EP. Em trabalho anterior (Silva, 2012) utilizou-se essa base de dados para desenvolver modelos de previsão de fendilhamento. Assim, julgou-se importante aproveitar a mesma base de dados para estabelecer, neste trabalho, modelos de previsão de rodeiras ajustados à rede nacional rodoviária.

## 1.2. Objetivos e estruturação do trabalho

O objetivo deste trabalho é estabelecer modelos que consigam prever o valor de profundidade de rodeira em pavimentos rodoviários da rede nacional rodoviária. Os modelos são estabelecidos utilizando informação contida na base de dados da EP.

Elaborou-se uma pesquisa sobre os diversos tipos de modelos de previsão de rodeiras já existentes com o objetivo de selecionar aqueles que atendem às causas que levam ao aparecimento de rodeiras no nosso país. Após a pesquisa, chegou-se à conclusão que existem diversos modelos em que uns são indicados para pavimentos do tipo AM (mistura betuminosa) e outros para pavimentos do tipo

ST (tratamento superficial), usualmente utilizados em estradas de baixo tráfego, como é o exemplo do modelo HDM-4 e do modelo Austroads.

De uma forma geral, os pavimentos analisados são do tipo AM, o que deverá resultar de se tratar de uma rede nacional. Para estes pavimentos aplicou-se o modelo HDM-4, que é a versão mais recente dos modelos HDM (Highway Design and Maintenance Standards Model) do Banco Mundial. Os modelos HDM são bastante antigos e uma das suas versões, o HDM-III, já foi utilizada em projetos identificados em 98 países diferentes (N. D. Lea International Ltd, 1995). Este modelo é um dos mais aceitáveis, sendo por isso recomendável a sua aplicação em estudos de previsão de rodéiras (Veiga, 2012).

Um número reduzido de secções tem tratamento superficial sobre camadas granulares, pavimentos do tipo ST, que foram analisados recorrendo ao modelo Austroads. Este é um modelo que tem em conta uma gama considerável de variáveis, pelo que se considera como sendo um modelo aceitável.

De seguida, analisou-se a fenomenologia da formação de rodéiras na rede nacional rodoviária. Esta análise compreendeu, por um lado, uma avaliação da forma como os parâmetros utilizados no modelo HDM-4 influenciam o valor da profundidade da rodéira para os pavimentos predominantes, do tipo AM. Por outro lado, visitaram-se alguns trechos de estrada, presentes na base de dados fornecida pela EP, com o objetivo de identificar fatores responsáveis pela origem das rodéiras observadas. Finalmente realizou-se uma análise que visou verificar se os fatores observados são ou não contabilizados no modelo HDM-4.

Posteriormente utilizaram-se os dados fornecidos pela EP para estabelecer modelos de previsão de rodéiras.

Estabeleceram-se critérios de seleção, pelos quais se escolheram 91 trechos de diferentes distritos de Portugal Continental com diferentes níveis de gravidade de rodéira.

Uma vez que a base de dados da EP não foi construída com o intuito de ser utilizada na elaboração de modelos de previsão de rodéiras, é compreensível que a sua utilização neste âmbito tenha limitações tendo sido, por isso, necessário proceder à validação cuidadosa de alguns dados existentes nessas secções levando à correção e, por vezes, à rejeição de alguns deles.

Após a validação dos dados, os correspondentes aos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) foram introduzidos no modelo HDM-4 e os dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial) no modelo Austroads.

Depois de introduzidos os dados nos modelos e de analisar os resultados obtidos, procurou-se verificar se existia um bom ajustamento com calibrações realizadas noutros países. Verificou-se, ainda, a necessidade de proceder à elaboração de uma calibração ajustada à rede nacional rodoviária.

### **1.3. Organização**

Esta dissertação encontra-se organizada em 7 capítulos, os quais se encontram divididos em subcapítulos. Alguns desses subcapítulos apresentam ainda divisões menores.

No Capítulo 1, “Introdução”, apresenta-se o enquadramento que apresenta a importância deste estudo, os objetivos, a metodologia e a organização do trabalho, onde se descreve de uma forma resumida a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, “Métodos de Avaliação de Rodeiras”, descrevem-se quais os tipos de equipamentos utilizados para medir rodeiras e como se interpretam os perfis medidos para obter o cavado de rodeira.

No Capítulo 3, “Modelos de Previsão de Rodeiras em Pavimentos Rodoviários”, referem-se os tipos de modelos existentes e como são caracterizados. Apresentam-se, também, os dois modelos de previsão HDM-4 e Austroads utilizados para prever rodeiras em pavimentos com camadas betuminosas ou tratamento superficial sobre camadas granulares, e um resumo sobre a caracterização de cada um deles. Faz-se uma descrição detalhada desses modelos e apresentam-se as equações adotadas em cada um deles. Apresentam-se ainda, neste capítulo, algumas calibrações existentes para ajustar os valores obtidos pelo modelo aos valores medidos.

No Capítulo 4, “Metodologia Adotada”, apresentam-se as metodologias adotadas nos dois capítulos que se seguem (Capítulo 5 e 6) e faz-se, também, uma breve descrição da história da base de dados do Sistema de Gestão de Pavimentos da EP (SGPav) e dos elementos que a constituem.

No Capítulo 5, “Fenomenologia da Formação de Rodeiras na Rede Nacional Rodoviária”, avalia-se a influência que os parâmetros utilizados no modelo HDM-4 têm sobre o valor médio da profundidade da rodeira. Apresentam-se as secções da rede nacional que foram inspeccionadas e as conclusões retiradas dessas inspeções.

No Capítulo 6, “Modelos de Previsão de Rodeiras para a Rede Nacional Rodoviária”, menciona-se, em primeiro lugar, a informação disponibilizada pela EP e referem-se os critérios adotados para, utilizando critérios de homogeneidade, serem selecionados os 91 trechos analisados.

De seguida, referem-se os dados que foram validados, como é que essa validação foi realizada para cada um dos casos e os trechos excluídos após a validação. Apresentam-se, ainda, as relações encontradas entre a capacidade estrutural do pavimento e o tráfego e entre fendilhamento e rodeiras.

Posteriormente mostram-se os resultados e as respetivas conclusões sobre a aplicação dos dados das secções em modelos existentes incluindo a utilização de calibrações.

Na última parte deste capítulo explica-se como se elaborou a calibração ajustada à rede nacional rodoviária, apresentam-se os resultados obtidos e respetivas conclusões.

No Capítulo 7, “Considerações Finais”, apresentam-se as conclusões finais do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

## 2. Métodos de Avaliação de Rodeiras

### 2.1. Equipamentos

Para observar e medir as rodeiras podem ser adotados os seguintes tipos de equipamentos (Branco, *et al.*, 2011):

- Equipamentos de referência geométrica simples;
- Equipamentos de tecnologia laser e ultrassons.

#### 2.1.1. Equipamentos de referência geométrica simples

Para medir a máxima profundidade da rodeira ou o cavado de rodeira pode-se utilizar uma régua metálica.

Na Figura 2.1 é possível observar o método de medição de cavados de rodeira com régua metálica.

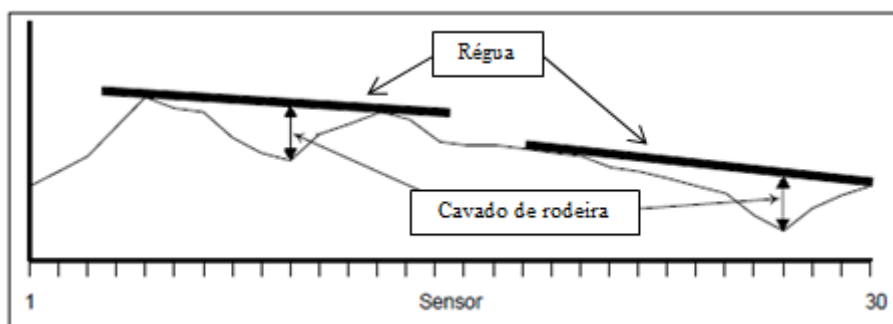


Figura 2.1 – Medição de rodeira com régua (Bennett e Wang, 2002)

Verificou-se que não existe uniformidade no comprimento da régua metálica utilizada para medir cavados de rodeira. Apresenta-se, por isso, no Quadro 2.1 as diferentes medidas que são adotadas para essa mesma régua, acompanhadas pela referência bibliográfica onde foram encontradas.

Quadro 2.1 - Diferentes medidas encontradas para a régua metálica utilizada para medir rodeiras

Referência Bibliográfica	Países	Comprimento da régua utilizada (m)
(CEN, 2003)	-	3
(Theyse, 2008)	Austrália	2
	Dinamarca	2
	Inglaterra	2
	Malásia	2
	Nova Zelândia	2
	Tailândia	2
	Estados Unidos da América	1,2 ou 1,8
África do Sul	2	

Observa-se na Figura 2.2 que para rodeiras de pequeno raio com largura inferior a 1,2 m, o valor da medição de cavados de rodeira é igual desde que se utilizem réguas com comprimento igual ou superior a 1,2 m (N. D. Lea International Ltd, 1995).

Em rodeiras de grande raio, em que a sua largura é superior a 1,2 m, já se observa uma diferença entre a profundidade de rodeiras medida com uma régua de 1,2 m e a profundidade obtida com uma régua com comprimento superior a 1,2 m. A razão que leva a esta diferença em rodeiras de grande raio é que, quando a largura da rodeira excede o comprimento da régua, a régua não consegue atingir os pontos mais altos do perfil fazendo com que se obtenha um valor de cavado de rodeira inferior ao correto. Essa diferença encontra-se ilustrada na Figura 2.3 (N. D. Lea International Ltd, 1995).

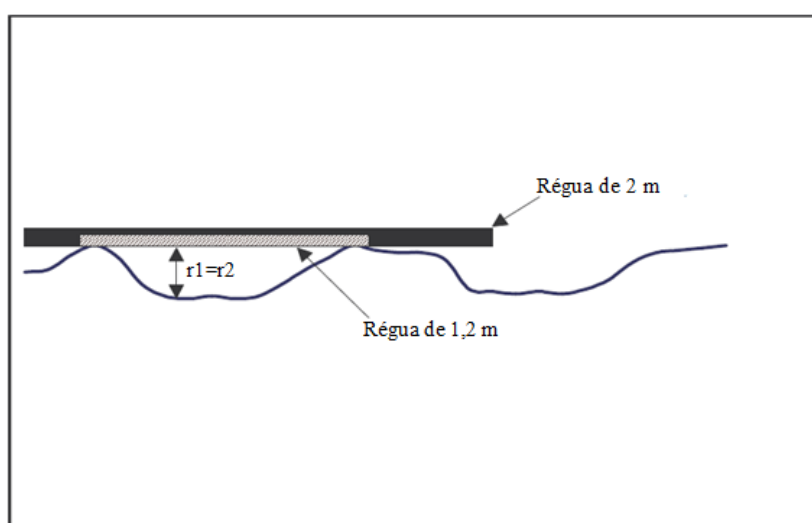


Figura 2.2 – Utilização de réguas de diferentes comprimentos em rodeiras de pequeno raio (N. D. Lea International Ltd, 1995)

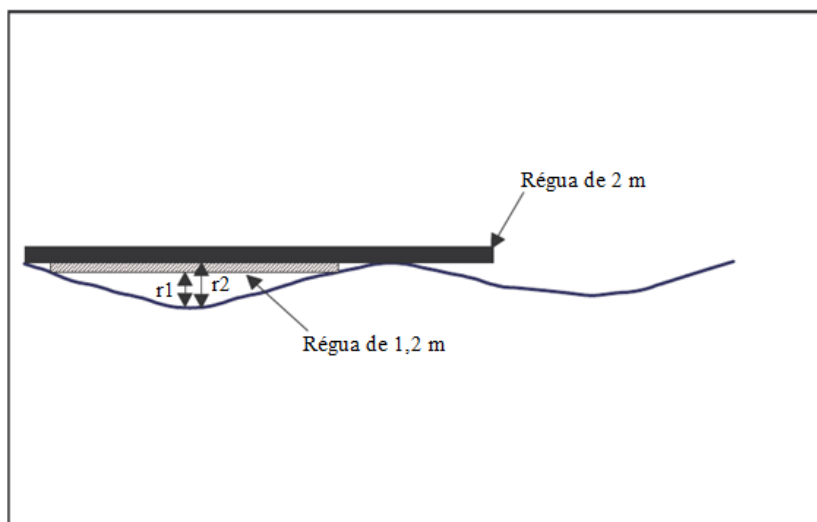


Figura 2.3 – Utilização de réguas de diferentes comprimentos em rodeiras de grande raio (N. D. Lea International Ltd, 1995)

Com tudo isto, conclui-se que é necessário ter em atenção que diferentes medidas de réguas metálicas podem corresponder a diferentes valores de cavados de rodeira. Na África do Sul (Africon,

1995) foi realizada uma pesquisa com o objetivo de descobrir qual a relação entre as medições realizadas com duas régua diferentes, uma com 1,2 m de comprimento e outra com 2 m. Para isso, durante essa pesquisa, mediram-se cavados de rodeira com ambas as régua, na mesma posição e num intervalo de 10 em 10 m. A análise dos resultados obtidos dessas medições encontra-se representada na Figura 2.4. Após a análise dos resultados obteve-se a seguinte relação linear (N. D. Lea International Ltd, 1995):

$$RDM_{2,0} = 1,3 \times RDM_{1,2} \quad (2.1)$$

Onde:

$RDM_{2,0}$  – Profundidade da rodeira usando uma régua de 2 m de comprimento;

$RDM_{1,2}$  – Profundidade da rodeira usando uma régua de 1,2 m de comprimento.

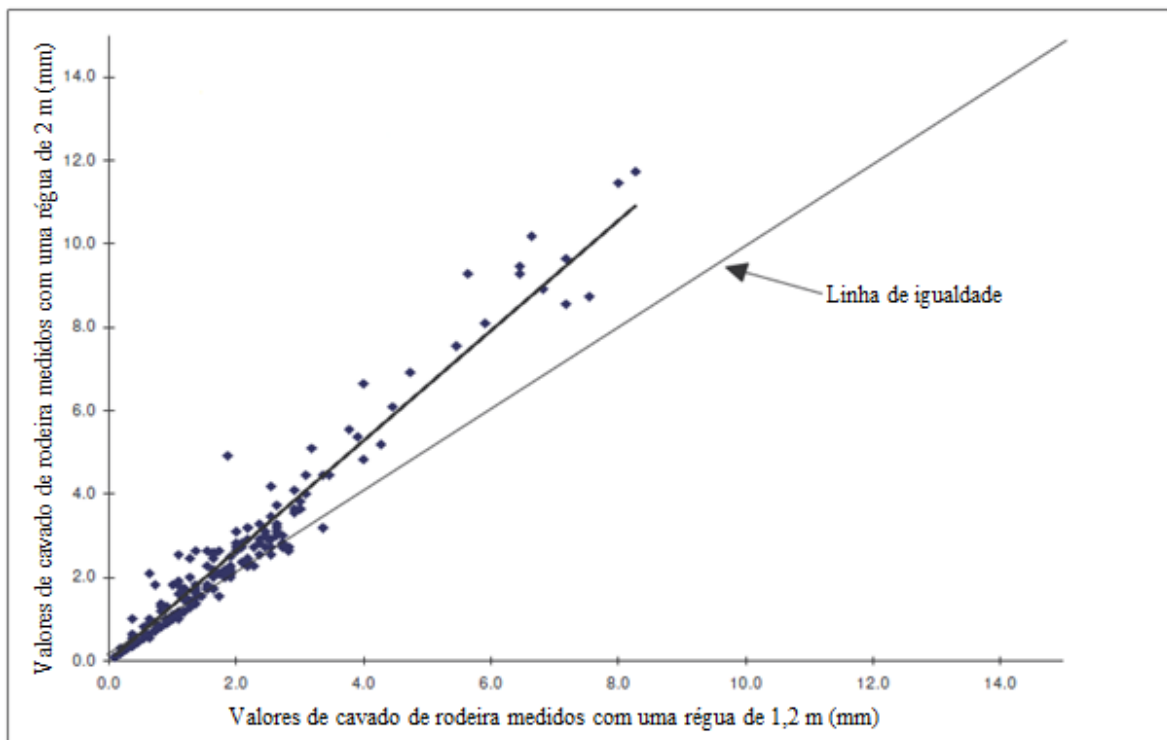


Figura 2.4 – Relação encontrada entre uma régua de 1,2 m e uma régua de 2 m (N. D. Lea International Ltd, 1995)

Quando se pretende obter uma informação mais completa, utiliza-se um transversoperfilógrafo, o qual permite medir de forma mais rápida o perfil transversal de uma via de tráfego. Este equipamento é constituído por uma régua metálica de 3,5 m de comprimento, graduada em centímetros, com dois apoios, com um cursor que suporta uma roda, a qual apoia na superfície do pavimento. A partir do tratamento de dados de cada perfil obtido com este equipamento, é possível avaliar a evolução da superfície do pavimento ao longo do tempo e obter o valor da profundidade de rodeiras em cada alinhamento de passagem dos rodados (direita ou berma e esquerda ou eixo) (Branco, *et al.*, 2011).

### 2.1.2. Equipamentos de tecnologia laser e ultrassons

Este tipo de equipamentos integra as novas capacidades de observação e de tratamento informático e consegue, também, realizar os ensaios a velocidade elevada (Branco, *et al.*, 2011).

Como se pode observar na Figura 2.5 e na Figura 2.6, estes equipamentos são constituídos por uma barra transversal, junto ao para-choques dianteiro suportado por emissores-captors de raios laser ou de ultrassons. Cada sinal emitido pelo emissor-captor para o pavimento permite determinar diversos fatores característicos do perfil transversal, como por exemplo, a profundidade máxima de cada rodeira (Branco, *et al.*, 2011).



Figura 2.5 - Perfilómetro laser (Fontul, 2005)



Figura 2.6 - Equipamento multifunções (Fontul, 2005)

Existe, ainda, o chamado PALAS (ver Figura 2.7 e Figura 2.8) que é um equipamento monofunções francês que, para além de registar o perfil transversal, fornece ainda (Branco, *et al.*, 2011):

- A inclinação transversal dos pavimentos;
- O raio de curvatura do traçado em planta;
- Os valores das rodeiras máximas;
- A “altura de água” potencialmente acumulável na zona das rodeiras.

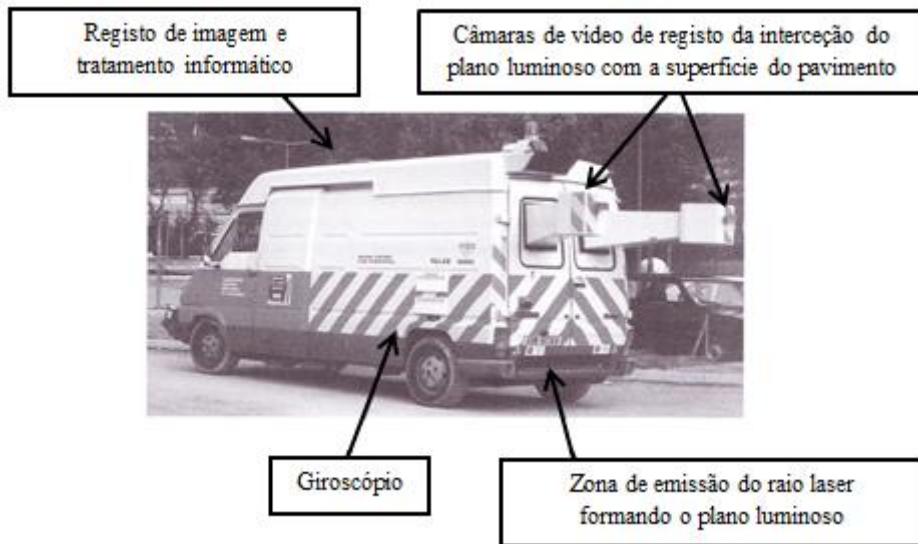


Figura 2.7 - Equipamento PALAS (Pereira e Miranda, 1999)



Figura 2.8 - Perfil transversal observado com o equipamento PALAS (Branco, *et al.*, 2011)

A Figura 2.9 mostra o posicionamento dos sensores de um perfilómetro laser, onde os sensores estão posicionados com diferentes espaçamentos (Bennett e Wang, 2002).

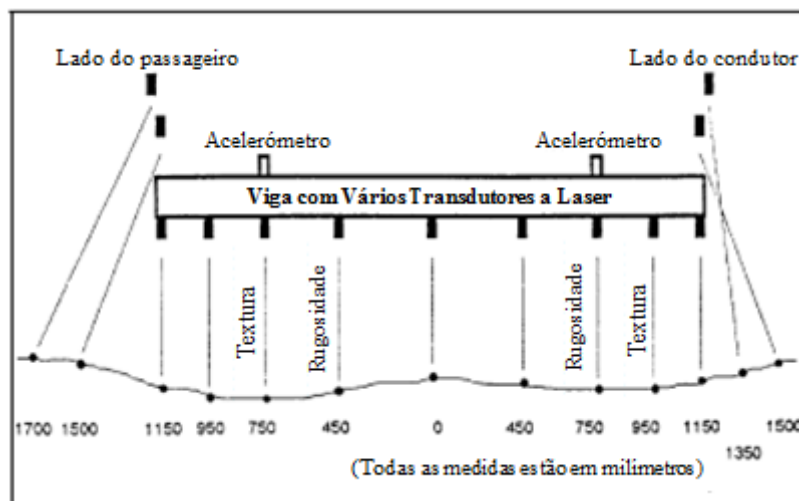


Figura 2.9 - Posicionamento dos sensores de um perfilómetro laser (Bennett e Wang, 2002)

Para ser possível determinar a profundidade da rodeira, cada um dos sistemas automáticos de medição recolhe e processa os dados usando algoritmos (Bennett e Wang, 2002).

Os algoritmos utilizados para calcular o valor do cavado de rodeira serão descritos já de seguida.

## 2.2. Interpretação de perfis medidos

Após a obtenção do perfil transversal da estrada com sistemas automáticos, é necessário que o mesmo seja interpretado para que se possa determinar o valor do cavado de rodeira. Para isso, podem ser utilizados um dos três algoritmos básicos, que são (Bennett e Wang, 2002):

- 1) O modelo da régua de 2 m que se baseia no método manual de colocação de uma régua no pavimento. A Figura 2.1 demonstra a determinação do valor de cavado de rodeira com o modelo da régua.
- 2) O modelo do fio que é muito popular por ser bastante eficiente na realização dos seus cálculos. A Figura 2.10 representa a determinação do valor da profundidade da rodeira com o modelo do fio. Contrariamente ao modelo da régua, neste modelo coloca-se um fio “esticado” sobre os pontos altos para ser possível retirar os valores correspondentes à profundidade da rodeira. Depois de colocado o fio, calcula-se a distância entre o fio e o pavimento, em que os valores mais elevados constituem a profundidade da rodeira.
- 3) As pseudo-rodeiras são definidas como sendo a diferença entre o ponto mais alto e os pontos mais baixos. Este algoritmo é apenas utilizado em sistemas que tenham um número limitado de sensores. É muito utilizado nos EUA. A Figura 2.11 mostra a definição deste tipo de algoritmo.

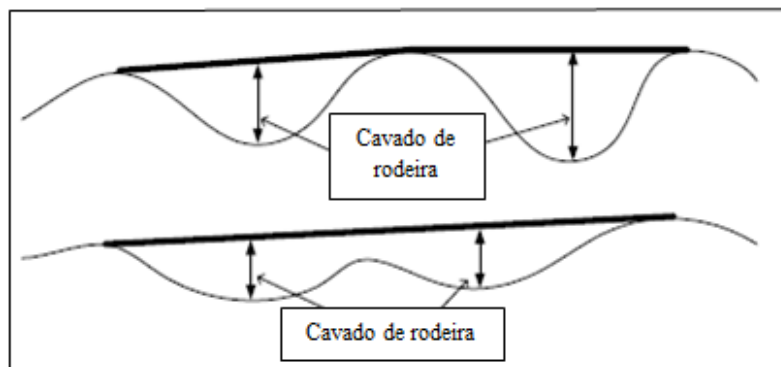


Figura 2.10 - Demonstração da determinação do valor do cavado de rodeira com o modelo do fio (Bennett e Wang, 2002)

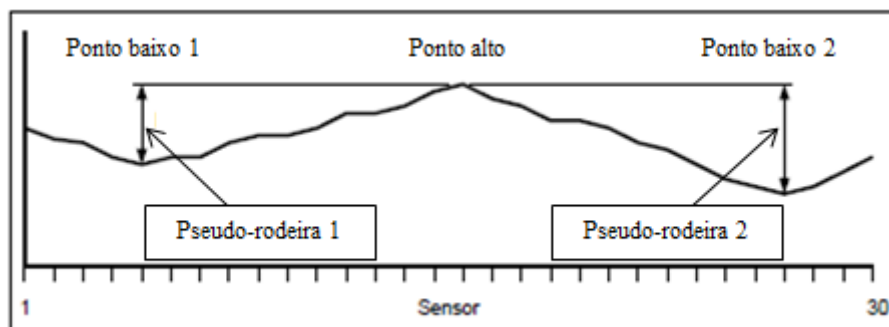


Figura 2.11 - Definição de pseudo-rodeiras (Bennett e Wang, 2002)

Fazendo, para os mesmos perfis, uma comparação entre as medições realizadas pelo modelo das pseudo-rodeiras com as medições realizadas com o modelo da régua de 2 m é possível concluir que o modelo das pseudo-rodeiras é um indicador muito pobre de cavados de rodeira e, por isso, não deve ser usado. O modelo do fio e o modelo da régua de 2 m fornecem os mesmos resultados quando os pontos altos estão espaçados em intervalos iguais ou inferiores a 2 m (Bennett e Wang, 2002).

Quando se pretende calcular a profundidade de uma rodeira, coloca-se a questão sobre como se deve medir essa profundidade quando se usa o modelo da régua de 2 m e o modelo do fio. Tal como se pode observar na Figura 2.12 existem duas opções:

- Considerando a altura vertical, ou;
- Considerando a medida perpendicular à régua (ou fio).

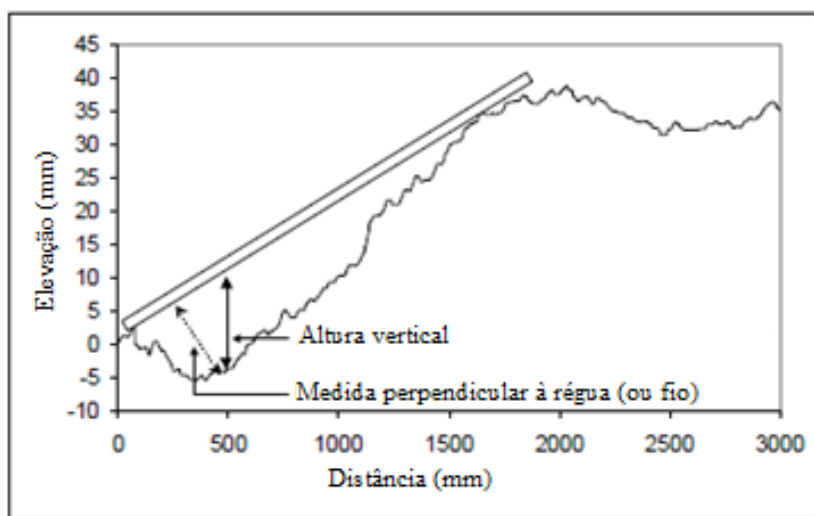


Figura 2.12 - Implicações da escolha do método de medição da profundidade das rodeiras (Bennett e Wang, 2002)

Após uma análise sobre a implicação destes dois métodos, foi possível concluir que para profundidades de rodeira inferiores a 50 mm não existe qualquer impacto, e até mesmo para uma profundidade de rodeira de 250 mm tem-se uma diferença inferior a 3% (Bennett e Wang, 2002).

## 2.3. Comparação entre métodos de avaliação num perfil transversal

### 2.3.1. Comparação entre os dois tipos de equipamentos

Comparando os dois tipos de equipamentos referidos anteriormente no subcapítulo 2.1, conclui-se que os equipamentos constituídos por sensores sem contacto (lasers e outros equipamentos óticos) vieram aumentar consideravelmente a eficácia operacional do traçado de perfis de pavimentos de estradas, uma vez que (PIARC, 1995):

- Têm a capacidade de medir, em alta velocidade, a distância entre um ponto de referência e a superfície do pavimento;
- Conseguem medir o traçado dos perfis longitudinais e transversais do pavimento a velocidades comuns de tráfego evitando o encerramento de estradas ou o seu

congestionamento que eram causados, há alguns anos, pela utilização de métodos de medição lentos.

Para além das vantagens referidas anteriormente, os equipamentos de tecnologia laser e ultrassons também possuem uma grande desvantagem em relação a métodos de medição lentos, uma vez que são equipamentos muito dispendiosos. O preço dos equipamentos constituídos por sensores é elevado pelo facto de possuírem uma tecnologia moderna e mais avançada. O valor entre este tipo de equipamentos também varia bastante pois depende do número de sensores que possuem. Quanto mais sensores, maior é o pormenor dos perfis longitudinais e transversais mas mais caro é o equipamento.

### **2.3.2. Harmonização dos diferentes tipos de perfilómetros**

Como podem existir diversos tipos de perfilómetros com a capacidade de medir o valor do cavado de rodeira, torna-se necessário harmonizar os diferentes tipos de perfilómetros devido às diferenças que os mesmos apresentam quando comparados uns com os outros. Essas diferenças são as seguintes:

- A velocidade de funcionamento (PIARC, 1998);
- A posição na estrada (Bennett e Wang, 2002);
- A capacidade em localizar os pontos altos e os pontos baixos do perfil (Bennett e Wang, 2002);
- O número de sensores e o seu espaçamento (Bennett e Wang, 2002).

Quanto à primeira diferença apresentada, a velocidade de funcionamento do perfilómetro, realizaram-se uma série de experiências na Europa (Alemanha e Holanda) onde se utilizaram 26 diferentes tipos de perfilómetros a velocidades entre os 60 e 90 km/h para medir o cavado de rodeira. Após a análise dos resultados concluiu-se que a velocidade de funcionamento, na gama de velocidades utilizadas nas experiências, não tem nenhuma influência significativa sobre as medições realizadas pela maior parte dos dispositivos (PIARC, 1998).

No que diz respeito às restantes diferenças, é fundamental harmonizar as medições realizadas pelos diferentes sistemas automáticos de medição com o objetivo de verificar se os resultados obtidos pelos diferentes sistemas de medição são compatíveis uns com os outros e se podem ser convertidos para um único valor "normal". Para isso, foi desenvolvido, na Nova Zelândia, um programa de simulação de computador que prevê as medições feitas pelos veículos numa série de perfis de estrada. Esse software tem o nome de HRD (Harmonisation of Rut Depth Software) (Bennett e Wang, 2002).

A Data Collection Ltd. (DCL), desenvolveu um Transversoperfilógrafo (TPB), com o objetivo de estabelecer perfis transversais de referência. Este é um instrumento de precisão, constituído por uma viga de 3,6 m de comprimento e um carro motorizado (ver Figura 2.13). O carro move uma roda ao longo do pavimento e a posição da roda e a respetiva elevação são monitorizados por transdutores verticais e horizontais. Com uma resolução vertical de 0,2 mm e uma resolução horizontal de 3 mm (HCT, 2001), a TPB fornece medições muito precisas do perfil transversal (Bennett e Wang, 2002).



Figura 2.13 - Transversoperfilógrafo (TPB) desenvolvido pela DCL (Bennett e Wang, 2002)

Após a comparação dos valores de profundidade de rodeira obtidos com uma régua de 2 m previstos pelo perfilómetro com os valores obtidos pelo TPB (perfil de referência), descobriu-se que existe uma forte relação linear em todos os casos (Bennett e Wang, 2002).

Tudo isto comprova que é possível desenvolver funções de transferência que convertam valores de cavados de rodeira, obtidos com sistemas automáticos, em um único valor "normal".

De seguida apresentam-se as equações que convertem os valores dos cavados de rodeira medidos com diferentes perfilómetros laser para um único valor "normal" do cavado de rodeira (Bennett e Wang, 2002):

- $RD = 1,54 + 0,97 \times MEAS$ , para o sistema automático MWH com 30 sensores (2.2);
- $RD = 2,44 + 0,98 \times MEAS$ , para o sistema automático WDM com 16 sensores (2.3);
- $RD = 2,09 + 0,96 \times MEAS$ , para o sistema automático PMS com 15 sensores (2.4);
- $RD = 2,39 + 0,96 \times MEAS$ , para o sistema automático ARRB com 13 sensores (2.5).

Onde:

RD – Cavado de rodeira em mm obtido pelo TPB;

MEAS – Valor do cavado de rodeira medido com o perfilómetro laser, em mm, usando o algoritmo da régua de 2 m.

## 2.4. Avaliação das medições num trecho

### 2.4.1. Identificação de secções homogéneas

A análise dos fenómenos que levam ao aparecimento de rodeiras pode exigir a divisão das secções em análise em subsecções que possam ser consideradas homogéneas.

Uma das técnicas utilizadas para efetuar essa divisão é designada por "Diferenças Acumuladas" (Fridtjof, 2004). Os valores acumulados são obtidos da seguinte forma (AASHTO, 1993):

$$z_k = \sum_{i=1}^k x_i - k \times \bar{x}, \text{ for all } k = 1, \dots, n \quad (2.6)$$

Onde:

$n$  – Número de medições na secção de estrada analisada;  
 $z_k$  – Valor acumulado da diferença entre a medição do local  $i$  e a deflexão média;  
 $x_i$  – Valor do cavado de rodeira observado no local  $i$ ;  
 $\bar{x}$  – Valor da média do cavado de rodeira observado na secção de estrada analisada.  
 A média é calculada com a seguinte expressão:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.7)$$

Sendo:

$n$  – Número de medições na secção de estrada analisada.

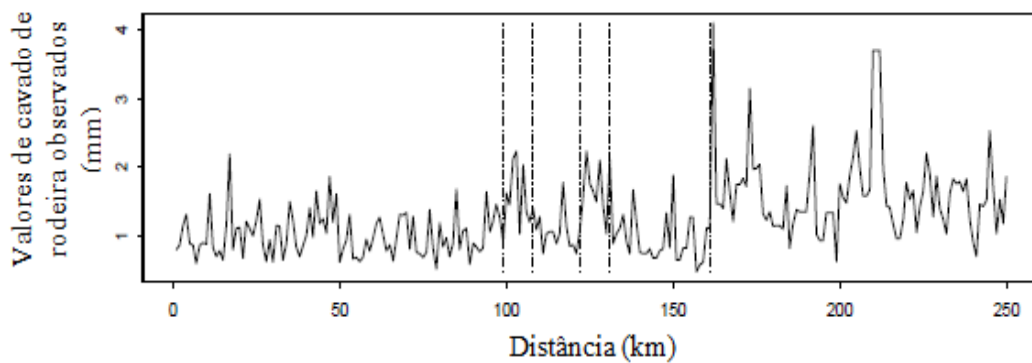


Figura 2.14 – Representação gráfica dos valores de cavado de rodeira medidos (Fridtjof, 2004)

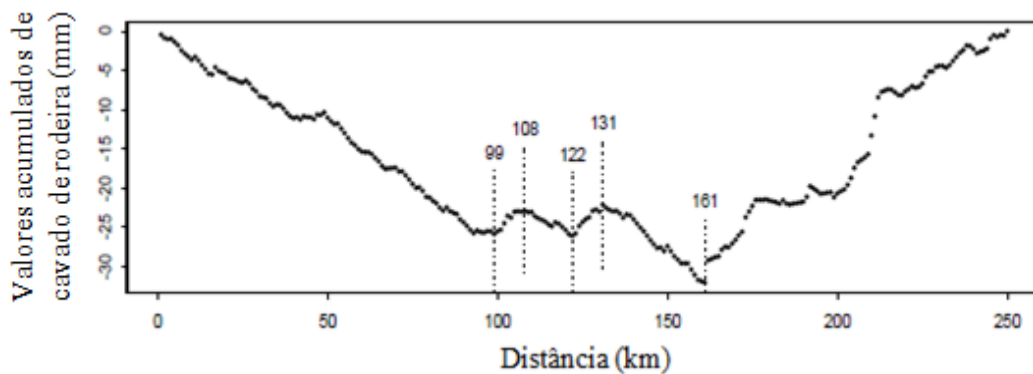


Figura 2.15 – Representação gráfica dos valores acumulados de cavado de rodeira (Fridtjof, 2004)

A Figura 2.14 mostra os valores de cavado de rodeira observados ao longo de uma secção e a Figura 2.15 representa os valores acumulados de cavado de rodeira ao longo da mesma secção.

Na Figura 2.15 os trechos descendentes com tendência aproximadamente linear apresentam valores de cavado de rodeira inferiores à média e os trechos ascendentes com tendência aproximadamente linear apresentam valores de cavado de rodeira superiores à média. Os pontos de inversão, ou seja, as transições entre estes dois tipos de trechos indicam as zonas de divisão de subsecções homogéneas.

Observa-se que é muito mais fácil interpretar o gráfico da Figura 2.15 do que o gráfico da Figura 2.14, tornando-se possível definir 6 famílias/subsecções que podem ser consideradas homogêneas e avaliar fatores responsáveis pela origem dos cavados de rodeira em cada uma dessas subsecções.

#### **2.4.2. Distribuição estatística dos cavados de rodeira**

É importante saber de que forma é que os valores de cavado de rodeira de uma dada secção se distribuem para que seja possível prever futuras degradações que o pavimento possa vir a demonstrar.

A Figura 2.16 mostra que ao longo do período de vida de um pavimento, os valores de cavado de rodeira podem apresentar três diferentes tipos de distribuição, que são os seguintes (N. D. Lea International Ltd, 1995):

##### ➤ Fase 1 – Início de vida

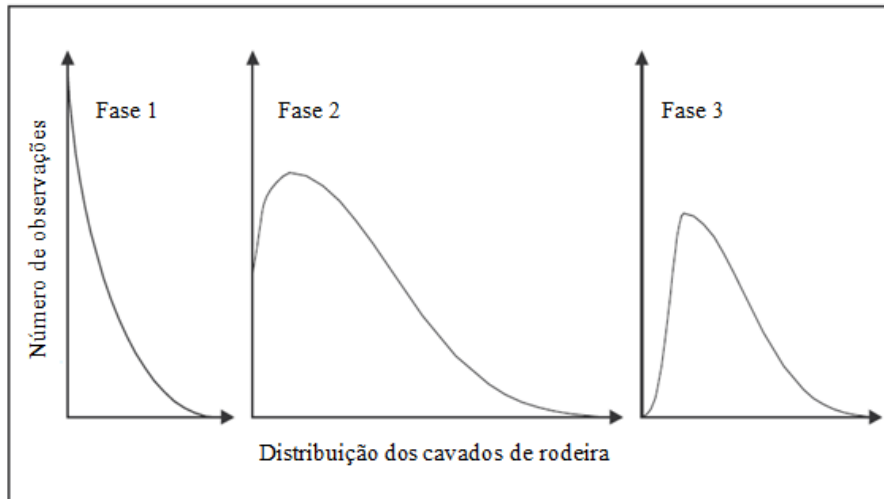
Constata-se que os valores de cavado de rodeira seguem uma distribuição exponencial. Observa-se, também, que os valores são, na sua maioria, iguais ou muito próximos do valor zero. Este tipo de comportamento para além de ter sido observado em secções de pavimentos recém-construídos também foi observado em estradas projetadas adequadamente sem problemas significativos de rodeira. As secções de pavimento que indicam este tipo de comportamento apresentam, normalmente, valores médios de profundidade de rodeira tipicamente abaixo dos 5 mm (N. D. Lea International Ltd, 1995).

##### ➤ Fase 2 – Meia-idade

Nesta fase, os valores de profundidade de rodeira observados são superiores aos da primeira fase, o que é compreensível, uma vez que o pavimento já se encontra numa idade mais avançada. A distribuição é uma distribuição normal assimétrica. As secções com este tipo de comportamento parecem estar no ponto médio da sua vida útil, e apresentam, normalmente, valores médios de cavado de rodeira entre 5 mm e 15 mm (N. D. Lea International Ltd, 1995).

##### ➤ Fase 3 – Fim de vida (funcional e/ou estrutural)

Observando a Figura 2.16, é evidente que os valores observados se aproximam mais de uma distribuição normal, embora ainda apresentem uma não simétrica. Este tipo de comportamento é típico de secções que se encontram no fim da sua vida útil e apresentam valores médios de profundidade de rodeira superiores a 15 mm (N. D. Lea International Ltd, 1995).



**Figura 2.16 – Diferentes tipos de distribuição dos cavados de rodeira ao longo do período de vida útil de um pavimento (N. D. Lea International Ltd, 1995)**

Estudos no Canadá (Kavussi, 2004) avaliaram o tipo de distribuição que os valores de profundidade de rodeira apresentam elaborando um gráfico do tipo Quantil-Quantil (Q-Q) com os valores de profundidade de rodeira de uma secção medidos de 20 em 20 m e, observando que esses mesmos valores não seguem uma linha reta no gráfico, concluíram que os valores de profundidade de rodeira de uma dada secção não obedecem a uma distribuição normal.

No mesmo estudo, observou-se que ao traçar, no mesmo tipo de gráfico, o logaritmo neperiano dos valores de profundidade de rodeira, se consegue obter uma melhor correlação, uma vez que, neste caso os valores estão muito mais próximos da linearidade. Com este estudo, pôde-se concluir que os valores de profundidade de rodeira obedecem a uma distribuição logarítmica normal (log-normal).

### 3. Modelos de Previsão de Rodeiras em Pavimentos Rodoviários

#### 3.1. Tipos de modelos

A capacidade de prever a evolução dos pavimentos ao longo do tempo, considerando o seu estado, as solicitações e as ações de conservação realizadas em cada fase da sua vida, é fundamental para que seja possível prevenir o aparecimento de deformações nos pavimentos e definir estratégias de reparação adequadas a cada tipo de problema, quando necessário. Para isso, é essencial que haja modelos capazes de prever, ao longo do tempo, o tipo de degradação, em função da ação contínua e acumulada da passagem do tráfego e das condições climáticas (temperatura e precipitação) (Branco, *et al.*, 2011).

Os modelos de previsão da evolução do comportamento (abreviadamente designados por modelos de comportamento) existentes podem ser classificados quanto ao nível de aplicação, ao tipo de variáveis dependentes e independentes, ao formato concetual e ao tipo de formulação (ver Quadro 3.1) (Branco, *et al.*, 2011).

Quadro 3.1 – Classificação dos modelos de comportamento (Branco, *et al.*, 2011)

Nível de aplicação	Tipos de variáveis dependentes	Tipos de variáveis independentes	Formato concetual	Tipo de formulação
Projeto Rede	Globais Paramétricos	Absolutos Relativos	Empírico Mecanicista Empírico-Mecanicista	Determinístico Probabilístico

➤ Nível de aplicação

A nível de rede, os modelos são utilizados para prever o estado futuro dos pavimentos, de modo a apoiar a definição das necessidades de intervenção ao longo de vários anos. A nível de projeto, os modelos de comportamento apoiarão a tomada de decisão de carácter técnico, quanto a ações alternativas de conservação para trechos específicos da rede (Branco, *et al.*, 2011; PIARC, 1995; Rodrigues, 2013).

➤ Tipo de variáveis dependentes

Os modelos globais expressam o estado do pavimento em termos globais, através de índices de degradação e de índices de condição ou de serviço (por exemplo: PSI), enquanto os modelos paramétricos representam o estado do pavimento através de índices que representam os diferentes parâmetros de estado do pavimento (por exemplo: área de fendilhamento, cavado de rodeira, IRI) (Branco, *et al.*, 2011; PIARC, 1995; Rodrigues, 2013).

➤ Tipo de variáveis independentes

Os modelos absolutos consideram várias variáveis independentes para explicar a evolução do pavimento (espessura das camadas, módulos de deformabilidade, características das misturas, clima e tráfego). Os modelos relativos permitem prever o estado futuro dos pavimentos considerando os diferentes parâmetros de estado (degradações, deflexão, irregularidade longitudinal, aderência),

medidos ao longo dos anos de serviço, considerando apenas uma variável independente, a qual pode ser o tempo (anos de serviço) ou o tráfego suportado (número acumulado equivalente de eixos padrão) (Branco, *et al.*, 2011; COST, 1997; Rodrigues, 2013).

➤ Formato concetual

Os modelos mecanicistas baseiam-se em fundamentos teóricos do comportamento dos materiais que constituem o pavimento, representando uma aproximação puramente racional do comportamento do pavimento (N. D. Lea International Ltd, 1995).

Os modelos empíricos apoiam-se em dados do comportamento do pavimento obtidos em ensaios de campo, em ensaios de laboratório ou em ensaios de carregamento acelerado (N. D. Lea International Ltd, 1995).

Ambos apresentam desvantagens que limitam a sua aplicação. Essas desvantagens são (N. D. Lea International Ltd, 1995):

- Os modelos mecanicistas consideram um grande número de variáveis e incidem em parâmetros que são difíceis de quantificar, que torna muito complexa a sua conceção e aplicação;
- Os modelos empíricos estão limitados às condições específicas em que foram obtidos os dados.

Os modelos empírico-mecanicistas são mais flexíveis, pois combinam as bases teóricas dos modelos mecanicistas ponderadas com a análise de dados experimentais ou observados (N. D. Lea International Ltd, 1995).

➤ Tipo de formulação

Os modelos determinísticos indicam um único valor para o parâmetro de comportamento correspondente a cada grupo de variáveis independentes do modelo. Os modelos probabilísticos, não só indicam um valor esperado, que pode ser comparado com o valor previsto calculado a partir de um modelo determinístico, como também indicam as probabilidades de cada estado do pavimento, definido após um ou mais anos de deterioração (Li, *et al.*, 1997).

Os modelos que serão referidos neste capítulo dizem apenas respeito a modelos de previsão de rodeiras.

Após a elaboração de uma pesquisa sobre os diversos tipos de modelos de previsão de rodeiras já existentes, concluiu-se que existem uns modelos indicados para pavimentos do tipo AM (mistura betuminosa) e outros para pavimentos do tipo ST (tratamento superficial), usualmente utilizados em estradas de baixo tráfego, como é o exemplo do modelo HDM-4 e do modelo Austroads criado para prever rodeiras em pavimentos com tratamento superficial sobre camadas granulares.

Com base nas classificações referidas anteriormente é possível classificar o modelo HDM-4 e o modelo Austroads. As respetivas classificações encontram-se apresentadas no Quadro 3.2 e no Quadro 3.3 e observa-se que os modelos são semelhantes, uma vez que se classificam da mesma forma.

**Quadro 3.2 – Classificação do modelo HDM-4**

Nível de aplicação	Tipo de variáveis dependentes	Tipo de variáveis independentes	Formato conceptual	Tipo de formulação
Projeto Rede	Paramétrico	Absolutos	Empírico-mecanicista	Determinístico

**Quadro 3.3 – Classificação do modelo Austroads criado para prever rodeiras em pavimentos com tratamento superficial sobre camadas granulares**

Nível de aplicação	Tipo de variáveis dependentes	Tipo de variáveis independentes	Formato conceptual	Tipo de formulação
Projeto Rede	Paramétrico	Absolutos	Empírico-mecanicista	Determinístico

### 3.2. Modelo HDM-4 do Banco Mundial

Os modelos anteriores ao modelo HDM-4 são:

- O modelo de Paterson;
- O modelo HDM-III.

O modelo HDM-III é sucessor do modelo de Paterson. Nesse modelo as expressões generalizadas desenvolvidas por Paterson (1987) foram modificadas (não só para deformações permanentes como também para o fendilhamento) para permitir que, utilizando as mesmas variáveis, o fendilhamento fosse uma variável progressiva com a idade e para que o modelo calculasse o cavado de rodeira do primeiro ano para um pavimento novo (Gonçalves, 1999).

O modelo HDM -III existente foi desenvolvido considerando a utilização de uma régua de 1,2 m de comprimento para medir a profundidade de rodeiras.

O Quadro 2.1 mostra que o comprimento de régua mais utilizado internacionalmente é de 2 m. Com o objetivo de facilitar a utilização internacional do modelo HDM, decidiu-se alterar o comprimento da régua considerado no modelo HDM-III. Assim, surgiu o modelo HDM-4, a versão mais recente do Bando Mundial, onde se optou por adotar uma régua com comprimento de 2 m, multiplicando os valores do modelo HDM-III (régua de 1,2 m) por 1,3, tal como indicado na equação (2.1) (N. D. Lea International Ltd, 1995).

No modelo HDM-4 a deformação total (profundidade média da rodeira) é, em qualquer momento, a soma das quatro componentes seguintes (Theyse, 2008):

- Densificação inicial;
- Deformação estrutural;
- Deformação plástica (apenas nas camadas betuminosas);
- Uso de pneus com correntes.

Nesta análise, o último ponto referido na lista acima será omissa, uma vez que este tipo de pneus não é utilizado em Portugal.

Apresenta-se na Figura 3.1 o fluxograma do modelo HDM-4 para rodeiras.

➤ Densificação inicial

Para calcular a densificação inicial utiliza-se a expressão seguinte (Theyse, 2008):

$$RD0 = K_{rid} [a_0 \times (YE4 \times 10^6)^{(a_1 + a_2 \times DEF)} \times SNC^{a_3} \times COMP^{a_4}] \quad (3.1)$$

Onde:

RD0 – Cavado de rodeira por densificação inicial (mm);

$K_{rid}$  – Coeficiente de calibração para a densificação inicial;

$a_0, a_1, a_2, a_3$  e  $a_4$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro 3.4);

YE4 – Tráfego em MESALs (milhão de passagens de um eixo-padrão) por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;

SNC – Número estrutural modificado;

COMP – Índice de compactação relativa do pavimento (%).

DEF – Deflexão média anual da viga de Benkelman (mm), sendo dada por:

$$DEF = \left( \frac{3,2}{SNC} \right)^{\frac{1}{0,63}} \quad (3.2)$$

Para o cálculo de SNC deve-se consultar o Anexo B.

**Quadro 3.4 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo da densificação inicial (Theyse, 2008)**

Tipo de Pavimento	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
AMGB	51740	0,09	0,0384	-0,502	-2,3

AMGB – Mistura betuminosa sobre base granular (*Asphalt mix & granular base*).

➤ Deformação estrutural

Para calcular a deformação estrutural utiliza-se a seguinte fórmula (N. D. Lea International Ltd, 1995):

$$\Delta RDST = K_{rst} \times \left[ \frac{(a_0 + a_1 \times DEF + a_2 \times MMP \times ACX)}{AGE3} + a_3 \times MMP \times \Delta ACX' \times \ln(\max(1, AGE3 \times YE4)) \times RDM_a \times \Delta T \right] \quad (3.3)$$

Onde:

$\Delta RDST$  – Aumento anual da deformação estrutural (mm);

$K_{rst}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural;

DEF – Deflexão média anual da viga de Benkelman (mm), dada pela equação (3.2);

$a_0, a_1, a_2$  e  $a_3$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro 3.5);

MMP – Precipitação média mensal (m/mês);

ACX – Área de fendilhamento prevista (%);

AGE3 – Tempo que decorreu desde a última reabilitação (anos);

$\Delta ACX'$  – Máximo entre ( $\Delta ACX$ , 0);

$\Delta ACX$  – Variação prevista da área fendilhada, devido à deterioração das estradas no ano em análise (%);

YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;

$RDM_a$  – Profundidade da rodeira no início do ano em análise (mm);

$\Delta T$  – Fração do ano considerada (anos);

Para o cálculo de ACX e de  $\Delta ACX$  deve-se consultar o Anexo A.

**Quadro 3.5 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual da deformação estrutural (Theyse, 2008)**

Tipo de Pavimento	Camada de Desgaste	Camada de Base	HDM-4 Coeficientes da Deformação Estrutural			
			$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
AMGB	AC	GB	0,333	0,0494	0,0021	0,0285

AMGB – Mistura betuminosa sobre base granular (*Asphalt mix & granular base*);

AC – Betão betuminoso (*Asphalt concrete*);

GB – Base granular (*Granular base*).

➤ Deformação plástica

1) Se as propriedades do ligante forem desconhecidas, a deformação plástica é determinada de acordo com a seguinte equação (Theyse, 2008):

$$\Delta RDPD = K_{rpd} \times a_0 \times CDS^{a_1} \times YE4 \times Sh^{a_2} \times HS^{a_3} \quad (3.4)$$

Onde:

$\Delta RDPD$  – Aumento anual da deformação plástica (mm);

$K_{rpd}$  – Coeficiente de calibração para a deformação plástica;

$a_0, a_1, a_2$  e  $a_3$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro 3.6);

CDS – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento (ver Anexo A, Quadro A. 2);

YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;

Sh – Velocidade dos veículos pesados (=60 km/h);

HS – Espessura da camada betuminosa (mm).

**Quadro 3.6 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual da deformação plástica quando as propriedades do ligante são desconhecidas (Theyse, 2008)**

Camada de Desgaste	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
AM	0,3	3,27	-0,78	0,71

AM – Mistura betuminosa (*Asphaltic mix*).

2) Se as propriedades do ligante forem conhecidas, a deformação plástica é determinada com a seguinte expressão (Theyse, 2008):

$$\Delta RDPD = K_{rpd} \times a_0 \times YE4 \times Sh^{a_1} \times HS^{a_2} \times \left(\frac{PT}{SP}\right)^{a_3} \times VIM^{a_4} \quad (3.5)$$

Onde:

$\Delta RDPD$  – Aumento anual da deformação plástica (mm);

$K_{rpd}$  – Coeficiente de calibração para a deformação plástica;

$a_0, a_1, a_2, a_3$  e  $a_4$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro 3.7);

$YE4$  – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;

$Sh$  – Velocidade dos veículos pesados (=60 km/h);

$HS$  – Espessura da camada betuminosa (mm).

$PT$  – Temperatura do pavimento (°C) a 20 mm de profundidade durante o ano em análise;

$SP$  – Temperatura de amolecimento (°C);

$VIM$  – Vazios na mistura (%).

**Quadro 3.7 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual da deformação plástica quando as propriedades do ligante são conhecidas (Theyse, 2008)**

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
2,46	-0,78	0,71	1,34	-1,26

Durante o primeiro ano após a última reabilitação a redução do VIM é dada pela equação (3.6) e a subsequente redução gradual do VIM é dada pela equação (3.7) (Theyse, 2008).

$$\Delta VIM = a_0 \times YE4 \times Sh^{a_1} \times \left(\frac{PT}{SP}\right)^{a_2} \quad (3.6)$$

$$\Delta VIM = a_3 \times YE4 \times Sh^{a_4} \times \left(\frac{PT}{SP}\right)^{a_5} \quad (3.7)$$

Onde:

$\Delta VIM$  – Redução anual dos vazios na mistura (%);

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  e  $a_5$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro 3.8);

$YE4$  – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;

$Sh$  – Velocidade dos veículos pesados (=60 km/h);

$PT$  – Temperatura do pavimento (°C) a 20 mm de profundidade durante o ano em análise;

$SP$  – Temperatura de amolecimento (°C).

**Quadro 3.8 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo da redução anual do valor dos vazios da mistura (Theyse, 2008)**

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
43,558	-0,616	2,231	5,27	-0,716	3,225

O aumento anual do valor de SP é dado pela equação (Theyse, 2008):

$$\Delta SP = a_0 \times VIM_a \times PT^{a_1} \quad (3.8)$$

Onde:

$\Delta SP$  – Aumento anual do valor da temperatura de amolecimento (°C);

$a_0$  e  $a_1$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro 3.9);

$VIM_a$  – Vazios na mistura no início do ano em análise;

$PT$  – Temperatura do pavimento (°C) a 20 mm de profundidade durante o ano em análise.

**Quadro 3.9 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual de SP (Theyse, 2008)**

$a_0$	$a_1$
0,017	0,076

➤ Deformação total (profundidade média da rodeira)

O valor total médio da rodeira ao fim de cada ano é dado pela seguinte expressão (N. D. Lea International Ltd, 1995):

$$RDM = RD0 + \Delta RDST + \Delta RDPD \quad (3.9)$$

Onde:

$RDM$  – Profundidade média da rodeira de ambos os lados da via (mm);

$RD0$  – Cavado de rodeira por densificação inicial (mm);

$\Delta RDST$  – Aumento anual da deformação estrutural (mm);

$\Delta RDPD$  – Aumento anual da deformação plástica (mm);

➤ Deformação total (aumento gradual do desvio padrão da profundidade da rodeira)

O valor do desvio padrão da profundidade da rodeira ao fim de cada ano é muito útil, uma vez que nos permite verificar quanto é que os valores anuais de profundidade média de rodeira se desviam do valor médio. Quanto maior o valor do desvio padrão, mais afastado está esse valor da média. O aumento gradual do desvio padrão da profundidade da rodeira é dado, então, pela seguinte equação (Theyse, 2008):

$$\Delta RDS = K_{rds} \times \max[a_0, a_1 - a_2 \times RDM_b] \times \Delta RDM \quad (3.10)$$

Onde:

$\Delta RDS$  – Aumento anual do desvio padrão da profundidade média da rodeira (mm);

$K_{rds}$  – Coeficiente de calibração do desvio padrão da profundidade da rodeira;

$a_0, a_1$  e  $a_2$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro 3.10);

$RDM_b$  – Profundidade média da rodeira no final do ano em análise (mm);

$\Delta RDM$  – Aumento gradual da profundidade média total da rodeira (mm).

**Quadro 3.10 - Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do aumento anual do desvio-padrão da profundidade média da rodeira (Theyse, 2008)**

Tipo de Pavimento	$a_0$	$a_1$	$a_2$
Todo o Tipo de Pavimento	0,2	0,65	0,03

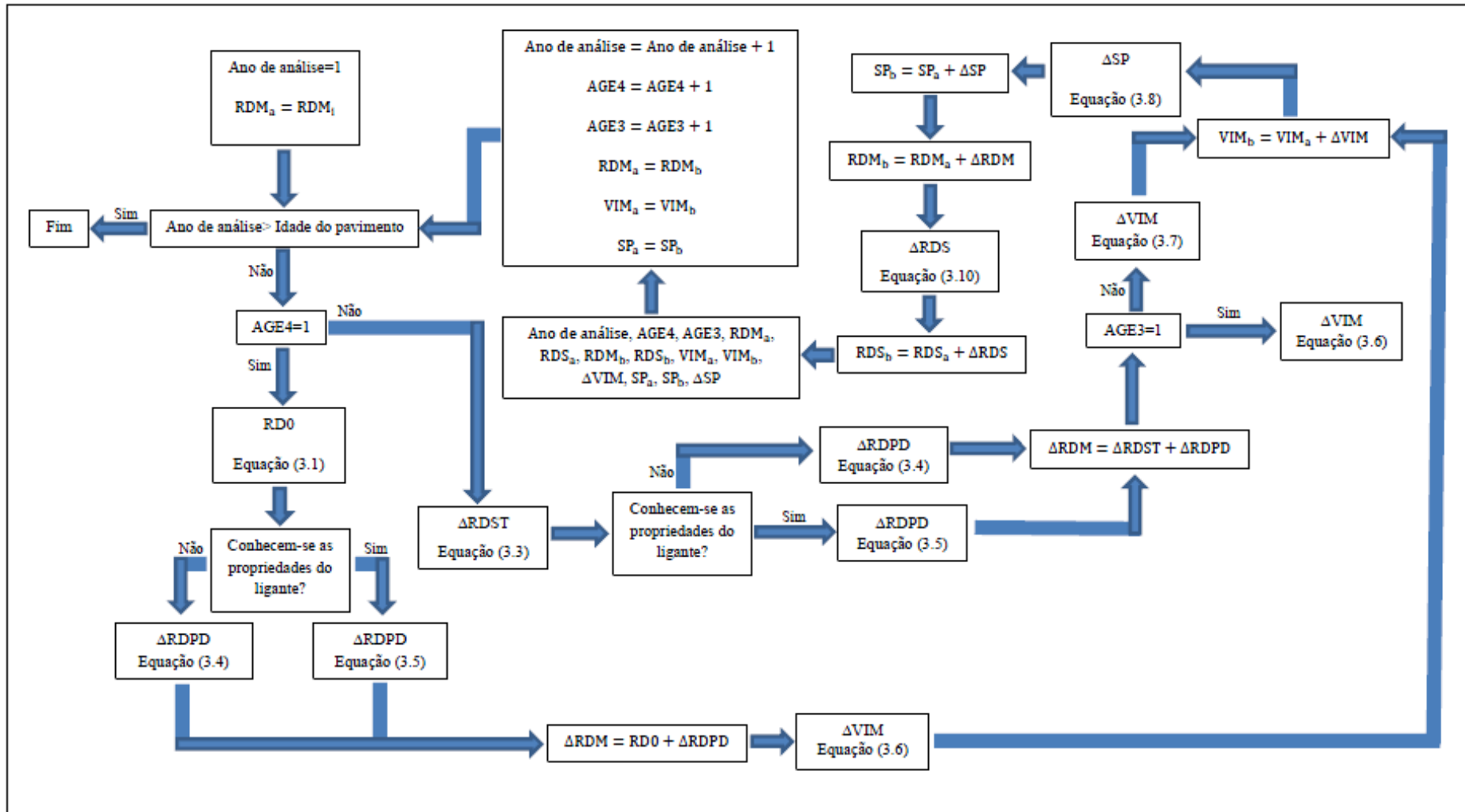


Figura 3.1 - Fluxograma do modelo de rodeiras HDM-4 (Theyse, 2008)

O significado da simbologia apresentada na Figura 3.1 encontra-se nas equações (3.1), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) e (3.10) e/ou na lista de abreviaturas, siglas e símbolos.

O Quadro 3.11 mostra o efeito que alguns tipos de tratamentos têm nas rodeiras após a sua aplicação nos pavimentos.

**Quadro 3.11 – Níveis de rodeira imediatamente após a aplicação de tratamentos (N. D. Lea International Ltd, 1995)**

<b>Tipo de Tratamento</b>	<b>Efeito Imediato</b>
Selagem de fendas	Sem efeito
Remendos no bordo	Sem efeito
Remendos na berma	Sem efeito
Remendos de ninhos	Sem efeito
Emulsão pulverizada	Sem efeito
Rega para rejuvenescimento	Sem efeito
Lamas asfálticas	Sem efeito
Tratamento Superficial Simples	Sem efeito
Tratamento Superficial Duplo	Sem efeito
Betão betuminoso poroso/drenado	Sem efeito a não ser que se aplique uma camada de regularização por baixo. Nesse caso corrige a rodeira
<i>Cape seal</i> <sup>(1)</sup>	Sem efeito
Reforço fino em betão betuminoso	Efeito mínimo a não ser que se aplique uma camada de regularização por baixo. Nesse caso corrige a rodeira
Reforço espesso em betão betuminoso	Se o cavado de rodeira for menor que 5 mm ou se se aplicar uma camada de regularização por baixo, corrige a rodeira. Caso contrário, reduz o seu valor mas não a corrige.
Reforço em mistura com betume modificado	Se o cavado de rodeira for menor que 5 mm ou se se aplicar uma camada de regularização por baixo, corrige a rodeira. Caso contrário, reduz o seu valor mas não a corrige.
Reforço em mistura com betume com borracha	Se o cavado de rodeira for menor que 5 mm ou se se aplicar uma camada de regularização por baixo, corrige a rodeira. Caso contrário, reduz o seu valor mas não a corrige.
Fresagem e Reposição	Corrige a rodeira

(1) *Cape Seal* – Lama asfáltica com colocação prévia de uma camada de gravilha envolvida em betume.

Note-se que os efeitos dos tratamentos apresentados anteriormente são independentes de alguns fatores, tais como (N. D. Lea International Ltd, 1995):

- O tipo de superfície;
- A condição do pavimento antes de ser aplicado o tratamento;
- A estrutura do pavimento;
- O material utilizado para o tratamento.

### 3.3. Modelo Austroads

A Austroads é a associação de transporte rodoviário e autoridades de trânsito da Austrália e da Nova Zelândia que desenvolveu modelos que prevêm, em pavimentos com tratamento superficial sobre camadas granulares, os seguintes parâmetros (Hickson, 2010):

- A profundidade da rodeira;

- O fendilhamento;
- A rugosidade.

Como a profundidade da rodeira é o parâmetro que interessa ser abordado neste trabalho, apresentam-se, de seguida, as equações que permitem calcular este parâmetro.

Para calcular o valor da profundidade da rodeira, rut (mm), utiliza-se a seguinte equação (Hickson, 2010):

$$\text{rut} = R_0 + \Delta\text{rut} \quad (3.11)$$

Onde:

rut – Profundidade da rodeira em pavimentos com tratamento superficial sobre camadas granulares (mm);

$R_0$  – Profundidade da rodeira inicial após a densificação inicial no final do primeiro ano (mm);

$\Delta\text{rut}$  – Aumento gradual da profundidade da rodeira (mm).

➤ Profundidade da rodeira inicial

O valor de  $R_0$  é o definido pelo modelo HDM-4 e é obtido da seguinte forma (Morosiuk, *et al.*, 2004):

$$R_0 = K_{\text{rid}} \times 51740 \times (\text{YE4} \times 10^6)^{(0,09+0,0384 \times 6,5 \times \text{SNC}_0^{-1,6})} \times \text{SNC}^{-0,502} \times 100^{-2,3} \quad (3.12)$$

Onde:

$R_0$  – Profundidade da rodeira inicial após a densificação inicial no final do primeiro ano (mm);

$K_{\text{rid}}$  – Coeficiente de calibração para a densificação inicial;

YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;

SNC – Número estrutural modificado;

➤ Aumento gradual do valor da profundidade da rodeira

Por fim, a fórmula usada para conhecer o valor de  $\Delta\text{rut}$  é a seguinte (Hickson, 2010):

$$\Delta\text{rut} = k \times (\text{AGE}_i - 1)^{0,617} \times \left(0,022 \times \frac{100 + \text{TI}_i}{\text{SNC}} + 0,594 \times \text{YE4} - 0,000102 \times \text{me}\right) \quad (3.13)$$

Onde:

$\Delta\text{rut}$  – Aumento gradual do valor da profundidade da rodeira (mm);

k – Coeficiente de calibração.

$\text{AGE}_i$  – Número de anos desde a construção ou última reabilitação do pavimento;

$\text{TI}_i$  – Índice de humidade de *Thornthwaite*, no tempo i (ver Quadro 3.12);

SNC – Número estrutural modificado;

YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;

me – Despesa anual de manutenção do pavimento em \$/via-km/ano (ver o Quadro 3.13 e o Quadro 3.14).

**Quadro 3.12 – Diferentes Tipos de Clima existentes com os respectivos Índices de Humidade de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948)**

Tipo de Clima	Descrição do Tipo de Clima	Índice de Humidade de Thornthwaite
A	Muito Húmido	100 e acima
B4	Húmido	80 a 100
B3	Húmido	60 a 80
B2	Húmido	40 a 60
B1	Húmido	20 a 40
C2	Sub-húmido molhado	0 a 20
C1	Sub-húmido seco	-20 a 0
D	Semi-árido	-40 a -20
E	Árido	-60 a -40

**Quadro 3.13 - Custos anuais típicos de manutenções de rotina (Hickson, 2010)**

Tráfego, MESA (/via/ano)	Despesa anual de manutenção do pavimento, me (\$/via-km/ano) <sup>(1)</sup>
≤ 0,1	500
0,1 - 1,0	700
> 1,0	1000

(1) O custo das manutenções de rotina é em dólares australianos.

**Quadro 3.14 - Custos típicos de tratamentos superficiais e de manutenções periódicas (Hickson, 2010)**

Tipo de Revestimento	Fator de Escala	Taxa (\$/m <sup>2</sup> )	Custo dos tratamentos superficiais (\$/via-km <sup>(1)(2)</sup> )	Custos anuais típicos de manutenções periódicas (\$/via-km/ano)
SS	1,00	3,50	12 250	495 - 1 183
DS	1,75	6,13	21 438	966 - 2 070
GS	2,00	7,00	24 500	990 - 2 365
SSSR	1,40	4,90	17 150	693 - 1 263
SSPMB	1,50	5,25	18 375	881 - 999
SSSC	1,90	6,65	23 275	1 146 - 1 266
DSSR	2,45	8,58	30 013	1 903
DSSAMI	3,33	11,64	40 731	2 586

(1) Assumiu-se um valor de 3,5 m para a largura da via;

(2) Os custos são em dólares australianos;

SS – Revestimento superficial simples (*Single Seal*);

DS – Revestimento superficial duplo (*Double Seal*);

GS – Revestimento com pré-aplicação de geotêxtil (*Geotextil Seal*);

SSSR – Revestimento superficial simples com betume modificado com granulado de borracha (*Single Seal with Scrap Rubber*);

SSPMB – Revestimento superficial simples com betume modificado com polímeros (*Single Seal with Polymer Modified Binder*);

SSSC – Revestimento superficial simples com dupla aplicação de agregado (*Single Seal with Surface Correction*);

DSSR – Revestimento superficial duplo com betume modificado com granulado de borracha (*Double Seal with Scrap Rubber*);

DSSAMI – Revestimento superficial duplo com membrana anti fissura (*Double Seal with Strain Alleviating Membrane*).

### 3.4. Calibrações existentes

Como o HDM-4 é um modelo utilizado por várias administrações rodoviárias em todo o mundo, têm-se desenvolvido estudos com o intuito de calibrar e introduzir alterações ao modelo original (sem qualquer tipo de calibração) que atendam às condições específicas do país ou região onde o mesmo está a ser utilizado (Rodrigues, 2013; De Solminhac, *et al.*, 2004). Os modelos apresentados de seguida são alguns desses exemplos:

- Modelo HDM-4 Chileno (De Solminhac, *et al.*, 2004);
- Modelo HDM-4 Australiano da Austroads (Hickson, 2008);
- Modelo HDM-4 Sul-Africano (Rohde, *et al.*, 1998);
- Modelo HDM-4 Indiano (Thube, 2011).

De seguida, apresentam-se os coeficientes de calibração, adotados pelos modelos referidos, para as componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira.

#### ➤ Modelo HDM-4 Chileno

Os coeficientes de calibração propostos pelo Chile são os apresentados no Quadro 3.15.

**Quadro 3.15 – Coeficientes de calibração adotados pelo Chile (De Solminhac, *et al.*, 2004)**

Tipo de pavimento	Coeficientes de calibração		
	$K_{rid}$	$K_{rst}$	$K_{rpd}$
ST	1,2	1	-
AM	0,5	0,46	0,1

ST – Tratamento superficial (*Surface Treatment*);

AM – Mistura betuminosa (*Asphaltic mix*);

$K_{rid}$  – Coeficiente de calibração para a densificação inicial;

$K_{rst}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural;

$K_{rpd}$  – Coeficiente de calibração para a deformação plástica.

Observa-se, no Quadro 3.15, que o Chile propôs, para as suas condições específicas e para dois tipos de pavimento, coeficientes de calibração para todas as componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira, sendo elas, a densificação inicial, a deformação estrutural e a deformação plástica.

#### ➤ Modelo HDM-4 Australiano da Austroads

Os coeficientes propostos pela Austroads apresentam-se de seguida no Quadro 3.16.

**Quadro 3.16 – Coeficientes de calibração adotados pela Austroads (Hickson, 2008)**

Local	Tipo de Pavimento	Coeficiente de calibração
		$K_{rst}$
Vitória	AM	1,4
	ST	1,6
Tasmânia	AM	1,1
	ST	1,2
Nova Zelândia	AM	5
	ST	4

O significado da simbologia encontra-se apresentado no Quadro 3.15.

Neste caso, observa-se que a Austroads propõe um coeficiente de calibração para a componente correspondente à deformação estrutural.

Apesar de apresentar apenas um coeficiente, apresenta-o para vários locais diferentes, nomeadamente dois Estados da Austrália (Vitória e Tasmânia) e para a Nova Zelândia, e para dois tipos de pavimento.

➤ Modelo HDM-4 Sul-Africano

No Quadro 3.17 encontra-se o coeficiente de calibração adotado pela África do Sul apenas para as suas condições e para um tipo de pavimento.

**Quadro 3.17 – Coeficientes de calibração adotados pela África do Sul (Rohde, et al., 1998)**

Tipo de pavimento	Coeficiente de calibração
	K (Progressão da rodeira)
AM	0,5

AM – Mistura betuminosa (*Asphaltic mix*);

K – Coeficiente de calibração global para a progressão da rodeira.

O modelo HDM-4 Sul-Africano propôs um coeficiente de calibração global para a progressão da rodeira. Uma vez que as componentes da deformação estrutural e da deformação plástica são as únicas que contribuem para o acréscimo anual da rodeira, este coeficiente é, portanto, considerado nessas duas componentes.

➤ Modelo HDM-4 Indiano

Este modelo Indiano apresenta, para as suas condições e para vários tipos de pavimento, um coeficiente de calibração para a deformação estrutural (ver Quadro 3.18).

**Quadro 3.18 – Coeficientes de calibração adotados pela Índia (Thube, 2011)**

Tipo de pavimento	Coeficiente de calibração
	$K_{rst}$
PACF	2,7
RACF	2,17
MACF	1,5
GCF	2,122

PACF – Fator de calibração médio para terrenos planos (*Plain terrain average calibration factor*);

RACF – Fator de calibração médio para terrenos ondulados (*Rolling terrain average calibration factor*);

MACF – Fator de calibração médio para terrenos montanhosos (*Mountainous terrain average calibration factor*);

GCF – Fator de calibração global para estradas interurbanas (*Global calibration factor for rural roads*).

$K_{rst}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural.

Observando todos os coeficientes de calibração referidos anteriormente, constata-se que se utilizam tanto valores muito elevados, como é o exemplo dos coeficientes propostos pela Austroads para a Nova Zelândia e os propostos pela Índia, como valores muito baixos, como os coeficientes propostos pelo Chile e o proposto pela África do Sul.

É evidente que, por comparação ao modelo HDM-4 original, a utilização de coeficientes de calibração muito elevados agrava o valor do cavado de rodeira, resultando rodeiras muito acentuadas, enquanto com a utilização de valores mais baixos resultam rodeiras menos gravosas, ou seja, de valor muito mais reduzido.

## 4. Metodologia Adotada

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada quer para avaliar a forma como diversos fatores influenciam o valor da profundidade da rodeira para os pavimentos do tipo AM (mistura betuminosa) quer para a utilização de informação contida na base de dados da EP para estabelecer modelos de previsão de rodeiras de pavimentos ajustados à rede nacional rodoviária.

### 4.1. Base de dados do Sistema de Gestão de Pavimentos da EP

#### 4.1.1. Introdução

O SGP da EP, designado como Sistema de Gestão de Conservação de Pavimentos (SGPav), teve em 2003 o início do seu processo de desenvolvimento e foi concluído e colocado em funcionamento em 2007 (Santinho Horta, *et al.*, 2013).

A base de dados da EP contém mais de 2000 secções compreendendo cerca de 14000 km de extensão. Cerca de 99% da rede nacional rodoviária é constituída por pavimentos flexíveis e, por isso, os pavimentos rígidos têm uma muito baixa expressão no conjunto da rede ( EP, 2009a; Picado Santos, *et al.*, 2006; Santinho Horta, *et al.*, 2013).

Para além de existir empenho em atualizar a base de dados dos pavimentos através da introdução de todas as intervenções realizadas nos mesmos na referida base, o método de inspeção tem sofrido melhorias ao longo do tempo (Santinho Horta, *et al.*, 2013)

#### 4.1.2. Modelo da rede

É fundamental definir um sistema de referenciação dos elementos da rede nacional rodoviária, designados por segmentos, para que seja possível identificá-los nas fases de análise. O modelo da rede, que contém cada secção rodoviária, baseia-se numa estrutura vetorial de arcos e nós ligados entre si e que se encontram referenciados através de um sistema GPS, ou seja, georeferenciação (EP, 2009a; Santinho Horta, *et al.*, 2013; Silva, 2012).

A EP adota as seguintes definições para o modelo da rede, ilustrado na Figura 4.1 (EP, 2009a; Luz, 2011; Silva, 2012):

- Nó: Objeto que permite definir o extremo de secções e segmentos de gestão, como: interseções de rede, limite de distrito, mudança de classificação/entidade responsável;
- Secção: Objeto base da rede rodoviária que serve como unidade mínima de troço de rede viária, considerado para efeito de recolha e análise de dados. Troço de estrada definida entre nós. Quando a estrada tem duas faixas (separador central) definem-se duas secções distintas.
- Segmento: Agregação de uma ou mais secções que correspondam ao trecho típico de intervenção.

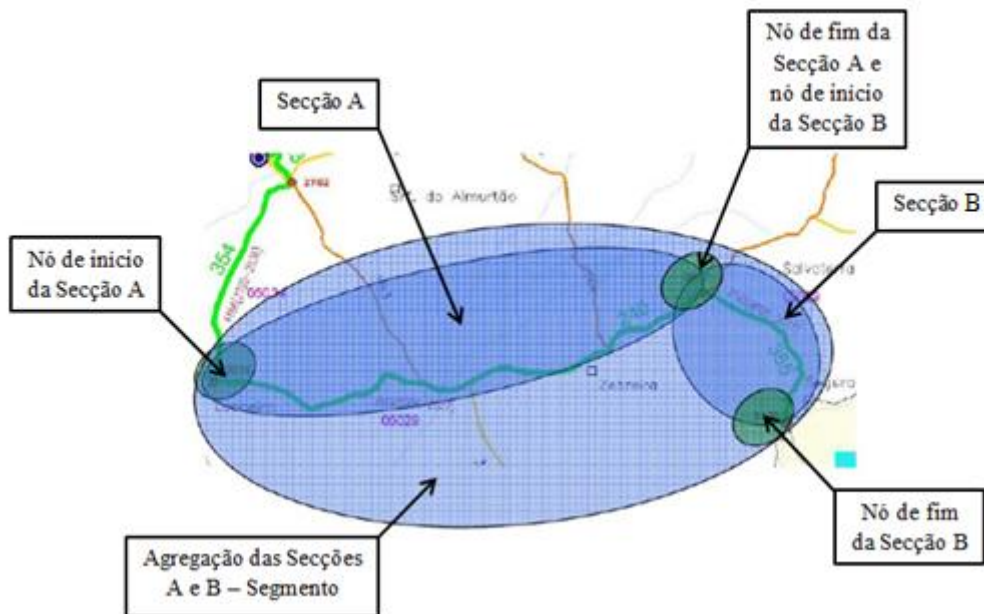


Figura 4.1 – Modelo da rede adotado pela EP - adaptado de (Morgado, 2011)

#### 4.1.3. Dados incluídos na base de dados

A base de dados da EP contém, para cada secção da rede nacional rodoviária, informações sobre:

- História dos Pavimentos;
- Tráfego;
- Estado superficial.

Os dados considerados na base de dados da EP estão apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Dados propostos para descrição do estado do pavimento (EP, 2009a)

Designação	Tipos de dados
1. História dos Pavimentos	a) Caracterização da estrutura do pavimento e respetiva fundação, incluindo, sempre que possível, os dados de projeto e de construção, das intervenções de reabilitação, com indicação da idade de cada intervenção (estrutura nova e reabilitação) b) Caracterização da geometria do perfil transversal (largura de vias de tráfego e bermas) c) Dados relativos às eventuais auscultações efetuadas, incluindo as constantes da caracterização final dos pavimentos nas fases de receção provisória e da receção definitiva d) Se possível dados sobre a sinistralidade rodoviária
2. Caracterização do Tráfego	a) Tráfego médio diário anual e evolução previsível b) Tráfego médio diário anual de pesados e evolução previsível
3. Estado Superficial	a) Fendilhamento longitudinal e transversal b) Fendilhamento tipo pele de crocodilo c) Peladas, desagregações superficiais, exsudação do betume, polimento dos agregados, assentamentos localizados d) Covas (ninhos) e) Reparações f) Rodeiras g) Irregularidade longitudinal h) Aderência (coeficiente de atrito/textura superficial)

Os parâmetros de estado que caracterizam o estado superficial do pavimento são identificados por níveis de gravidade. No Quadro 4.2 apresenta-se a forma de quantificação desses diferentes níveis de gravidade.

**Quadro 4.2 – Degradações e níveis de gravidade para os pavimentos flexíveis (EP, 2009a)**

Degradação	Níveis de Gravidade	Descrição do Nível de Gravidade	Área afetada / Valor adotado
Fendilhamento	1	Fenda isolada mas perceptível	0,5 m x comprimento afetado
	2	Fendas longitudinais ou transversais abertas e/ou ramificadas	2,0 m x comprimento afetado
	3	Pele de crocodilo	Largura do trecho x comprimento afetado
Peladas, Desagregação superficial, Exsudação de betume, Polimento dos agregados, Deformações localizadas	1	Anomalia com largura inferior a 30 cm	0,5 m x comprimento afetado
	2	Anomalia com largura entre 30 e 100 cm	2,0 m x comprimento afetado
	3	Anomalia com largura superior a 100 cm	Largura do trecho x comprimento afetado
Covas (Ninhos)	1	Profundidade máxima da cavidade < 2 cm	0,5 m x comprimento afetado
	2	2 cm < Profundidade máxima da cavidade < 4 cm	2,0 m x comprimento afetado
	3	Profundidade máxima da cavidade > 4cm ou várias covas de qualquer largura na mesma secção transversal	Largura do trecho x comprimento afetado
Reparações	1	Reparações bem executadas	
	2	Reparações com baixa qualidade de execução ou má elaboração das juntas	Metade da largura do trecho x comprimento afetado
	3	Reparações mal executadas	Largura do trecho x comprimento afetado
Rodeiras	1	Profundidade máxima da rodeira < 10 mm	5 mm
	2	10 mm < Profundidade máxima da rodeira < 30 mm	20 mm
	3	Profundidade máxima da rodeira > 30 mm	30 mm
Irregularidade longitudinal	-	Valor do IRI	IRI (mm/km)
Aderência	-	Valor do SCRIM a 60 km/h + mancha de areia	Coefficiente de atrito/IFI/Aa

IRI – Índice de Irregularidade Longitudinal;  
 SCRIM – *Sideway Coefficient Resistance Investigation Machine*.

#### 4.1.4. Levantamento dos parâmetros de estado do pavimento

Nas inspeções, o registo dos parâmetros de estado na base de dados da EP era realizado até 2011 com recurso ao equipamento informático VIZIROAD que está ligado ao conta-quilómetros de uma viatura (ver Figura 4.2) (Santinho Horta, *et al.*, 2013).



**Figura 4.2 – Viatura (à esquerda) e equipamento VIZIROAD com GPS associado (à direita) utilizados nas inspeções visuais (Santinho Horta, *et al.*, 2013)**

A EP adquiriu em Novembro de 2010 um perfilómetro laser (Santinho Horta, *et al.*, 2013) (ver Figura 4.3).



**Figura 4.3 – Perfilómetro laser utilizado nas inspeções mecânicas (à esquerda) e equipamento do operador (à direita) (Santinho Horta, *et al.*, 2013)**

O perfilómetro é constituído por um sistema de computadores e 14 lasers que leem tanto o perfil longitudinal como o perfil transversal da estrada e começou a ser utilizado pela EP em 2011 (Luz, 2011; Santinho Horta, *et al.*, 2013).

Está representado, na Figura 4.4, o perfilómetro laser da EP com o pormenor dos 14 lasers que estão colocados na barra à frente do veículo.



**Figura 4.4 – Perfilómetro Laser da EP (Luz, 2011)**

Como se pode observar na Figura 4.5, em 2009 e em 2010 foram realizadas apenas inspeções visuais. Após a aquisição do perfilómetro laser pela EP, em 2011, tentou-se diminuir o recurso ao VIZIROAD e aumentar o recurso ao perfilómetro, uma vez que o levantamento com VIZIROAD tem de ser efetuado a baixa velocidade, de modo a permitir a observação do pavimento pelo operador. O uso do perfilómetro já não apresenta esse problema porque o mesmo integra-se perfeitamente no fluxo do tráfego. Em 2011, também foram estabelecidos objetivos diferentes. Os objetivos foram os seguintes:

- Realização de 4500 km de inspeções visuais;
- Realização de 7000 km de inspeções com o perfilómetro.

Na campanha de 2012 optou-se pela inspeção mecânica na totalidade da rede.

	2009	2010	2011		2012
	Visual	Visual	Visual	Perfilómetro	Perfilómetro
Rede Classificada (≈10.000 km)	5.000 km 50%		2.500 km 25%	5.000 km 50%	10.000 km 100%
		5.000 km 50%			
Rede Desclassificada (≈4.000 km)	1.000 km 25%				4.000 km 100%
		1.000 km 25%	2.000 km 50%	2.000 km 50%	
Totais de inspeção	6.000 km	6.000 km	4.500 km	7.000 km	14.000 km
			11.500 km		

Figura 4.5 – Transição entre inspeções visuais e mecânicas no período compreendido entre 2009 e 2012 (Santinho Horta, *et al.*, 2013)

#### 4.1.5. Algoritmo utilizado pela EP

Após a obtenção do perfil transversal da estrada com o perfilómetro laser, a EP utiliza o modelo do fio (já explicado no subcapítulo 2.2 deste trabalho) para determinar o valor do cavado de rodeira (Luz, 2011).

Na Figura 4.6 exemplificam-se os dois tipos de rodeira (esquerda e direita) fornecidos na base de dados da EP.

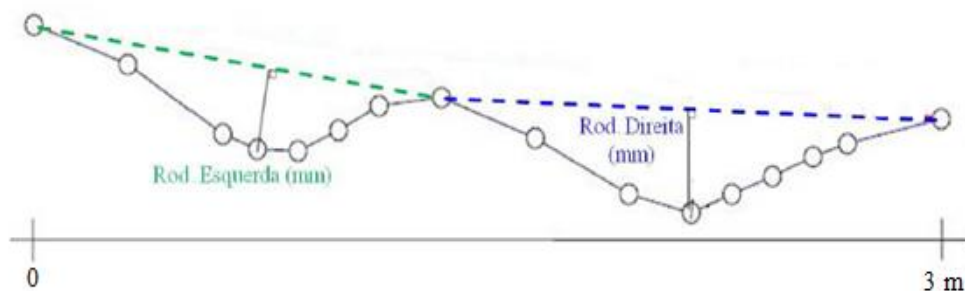


Figura 4.6 – Exemplificação dos dois tipos de rodeira (esquerda e direita) fornecidos pela EP (Ramboll, 2010)

## 4.2. Metodologia adotada para a fenomenologia

Antes de estabelecer modelos de previsão de rodeiras para a rede nacional rodoviária foi necessário realizar as duas tarefas seguintes:

- Avaliar a forma como os parâmetros utilizados no modelo HDM-4 influenciam o valor da profundidade da rodeira para os pavimentos predominantes, do tipo AM (mistura betuminosa);
- Caracterizar a fenomenologia da formação de rodeiras em algumas secções da rede nacional rodoviária.

Para concretizar a segunda tarefa, recorreu-se a uma base de dados fornecida pela EP e escolheram-se sete secções aleatórias com diferentes níveis de gravidade do distrito de Setúbal e efetuaram-se visitas a cada uma delas. O objetivo das inspeções realizadas foi identificar fatores responsáveis pela origem de rodeiras para verificar, posteriormente, se os mesmos são ou não contabilizados no modelo HDM-4.

## 4.3. Metodologia adotada para a elaboração de modelos de previsão

O objetivo desta fase do trabalho é desenvolver modelos de previsão de rodeiras para a rede nacional rodoviária com base em medições realizadas pela EP.

Em primeiro lugar, selecionaram-se algumas secções, da base de dados fornecida pela EP, que amostrassem rodeiras elevadas e representassem três níveis de gravidade (gravidade alta, intermédia e baixa).

Procedeu-se à validação dos dados fornecidos e à eventual exclusão de algumas secções que possuissem dados não confiáveis ou de difícil interpretação.

De seguida aplicaram-se os dados das secções escolhidas em modelos existentes e compararam-se os valores de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelos modelos calibrados.

Finalmente, com base na informação disponível, propôs-se o modelo mais adequado para a rede nacional rodoviária.

## 5. Fenomenologia da Formação de Rodeiras na Rede Nacional Rodoviária

### 5.1. Avaliação da variação dos parâmetros utilizados no modelo HDM-4

Nesta fase do trabalho, avaliou-se a forma como os parâmetros utilizados no modelo HDM-4 influenciam o valor da profundidade da rodeira para os pavimentos predominantes, do tipo AM (mistura betuminosa). Esses parâmetros são os seguintes:

- Número estrutural modificado do pavimento (SNC);
- Tráfego;
- Temperatura;
- Teor em água;
- Tipo de betume;
- Compactação relativa;
- Fendilhamento.

Considerou-se apenas um tipo de pavimento, selecionado a partir do Manual de Conceção de Pavimentos (MACOPAV), da Junta Autónoma de Estradas (JAE, 1995). As características do pavimento utilizado estão definidas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Características do pavimento considerado

Tipo de Pavimento Considerado			
<b>Tráfego</b>		Classe	T6
		TMDA <sub>p</sub>	150
		Fator de agressividade	3
<b>Estrutura</b>	Tipo de camada de desgaste	Tipo	BD
		Espessura (mm)	40
	Tipo de camada de base	Tipo	MB
		Espessura (mm)	140
	Tipo de camada de sub-base	Tipo	SbG
		Espessura (mm)	200
<b>Fundação</b>		Classe	F3
		CBR (%)	20

TMDA<sub>p</sub> – Tráfego médio diário de veículos pesados, por sentido e na via mais solicitada;

BD – Betão betuminoso em camada de desgaste;

MB – Macadame betuminoso;

SbG – Agregado britado de granulometria extensa em camada de sub-base;

CBR – Índice Californiano de capacidade de carga (*California Bearing Ratio*).

#### 5.1.1. Número estrutural modificado do pavimento (SNC)

Para calcular o valor de SNC, seguiu-se o que se encontra referido no Anexo B.

No Quadro 5.2, apresentam-se os parâmetros utilizados que permitiram avaliar a variação do SNC.

No gráfico apresentado na Figura 5.1, selecionaram-se três valores distintos de SNC para dois valores de tráfego (YE4) diferentes para determinar a influência que a variação do SNC tem no valor da profundidade média da rodeira.

Quadro 5.2 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação do SNC

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALs)	Estrutura	COMP (%)	Consideração de Fendilhamento
					SNC		
1	17,2	0,16	35/50	0,164	6	100	Sim
2				0,164	4		
3				0,164	2		
4				1	6		
5				1	4		
6				1	2		

PT – Temperatura do pavimento a 20 mm de profundidade;  
 MMP – Precipitação média mensal;  
 YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;  
 SNC – Número estrutural modificado;  
 COMP – Índice de compactação relativa do pavimento.

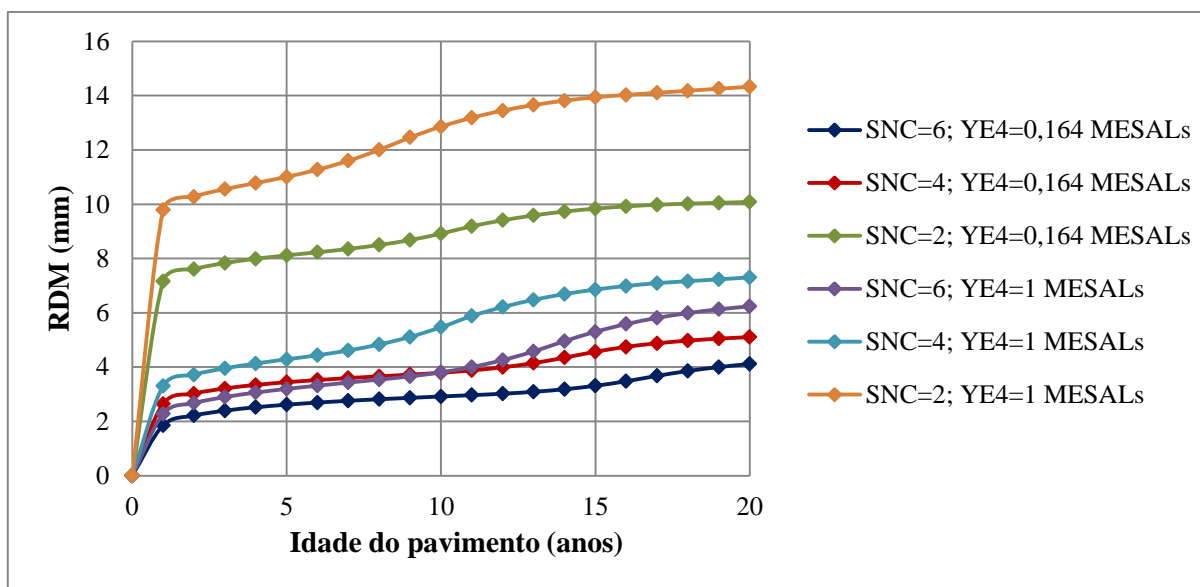


Figura 5.1 – Influência da variação da capacidade estrutural do pavimento (SNC) na profundidade média da rodeira (RDM)

Observa-se, na Figura 5.1, que o SNC é um parâmetro bastante importante no modelo HDM-4, uma vez que tem peso tanto na deformação inicial (valor de cavado de rodeira observado no final do primeiro ano) como na fase de progressão (valor de cavado de rodeira observado no final dos anos seguintes). Note-se que independentemente do valor do tráfego, para valores de SNC menores que 4 tem-se um acréscimo bastante significativo no valor da deformação inicial.

Verifica-se, então, que o valor de SNC influencia bastante o bom funcionamento do pavimento sendo, por esse motivo, necessário dimensionar as camadas que compõem a estrutura do pavimento de forma a suportarem as cargas a que o pavimento está sujeito.

### 5.1.2. Tráfego

O tráfego é caracterizado pelo conceito de ESAL (número equivalente de eixos-padrão) (N. D. Lea International Ltd, 1995; Hickson, 2010). Para pavimentos flexíveis, o MACOPAV adota eixos-padrão de 80kN.

Aquando do dimensionamento de pavimentos rodoviários, considera-se apenas o efeito do tráfego de veículos pesados, uma vez que é este tipo de veículos que condiciona o aparecimento de degradações, tais como as rodeiras. Segundo o MACOPAV, um pavimento flexível deve assegurar a circulação em condições de segurança, economia e conforto para um período de 20 anos (JAE, 1995).

O número acumulado de eixo-padrão para um determinado período, equivalente ao número acumulado de veículos pesados é dado pela seguinte expressão:

$$N_{80t} = 365 \times TMDA_p \times C \times \alpha \times p \quad (5.1)$$

Onde:

$N_{80t}$  – Número acumulado de passagens de um eixo-padrão de 80 kN por via, durante um período t;

$TMDA_p$  – 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 (anos);

C – Fator de crescimento do tráfego, sendo dado por:

$$C = \frac{(1+t)^p - 1}{p \times t} \quad (5.2)$$

Em que:

t – Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado;

p – Período de dimensionamento (anos).

No Quadro 5.3 indicam-se as classes de tráfego e os fatores de agressividade do tráfego considerados no caso de pavimentos flexíveis, para conversão do  $TMDA_p$  em eixos-padrão de 80 kN.

**Quadro 5.3 – Classes de tráfego e fatores de agressividade do tráfego no MACOPAV (JAE, 1995)**

Classe de Tráfego	$TMDA_p$	Fator de agressividade
		Eixo-padrão de 80 kN
T <sub>6</sub>	50-150	2
T <sub>5</sub>	150-300	3
T <sub>4</sub>	300-500	4
T <sub>3</sub>	500-800	4,5
T <sub>2</sub>	800-1200	5
T <sub>1</sub>	1200-2000	5,5

$TMDA_p$  – Tráfego médio diário anual de veículos pesados.

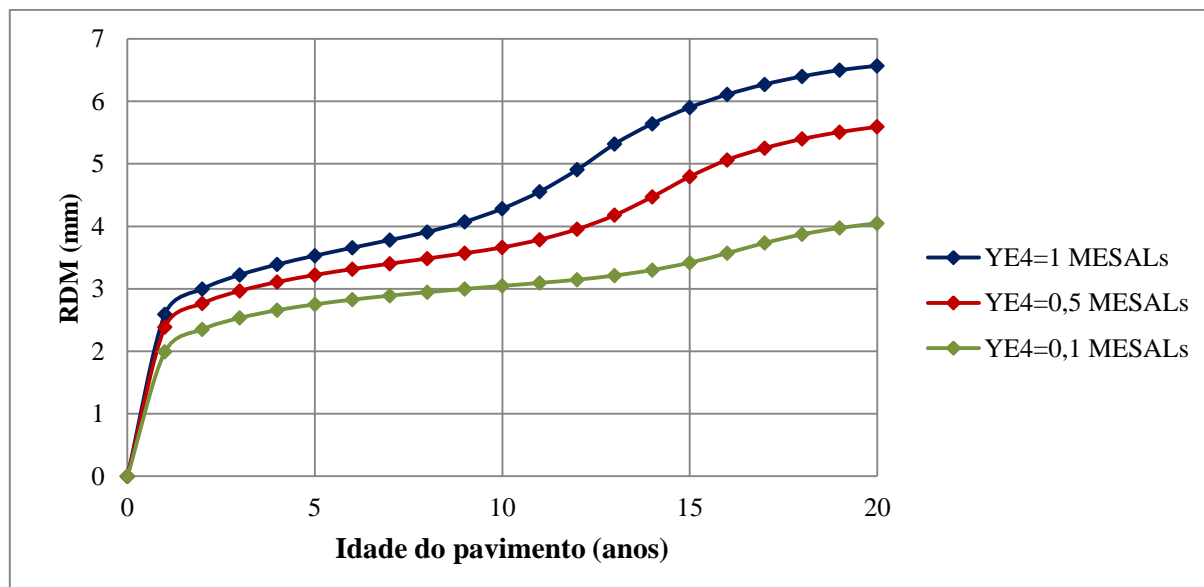
O tráfego é um parâmetro que está relacionado com a capacidade estrutural do pavimento e para avaliar o seu efeito sobre o pavimento consideraram-se, como se pode observar no Quadro 5.4, três valores distintos de tráfego em MESALs por ano de um eixo-padrão de 80kN (designado YE4 nos modelos HDM). Nesse mesmo quadro apresentam-se, também, os restantes parâmetros utilizados para avaliar a variação do tráfego.

Na Figura 5.2 é possível observar a influência da variação do tráfego na profundidade média da rodeira.

**Quadro 5.4 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação do tráfego**

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALs)	Estrutura						COMP (%)	Consideração de Fendilhamento
					a			d	CBR (%)	SNC		
					BD	MB	SbG	SbG				
1	17,2	0,16	35/50	1	0,44	0,34	0,11	1	20	5,13	100	Sim
2				0,5								
3				0,1								

- PT – Temperatura do pavimento a 20 mm de profundidade;
- MMP – Precipitação média mensal;
- YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;
- a – Coeficiente estrutural;
- d – Coeficiente de drenagem;
- CBR – Índice Californiano de capacidade de carga (*California Bearing Ratio*);
- SNC – Número estrutural modificado;
- COMP – Índice de compactação relativa do pavimento;
- BD – Betão betuminoso em camada de desgaste;
- MB – Macadame betuminoso;
- SbG – Agregado britado de granulometria extensa em camada de sub-base.



**Figura 5.2 – Influência da variação do tráfego (YE4) na profundidade média da rodeira (RDM)**

Observa-se que o tráfego é, tal como o SNC, um parâmetro bastante importante no modelo HDM-4. Influencia tanto a deformação inicial como a fase de progressão. É evidente que quando o tráfego é muito forte agrava substancialmente os valores de cavado de rodeira (ver Figura 5.2).

Para que o efeito do tráfego não seja responsável pela formação e/ou agravamento das rodeiras é necessário garantir que o pavimento tenha uma estrutura suficiente para que consiga suportar as cargas a que está sujeito durante o seu período de vida útil.

### 5.1.3. Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros variáveis no modelo HDM-4 e, por isso, diferentes valores de temperatura vão levar a diferentes valores de rodeira.

Para ter em conta a ação da temperatura no modelo HDM-4 é necessário obter a temperatura do pavimento. Para isso, determinou-se, em primeiro lugar, a temperatura do ar para depois, através do ábaco apresentado na Figura 5.3, alcançar o valor da temperatura do pavimento.

Neste exercício, consideraram-se dois valores de temperatura distintos observáveis em Portugal Continental, o valor mínimo da temperatura média anual do ar de 5,4°C e o valor máximo de temperatura média anual do ar de 18°C. Estes valores foram retirados da Figura 5.4.

Com base no ábaco da Figura 5.3, tem-se:

- Para  $T_{ar} = 5,4^{\circ}C$ ,  $PT = 7,5^{\circ}C$ ;
- Para  $T_{ar} = 18^{\circ}C$ ,  $PT = 26,9^{\circ}C$ .

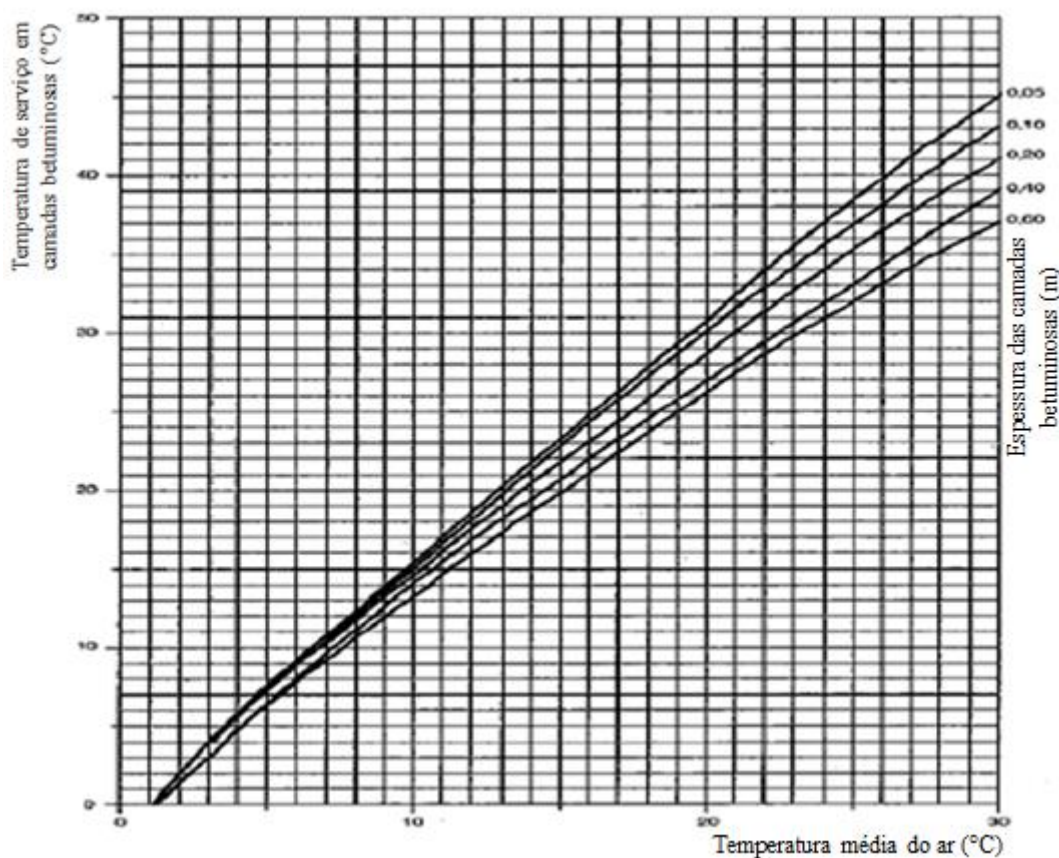


Figura 5.3 – Temperatura de serviço de camadas betuminosas (Branco, *et al.*, 2011)

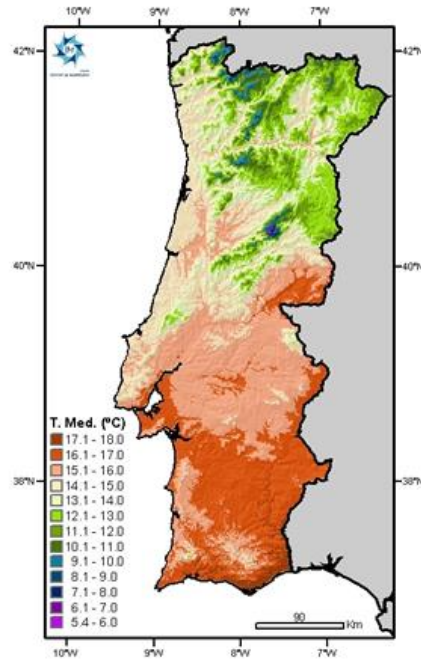


Figura 5.4 – Temperaturas médias anuais (IPMA, 2013)

No Quadro 5.5, estão apresentados os parâmetros que permitiram avaliar a influência da variação da temperatura do pavimento na profundidade média da rodeira.

Na Figura 5.5 apresenta-se a influência que a variação da temperatura do pavimento tem na profundidade média da rodeira.

Quadro 5.5 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação da temperatura

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALs)	Estrutura						COMP (%)	Consideração de Fendilhamento
					a			d	CBR (%)	SNC		
					BD	MB	SbG	SbG				
1	7,5	0,16	35/50	0,164	0,44	0,34	0,11	1	20	5,13	100	Sim
2	26,9											
3	45											

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 5.4.

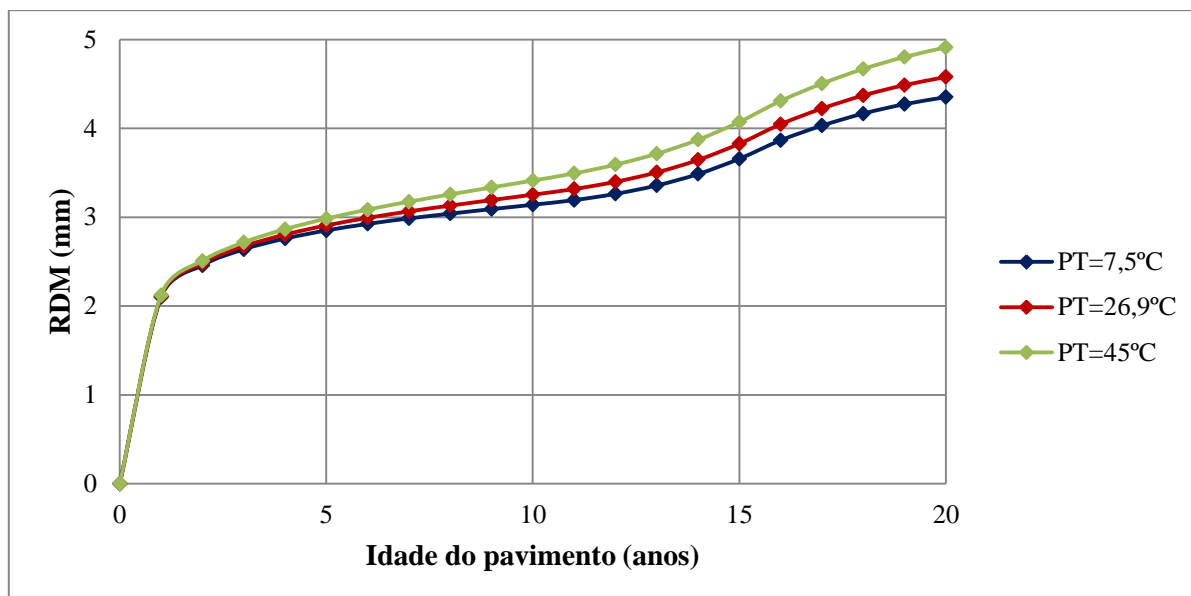


Figura 5.5 – Influência da variação da temperatura do pavimento (PT) na profundidade média da rodeira (RDM)

Conclui-se, observado a Figura 5.5, que a temperatura é um parâmetro que tem mais peso sobre a fase de progressão do que na deformação inicial. Constatou-se, também, que este não é um dos parâmetros que mais influencia o valor total médio de cavado de rodeira, uma vez que, na Figura 5.5, observa-se que, ao fim de 20 anos, apenas se obteve mais 0,3 mm de rodeira com um aumento de 19,4°C da temperatura do pavimento.

Apesar de no nosso país os pavimentos apenas atingirem em períodos limitados de tempo temperaturas da ordem dos 45°C, avaliou-se, também, o comportamento do pavimento considerado a essa gama de temperaturas. Ainda pela Figura 5.5, verifica-se que, mesmo para uma gama de temperaturas elevada, o cavado de rodeira que se obtém não apresenta um aumento proporcional ao aumento de PT. Outros parâmetros, como o número estrutural modificado do pavimento e o tráfego, já abordados anteriormente, têm muito mais peso sobre a profundidade média da rodeira.

#### 5.1.4. Teor em água

O teor em água é, tal como os restantes, um parâmetro variável no modelo HDM-4 e, por isso, influencia o valor de rodeira. No HDM-4 o teor em água reflete-se sobre três aspetos:

- Precipitação;
- Eficiência do sistema de drenagem;
- Profundidade do nível freático.

##### ➤ Precipitação

Para avaliar a variação da precipitação no HDM-4 selecionaram-se três valores diferentes de precipitação com base na Figura 5.6.

Com base nessa figura, escolheram-se os seguintes valores de precipitação:

- Precipitação elevada = 3200 mm = 0,27 m/mês;
- Precipitação média = 1900 mm = 0,16 m/mês;

- Precipitação baixa = 600 mm = 0,05 m/mês.

No Quadro 5.6, apresentam-se os parâmetros utilizados que permitiram avaliar a influência da variação da precipitação na profundidade média da rodeira.

Na Figura 5.7 apresenta-se a influência que a variação da precipitação tem sobre o valor da profundidade média da rodeira.

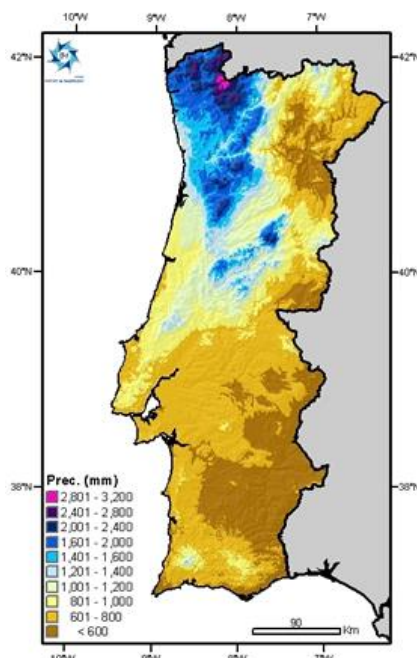


Figura 5.6 – Precipitações acumuladas anuais (IPMA, 2013)

Quadro 5.6 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação da precipitação

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALS)	Estrutura					COMP (%)	Consideração de Fendilhamento	
					a			d	CBR (%)			SNC
					BD	MB	SbG	SbG				
1	17,2	0,27	35/50	0,164	0,44	0,34	0,11	1	20	5,13	100	Sim
2		0,16										
3		0,05										

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 5.4.

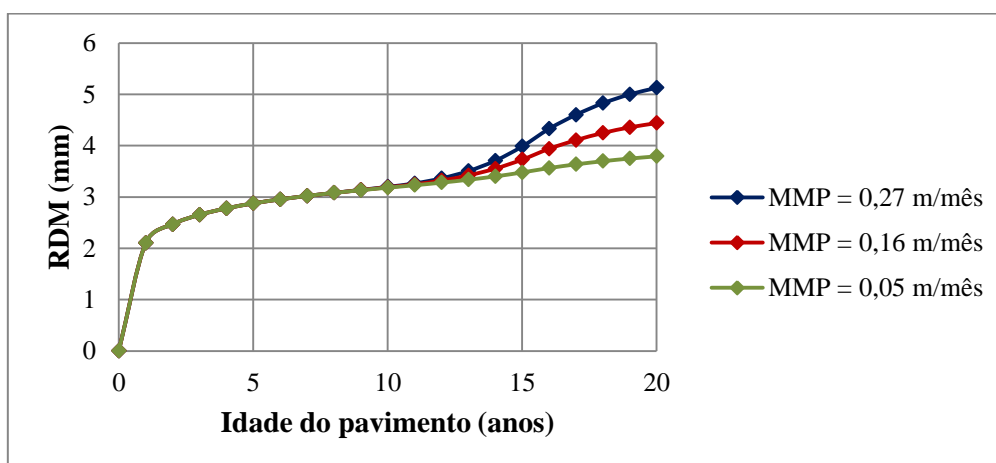


Figura 5.7 – Influência da variação da precipitação (MMP) na profundidade média da rodeira (RDM)

Observa-se, na Figura 5.7, que só a partir dos 11 anos de idade do pavimento em estudo, a precipitação começou a ser responsável pelo aumento das rodeiras uma vez que só a partir dessa altura é que se começou a formar fendilhamento no pavimento com alguma gravidade. A água da chuva apenas prejudica o pavimento quando se infiltra pelas fendas causando a origem e/ou o agravamento de rodeiras, tanto maiores quanto mais elevados são os valores de precipitação.

➤ Eficiência do sistema de drenagem

Como se pode observar no Anexo B, Quadro B. 2 a qualidade do sistema de drenagem e o tempo a que o pavimento está exposto à precipitação reflete-se, no modelo HDM-4, sobre os valores dos coeficientes de drenagem das camadas granulares.

Tendo em conta a informação do Quadro B. 2, consideraram-se quatro situações diferentes para entender de que forma é que a eficiência do sistema de drenagem e o tempo a que o pavimento está exposto à precipitação influencia os valores de cavado de rodeira de um pavimento. As quatro situações selecionadas estão descritas no Quadro 5.7.

**Quadro 5.7 – Descrição das 4 situações consideradas**

Sistema de Drenagem			
Situação	Eficiência	Tempo de exposição a teores de humidade próximos ao de Saturação (%)	Coefficiente de drenagem (d)
1	Muito eficiente	< 1%	1,38
2	Muito eficiente	> 25%	1,2
3	Ineficiente	< 1%	1
4	Ineficiente	> 25%	0,4

No Quadro 5.8, apresentam-se os parâmetros utilizados em cada situação considerada e apresentada no Quadro 5.7 que permitiram avaliar a influência da variação da eficiência do sistema de drenagem e do tempo de exposição a teores de humidade próximos ao de saturação na profundidade média da rodeira. A influência dessas quatro situações diferentes no valor médio de cavado de rodeira encontra-se representada na Figura 5.8.

**Quadro 5.8 – Parâmetros utilizados nas 4 situações**

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALs)	Estrutura						COMP (%)	Consideração de Fendilhamento
					a			d	CBR (%)	SNC		
					BD	MB	SbG	SbG				
1	17,2	0,009	35/50	0,164	0,44	0,34	0,11	1,38	20	5,46	100	Sim
2		0,23						1,2		5,31		
3		0,009						1		5,13		
4		0,23						0,4		4,61		

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 5.4.

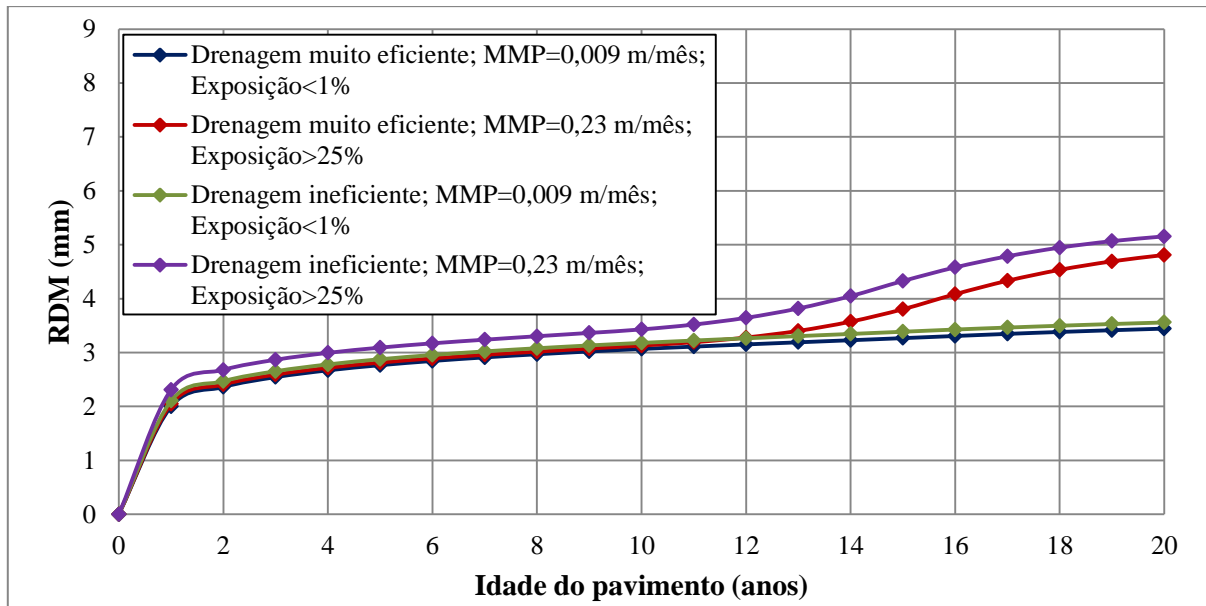


Figura 5.8 – Influência da variação da eficiência do sistema de drenagem e do tempo a que o pavimento está exposto à precipitação na profundidade média da rodeira (RDM)

Constata-se, a partir da Figura 5.8, que entre a eficiência do sistema de drenagem e o tempo a que o pavimento está exposto à precipitação, o parâmetro que mais influencia o valor médio de profundidade da rodeira é o segundo uma vez que, independentemente do sistema de drenagem, os maiores valores médios de cavado de rodeira observam-se em locais onde existem períodos de chuva intensos (> 25%). Mesmo assim, é fundamental garantir que os pavimentos tenham sistemas de drenagem eficientes sobretudo em locais com maior exposição à precipitação.

➤ Profundidade do nível freático

Segundo o Quadro 5.9, a profundidade do nível freático influencia o valor de CBR, uma vez que quanto mais água tiver o solo de fundação, menor é o valor de CBR, ou seja, menos resistente é o solo.

Quadro 5.9 – Valores estimados de CBR (N. D. Lea International Ltd, 1995)

Profundidade do nível freático a partir do nível de formação (m)	Valores de CBR (%)
	Argila arenosa IP=10
0,5	8-14
1	15-29
2	15-29
3	> 30

CBR – Índice Californiano de capacidade de carga (*California Bearing Ratio*);  
IP – Índice de plasticidade.

Para entender o peso que a profundidade do nível freático tem sobre o valor médio de cavado de rodeira consideraram-se dois valores diferentes para a profundidade do nível freático:

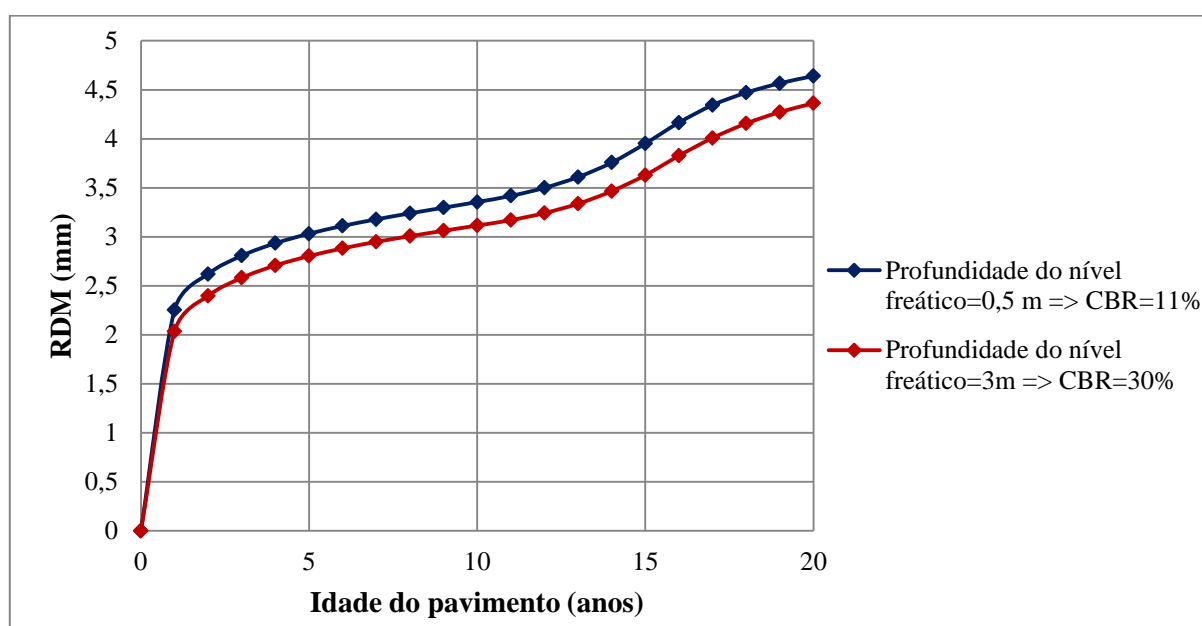
- Profundidade do nível freático = 0,5 m, que corresponde a um valor médio de CBR = 11%;
- Profundidade do nível freático = 3 m, que corresponde a um valor médio de CBR = 30%.

Os parâmetros utilizados que permitiram avaliar a influência da variação da profundidade do nível freático na profundidade média da rodeira encontram-se no Quadro 5.10 e a influência que a variação da profundidade do nível freático tem sobre a profundidade média da rodeira apresenta-se na Figura 5.9.

**Quadro 5.10 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação da profundidade do nível freático**

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALs)	Estrutura						COMP (%)	Consideração de Fendilhamento
					a			d	CBR (%)	SNC		
					BD	MB	SbG	SbG				
1	17,2	0,16	35/50	0,164	0,44	0,34	0,11	1	11	4,74	100	Sim
2									30	5,34		Não

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 5.4.



**Figura 5.9 – Influência da variação da profundidade do nível freático na profundidade média da rodeira (RDM)**

Apesar de a profundidade do nível freático não influenciar significativamente a profundidade média da rodeira, tem peso tanto na deformação inicial como na fase de progressão. Observa-se, também, que a fundação é tanto mais resistente (valores de CBR mais elevados) quanto mais profundo for o nível freático levando, por isso, a menores valores de cavado de rodeira.

Embora o efeito do teor em água, em cada um dos três aspetos analisados (precipitação, eficiência do sistema de drenagem e profundidade do nível freático), não seja muito significativo, quando considerados em conjunto podem alterar de forma importante o valor de cavado de rodeira.

### 5.1.5. Tipo de betume

Em Portugal é usual utilizarem-se, para misturas betuminosas a quente, os dois tipos de betume seguintes:

- Betume 35/50;

- Betume 50/70.

Este é um parâmetro importante no modelo HDM-4 porque nele considera-se, para o cálculo da profundidade média da rodeira, a contribuição da temperatura de amolecimento do betume utilizado no pavimento. Calculou-se, por esse motivo, a temperatura de amolecimento correspondente aos dois tipos de betume referidos anteriormente. Para isso, utilizaram-se os dados apresentados no Quadro 5.11 e as expressões seguintes (Branco, *et al.*, 2011):

$$(\text{pen}_{25})_r = 0,65 \times (\text{pen}_{25})_i \quad (5.3)$$

$$(T_{ab})_r = 98,4 - 26,4 \times \log(\text{pen}_{25})_r \quad (5.4)$$

Onde:

$(\text{pen}_{25})_r$  – Penetração a 25°C no betume recuperado de misturas betuminosas após aplicação (0,1 mm);

$(\text{pen}_{25})_i$  – Penetração inicial a 25°C inicial no betume (0,1 mm);

$(T_{ab})_r$  – Temperatura de amolecimento do betume recuperado de misturas betuminosas após aplicação (°C).

**Quadro 5.11 – Propriedades tabeladas dos dois tipos de betume considerados**

Betume	Valores de $(\text{pen}_{25})_i$ (CEN, 1999)	
	Valor tabelado	Valor médio
35/50	35 a 50	42,5
50/70	50 a 70	60,0

$(\text{pen}_{25})_i$  – Penetração inicial a 25°C inicial no betume (0,1 mm)

No Quadro 5.12 apresentam-se as propriedades calculadas, dos dois tipos de betume considerados, através das equações (5.3) e (5.4).

**Quadro 5.12 – Propriedades calculadas dos tipos de betume considerados**

Betume	Valores previstos após aplicação	
	$(\text{pen}_{25})_r$	$(T_{ab})_r$
35/50	27,6	60,4
50/70	39,0	56,4

$(\text{pen}_{25})_r$  – Penetração a 25°C no betume recuperado de misturas betuminosas após aplicação (0,1 mm);

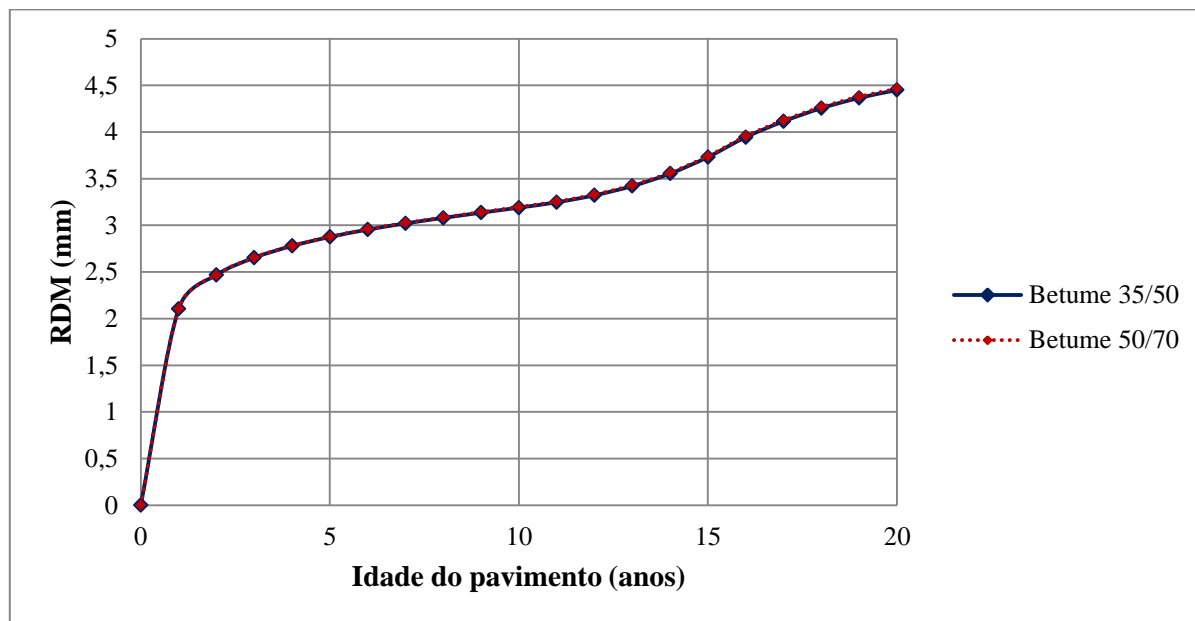
$(T_{ab})_r$  – Temperatura de amolecimento do betume recuperado de misturas betuminosas após aplicação (°C).

Os parâmetros utilizados para avaliar a influência da variação do tipo de betume na profundidade média da rodeira encontram-se no Quadro 5.13. O gráfico da Figura 5.10 mostra a influência que o tipo de betume utilizado tem sobre a formação das rodeiras de um dado pavimento.

**Quadro 5.13 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação do tipo de betume**

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALs)	Estrutura						COMP (%)	Consideração de Fendilhamento	
					a			d		CBR (%)			SNC
					BD	MB	SbG	SbG					
1	17,2	0,16	35/50	0,164	0,44	0,34	0,11	1	20	5,13	100	Sim	
2			50/70										

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 5.4.



**Figura 5.10 – Influência do tipo de betume na profundidade média da rodeira (RDM)**

Segundo a Figura 5.10, o tipo de betume utilizado é um parâmetro que pouco influencia o valor da profundidade média da rodeira.

### 5.1.6. Compactação relativa

A compactação relativa de um solo visa principalmente (Quaresma, 2012):

- Aumento da coesão e do atrito interno dos solos, garantindo um aumento da resistência ao corte e uma maior capacidade de suporte;
- Redução das variações volumétricas, resultantes da ação de cargas e da ação da água;
- Impermeabilização dos solos, garantida pela redução do coeficiente de permeabilidade.

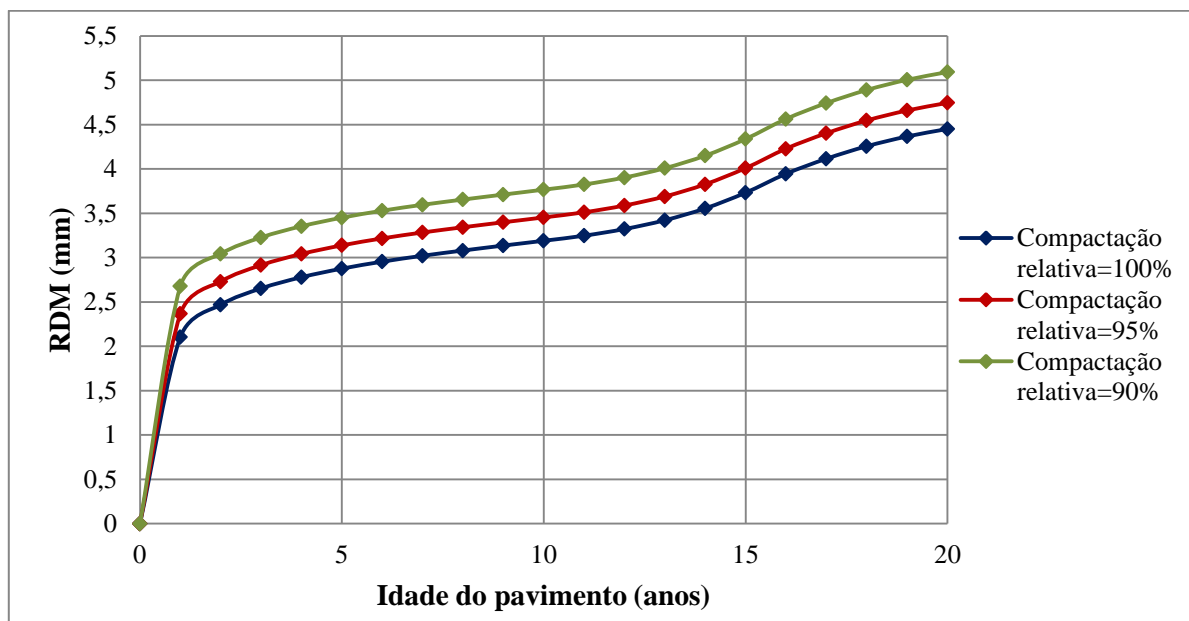
Os três pontos referidos são importantes porque permitem melhorar as características dos materiais que constituem a camada de leito de pavimento.

Para se poder construir o gráfico da Figura 5.11 foi necessário considerar os parâmetros que estão representados no Quadro 5.14.

**Quadro 5.14 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação da compactação relativa**

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALs)	Estrutura						COMP (%)	Consideração de Fendilhamento	
					a			d		CBR (%)			SNC
					BD	MB	SbG	SbG					
1	17,2	0,16	35/50	0,164	0,44	0,34	0,11	1	20	5,13	100	Sim	
2											95		
3											90		

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 5.4.



**Figura 5.11 – Influência da variação da compactação relativa na profundidade média da rodeira (RDM)**

A Figura 5.11 mostra que mesmo para uma diferença de 10% de compactação relativa aplicada obtêm-se valores de cavado de rodeira com uma diferença de 0,64 mm. Isto permite concluir que este é um parâmetro que deve ser tido em conta com alguma importância e que é vantajoso garantir a máxima compactação relativa possível. Apesar de o caderno de encargos da EP exigir para a generalidade das camadas pelo menos um grau de compactação relativa de 97% (EP, 2009b) deve-se garantir, sempre que possível, um grau de 100%, porque, como se observou na Figura 5.11, um pequeno aumento da compactação relativa garante alguma redução do cavado de rodeira.

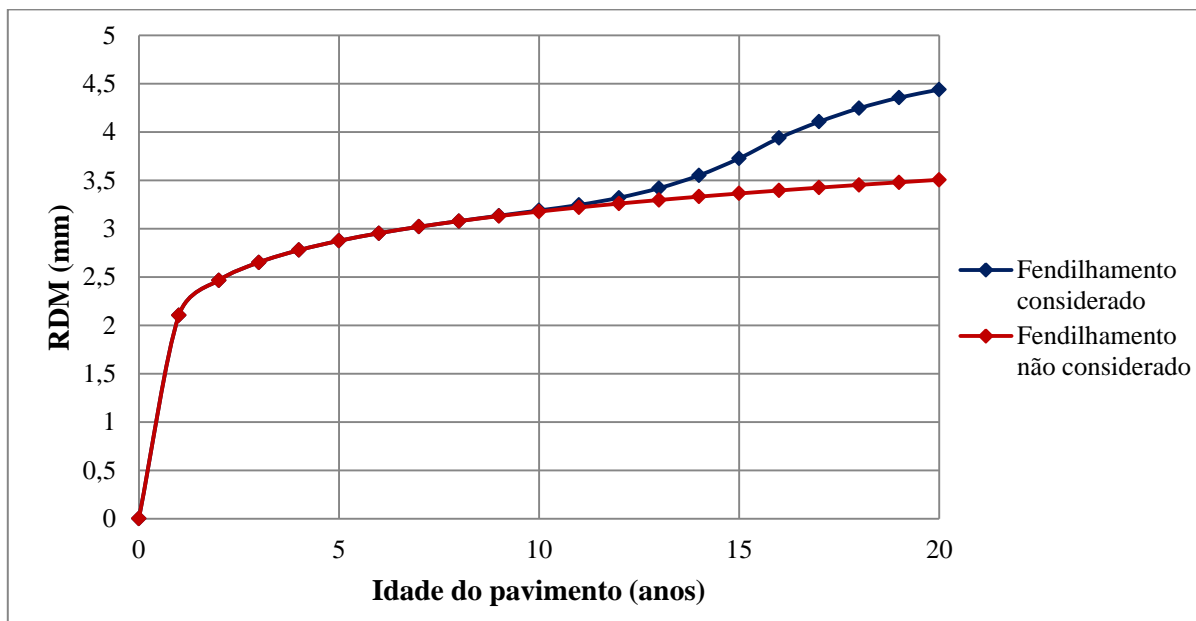
### 5.1.7. Fendilhamento

Quando o fendilhamento ocorre nos pavimentos flexíveis a água da chuva infiltra-se pelas fendas causando o aparecimento e/ou agravamento de rodeiras. Para avaliar a influência do fendilhamento na profundidade média da rodeira, construiu-se o gráfico da Figura 5.12. No Quadro 5.15, estão apresentados os valores dos restantes parâmetros utilizados que permitiram calcular o valor médio de cavado de rodeira ao fim de cada ano.

**Quadro 5.15 – Parâmetros utilizados para avaliar a variação do fendilhamento**

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	YE4 (MESALs)	Estrutura						COMP (%)	Consideração de Fendilhamento	
					a			d		CBR (%)			SNC
					BD	MB	SbG	SbG					
1	17,2	0,16	35/50	0,164	0,44	0,34	0,11	1	20	5,13	100	Sim	
2												Não	

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 5.4.



**Figura 5.12 – Influência do fendilhamento na profundidade média da rodeira (RDM)**

Verifica-se na Figura 5.12 que a entrada de água pelas fendas agrava o valor da profundidade média da rodeira. No caso em estudo, ao fim de 20 anos, observa-se que um pavimento com fendilhamento apresenta mais 0,91 mm de rodeira do que um pavimento com as mesmas características mas sem fendilhamento.

## 5.2. Secções avaliadas

Tal como foi referido na metodologia deste capítulo (subcapítulo 4.2) recorreu-se a uma base de dados fornecida pela EP e escolheram-se sete secções aleatórias com diferentes níveis de gravidade do distrito de Setúbal e efetuaram-se visitas a cada uma delas. No Quadro 5.16 apresenta-se informação detalhada sobre as sete secções visitadas.

Quadro 5.16 – Lista das 7 secções visitadas

Número da Secção Visitada	Nome da Secção Visitada	Sentido	Distrito da Secção Visitada	Extensão da Secção Visitada (km)	Início (km)	Fim (km)
1	E527	Decrescente	Setúbal	0,593	10,407	11
2	E556	Decrescente		6,88	3,95	10,83
3	E749	Decrescente		9,77	10,83	20,6
4	E211	Crescente		3,33	19,59	22,92
5	E237	Crescente		11,557	60,93	72,487
6	E428	Decrescente		2,057	42,2	44,257
7	E708	Decrescente		7,31	14,8	22,11

Os dados fornecidos pela EP encontram-se referidos já de seguida.

### 5.2.1. Dados fornecidos pela EP

Para cada uma das secções presentes na base de dados fornecida pela EP, os dados fornecidos foram os seguintes:

- Localização da secção;
- Caracterização da fundação através do valor de CBR (em %);
- Tráfego médio diário anual (TMDA), tráfego médio diário anual de veículos pesados (TMDA<sub>p</sub>) e fator de agressividade ( $\alpha$ );
- Histórico detalhado das diferentes camadas (ano de execução, tipo de materiais utilizados, espessura e local onde foram efetuadas) que constituem os pavimentos de cada uma das secções, desde o ano de construção da primeira camada até à última intervenção/reparação efetuada nas secções;
- Fendilhamento observado e reparações efetuadas nos anos 2003, 2007, 2010 e 2011;
- Rodeiras medidas no ano 2011 com um perfilómetro constituído por 14 lasers, nomeadamente, os valores de cavado de rodeira em intervalos de 10 em 10 m e de 100 em 100 m no bordo esquerdo e direito da via e o valor médio de cavado de rodeira (resultado da média entre o cavado de rodeira medido no bordo direito e o medido do lado esquerdo).

Como o modelo do fio (algoritmo utilizado pela EP para determinar o valor do cavado de rodeira) é compatível com o da régua de 2 m (algoritmo utilizado nas previsões dos modelos HDM e Austroads) admite-se que os resultados de ambos os modelos são idênticos sendo, por isso, diretamente comparáveis.

### 5.2.2. Homogeneidade

#### ➤ Divisão das secções em subsecções homogéneas

Para avaliar a homogeneidade das sete secções visitadas utilizou-se a técnica das “Diferenças Acumuladas”, apresentada e explicada no subcapítulo 2.4 desta dissertação, que consiste em construir um gráfico com os valores acumulados de cavado de rodeira ao longo das secções (Fridtjof, 2004). Depois de calculados os valores acumulados construíram-se os respetivos gráficos para depois serem

definidas subsecções homogéneas. A determinação de subsecções consideradas homogéneas permitiu identificar com mais facilidade possíveis fatores responsáveis pela formação de degradações.

Como já foi referido anteriormente os valores de cavado de rodeira foram registados de 10 em 10 m e de 100 em 100 m. Para a elaboração dos gráficos optou-se por seleccionar o intervalo de 10 m nas secções mais curtas e o intervalo de 100 m nas secções mais longas. Posto isto, apresenta-se no Quadro 5.17 os intervalos adotados para cada secção.

Quadro 5.17 – Intervalos adotados para as 7 secções visitadas

Número da Secção Visitada	Nome da Secção Visitada	Sentido	Tipo de secção	Intervalo Adotado
1	E527	Decrescente	Curta	10 m
2	E556	Decrescente	Longa	100 m
3	E749	Decrescente	Longa	100 m
4	E211	Crescente	Longa	100 m
5	E237	Crescente	Longa </td <td>100 m</td>	100 m
6	E428	Decrescente	Curta	10 m
7	E708	Decrescente	Longa	100 m

Na Figura 5.13 apresenta-se o gráfico realizado para a secção E527.

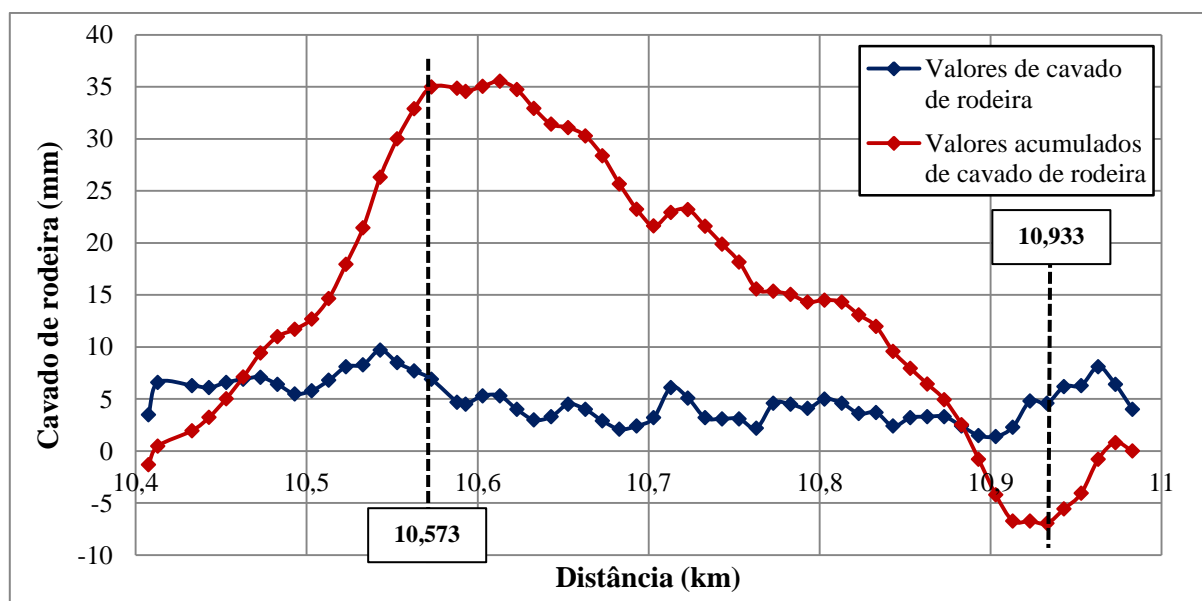


Figura 5.13 – Homogeneidade da secção E527

Observa-se na Figura 5.13 que a divisão da secção E527 em subsecções homogéneas quando se consideram os valores acumulados de cavado de rodeira medidos ao longo de toda a secção permite detetar com mais facilidade o zonamento.

Para esta secção, definiram-se 3 subsecções homogéneas. Essas subsecções estão referidas no Quadro 5.18.

Quadro 5.18 – Definição das 3 subsecções homogêneas da secção E527

Nome da Seção	Nome da Subsecção	Início (km)	Fim (km)	Valor médio de cavado de rodeira (mm)	Desvio padrão (mm)
E527	A	10,408	10,573	6,87	1,38
	B	10,588	10,933	3,65	1,15
	C	10,943	10,983	6,20	1,46

As Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 representam os gráficos realizados para as restantes seis secções e os Quadros 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 mostram as subsecções definidas.

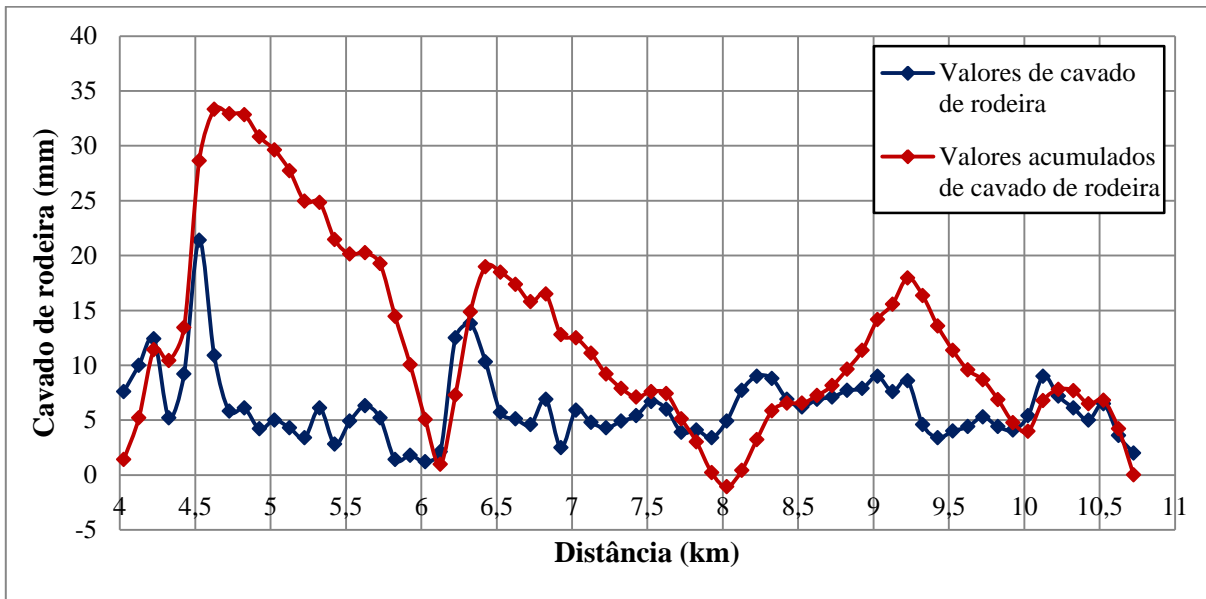


Figura 5.14 – Homogeneidade da secção E556

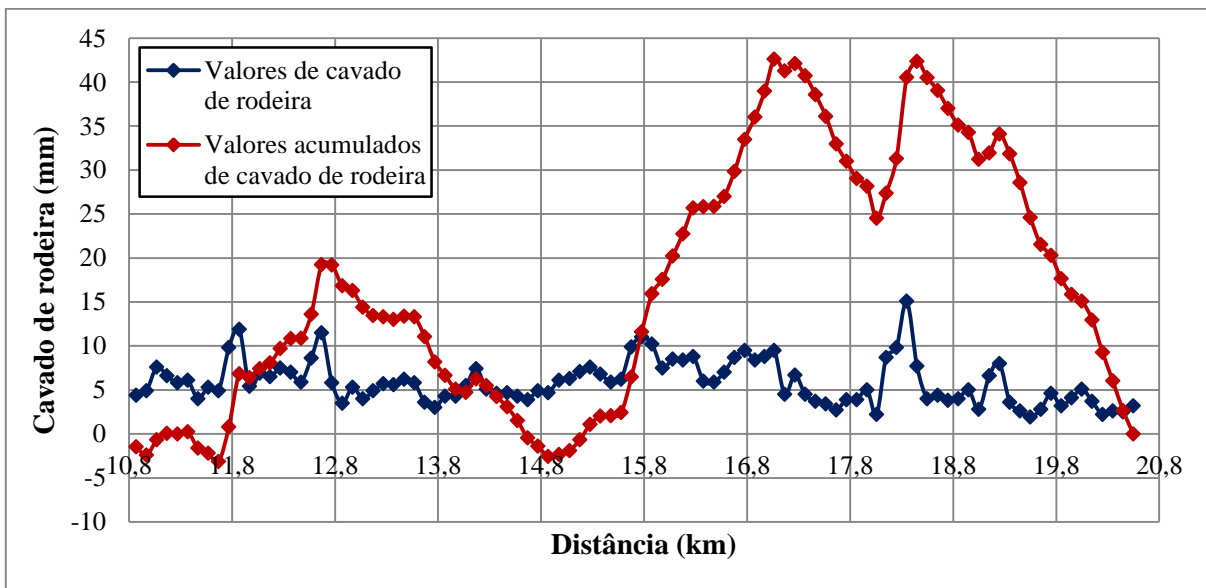


Figura 5.15 – Homogeneidade da secção E749

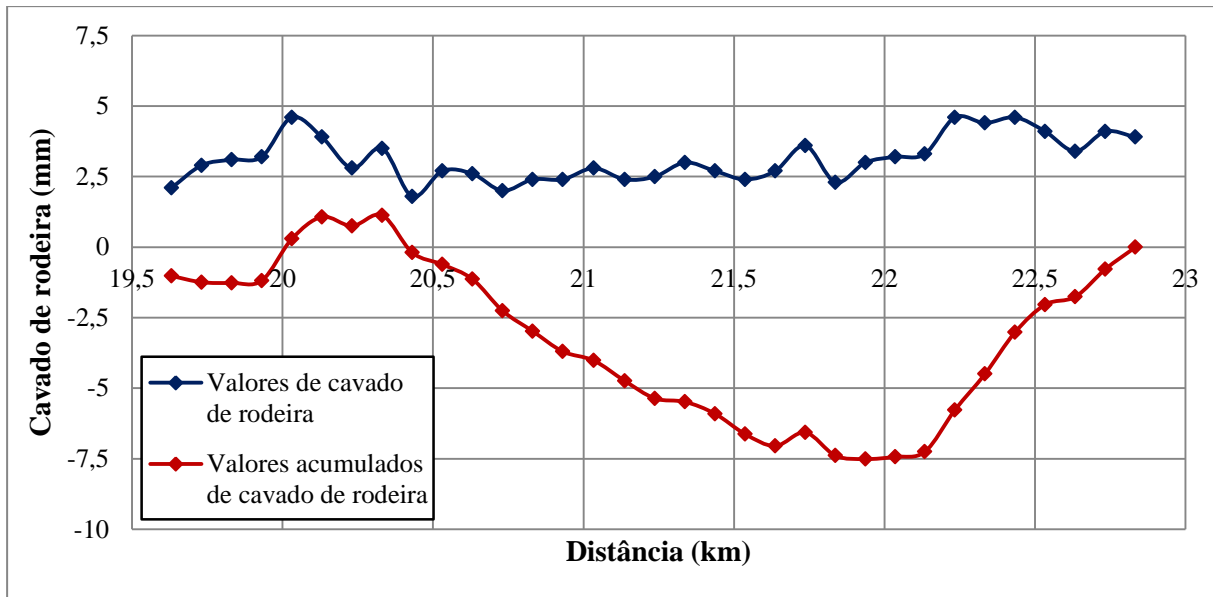


Figura 5.16 – Homogeneidade da seção E211

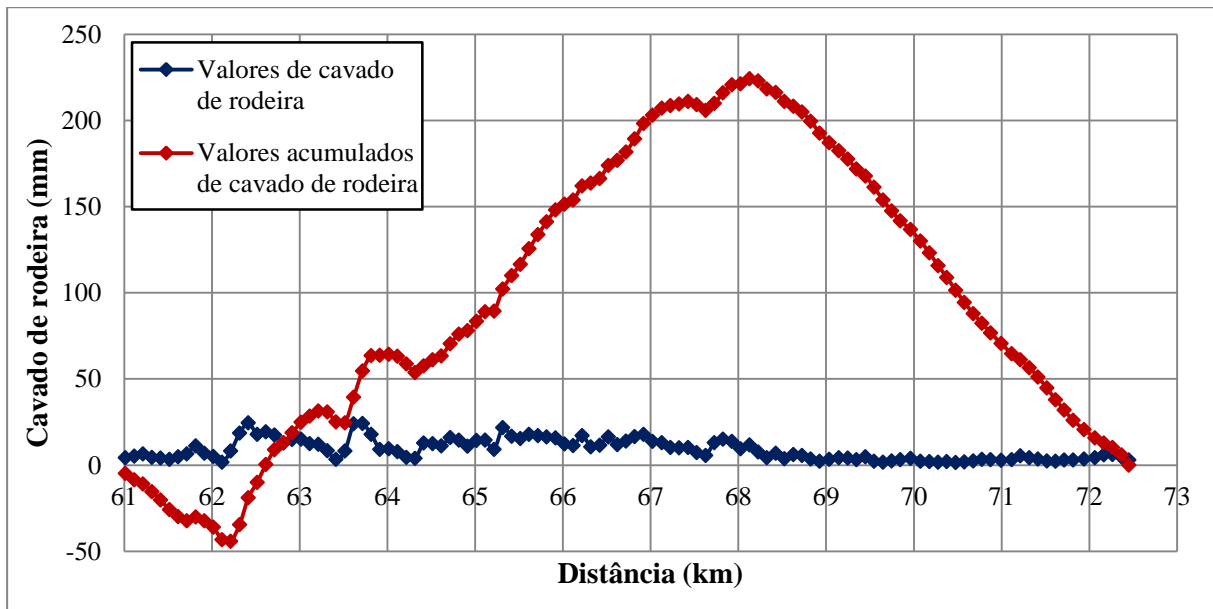


Figura 5.17 – Homogeneidade da seção E237

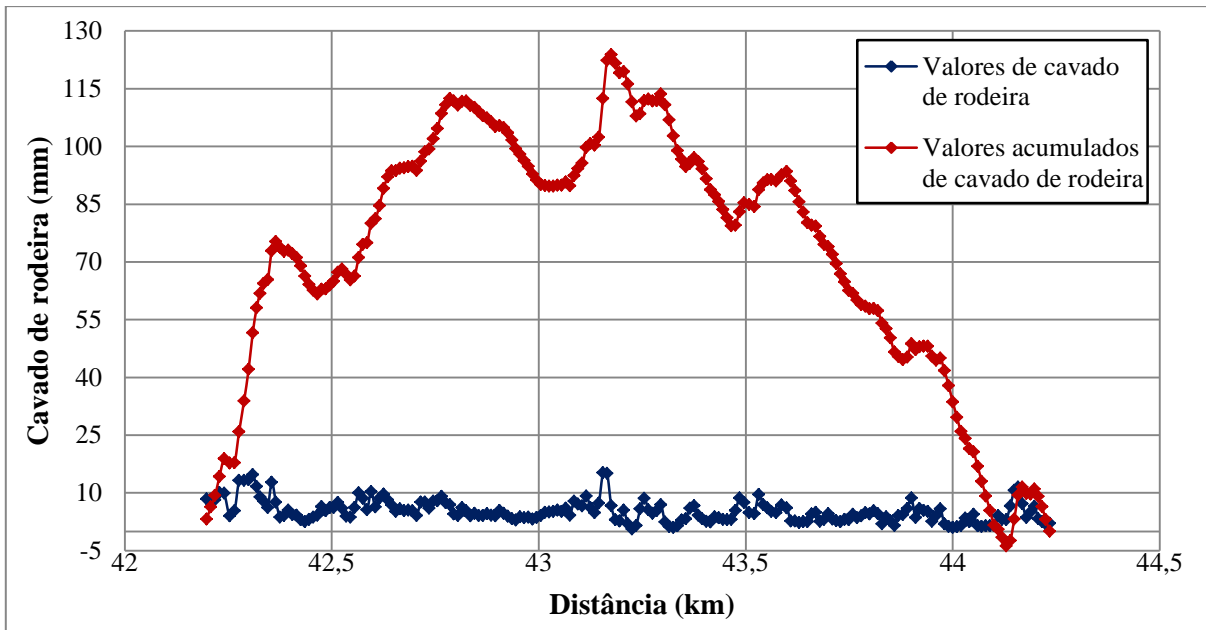


Figura 5.18 – Homogeneidade de secção E428

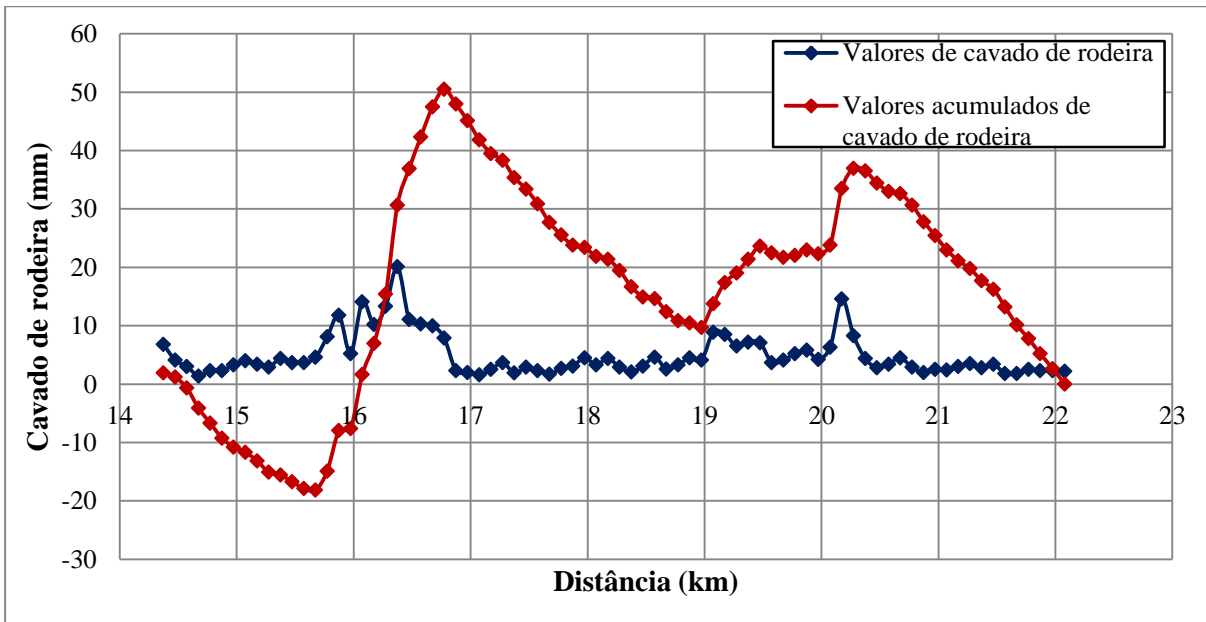


Figura 5.19 – Homogeneidade da secção E708

**Quadro 5.19 – Definição das 6 subsecções homogéneas da secção E556**

Nome da Secção	Nome da Subsecção	Início (km)	Fim (km)	Valor médio de cavado de rodeira (mm)	Desvio padrão (mm)
E556	A	4,026	4,626	10,96	5,16
	B	4,726	6,126	4,04	1,80
	C	6,226	6,426	12,20	1,77
	D	6,526	8,026	4,94	1,17
	E	8,126	9,226	7,78	0,92
	F	9,326	10,726	5,00	1,71

**Quadro 5.20 – Definição das 6 subsecções homogéneas da secção E749**

Nome da Secção	Nome da Subsecção	Início (km)	Fim (km)	Valor médio de cavado de rodeira (mm)	Desvio padrão (mm)
E749	A	10,870	12,670	6,87	2,22
	B	12,770	14,870	4,87	1,01
	C	14,974	17,264	7,72	1,65
	D	17,364	18,056	3,66	0,91
	E	18,149	18,449	10,33	3,30
	F	18,549	20,549	3,84	1,47

**Quadro 5.21 – Definição das 3 subsecções homogéneas da secção E211**

Nome da Secção	Nome da Subsecção	Início (km)	Fim (km)	Valor médio de cavado de rodeira (mm)	Desvio padrão (mm)
E211	A	19,631	20,331	3,26	0,75
	B	20,431	22,134	2,66	0,45
	C	22,234	22,834	4,16	0,43

**Quadro 5.22 – Definição das 3 subsecções homogéneas da secção E237**

Nome da Secção	Nome da Subsecção	Início (km)	Fim (km)	Valor médio de cavado de rodeira (mm)	Desvio padrão (mm)
E237	A	61,016	62,216	5,53	2,38
	B	62,316	68,127	13,47	4,67
	C	68,227	72,451	3,59	1,50

**Quadro 5.23 – Definição das 9 subsecções homogéneas da secção E428**

Nome da Secção	Nome da Subsecção	Início (km)	Fim (km)	Valor médio de cavado de rodeira (mm)	Desvio padrão (mm)
E428	A	42,197	42,365	9,62	3,11
	B	42,375	42,465	3,83	0,84
	C	42,475	42,785	6,78	1,71
	D	42,795	43,075	4,41	0,83
	E	43,085	43,175	8,60	3,63
	F	43,185	43,355	3,58	2,29
	G	43,365	43,599	5,14	1,97
	H	43,609	44,129	3,36	1,56
	I	44,139	44,234	5,54	3,32

**Quadro 5.24 – Definição das 5 subsecções homogêneas da secção E708**

Nome da Secção	Nome da Subsecção	Início (km)	Fim (km)	Valor médio de cavado de rodeira (mm)	Desvio padrão (mm)
E708	A	14,374	15,674	3,56	1,29
	B	15,774	16,774	11,10	3,90
	C	16,874	18,974	3,00	0,95
	D	19,074	20,274	6,95	2,86
	E	20,374	22,080	2,81	0,79

➤ Comparação entre o valor médio de cavado de rodeira e o desvio padrão

Para algumas secções contidas na base de dados fornecida pela EP procurou-se estabelecer uma comparação entre o valor médio e o desvio padrão dos dados correspondentes a trechos de 10 m. Esta informação encontra-se no Anexo C, Quadros C. 1, C.2 e C. 3 e é ilustrada no gráfico da Figura 5.20.

Com os dados fornecidos pela EP fez-se uma previsão do valor médio e do desvio padrão através do modelo HDM-4, sendo os resultados apresentados no Anexo C, Quadro C. 4, C. 5 e C.6 e na Figura 5.21.

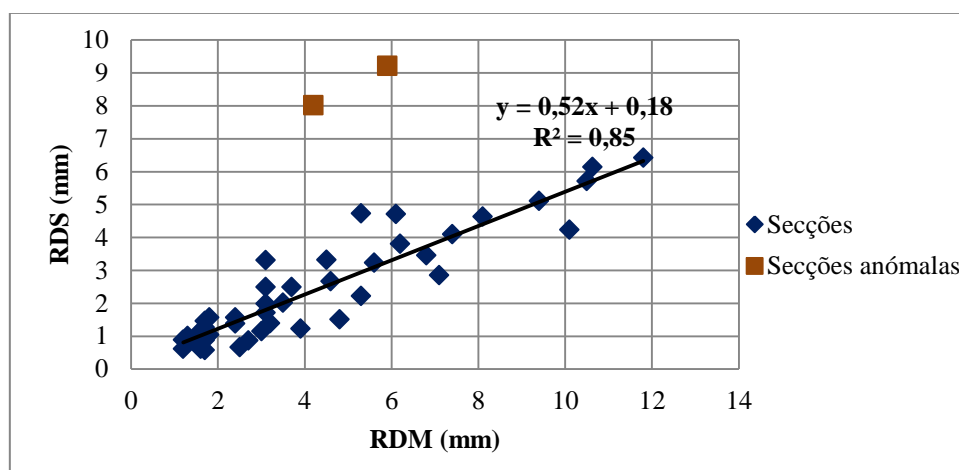


Figura 5.20 – Comparação entre o valor médio de cavado de rodeira (RDM) e o desvio padrão (RDS) medidos pela EP

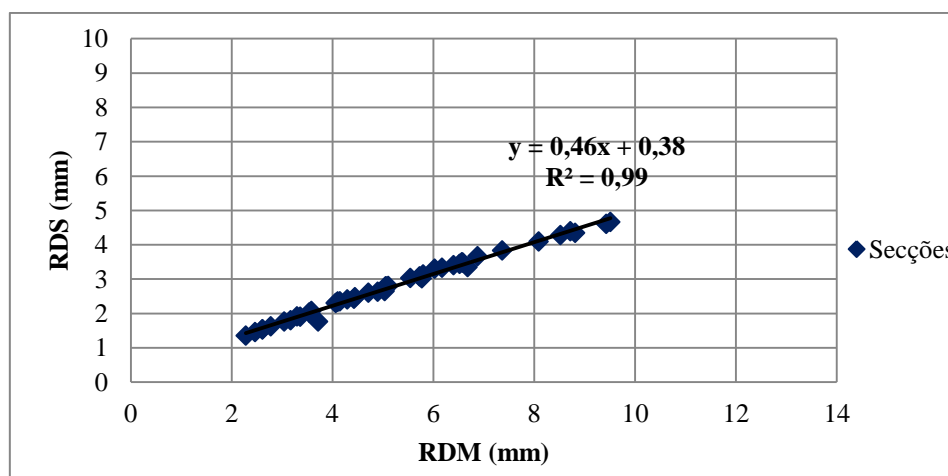


Figura 5.21 – Comparação entre o valor médio de cavado de rodeira (RDM) e o desvio padrão (RDS) obtidos pelo HDM-4

Observando as Figuras 5.20 e 5.21 verifica-se que, tanto com os valores medidos pela EP como os obtidos pelo HDM-4, o valor do desvio padrão é cerca de 50% do valor médio de cavado de rodeira (52% e 46%, respetivamente). Atendendo a que algumas secções foram objeto de uma divisão em subsecções homogéneas no presente subcapítulo foi também realizada para essas subsecções uma comparação entre o valor médio e o desvio padrão dos dados correspondentes, cujos valores se encontram nos Quadros 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 e é ilustrada no gráfico da Figura 5.22. Verifica-se que a divisão em subsecções homogéneas faz reduzir o quociente entre o desvio padrão e o valor médio de 50% para 31%.

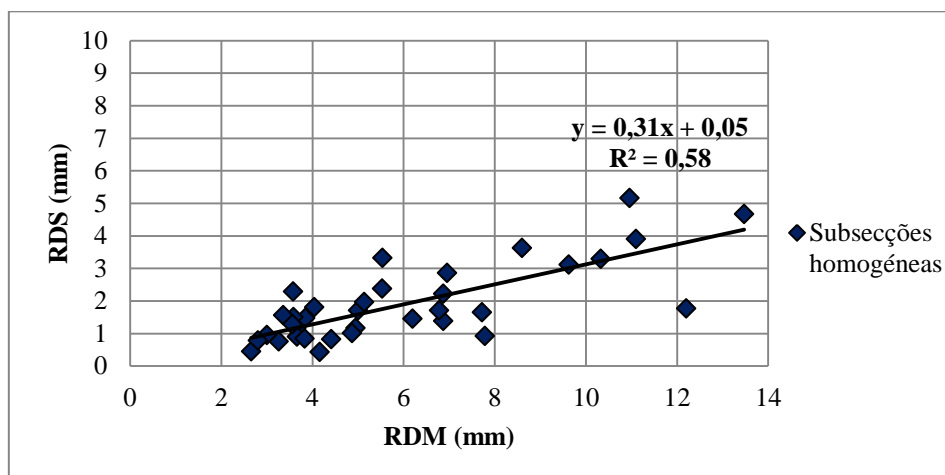


Figura 5.22 – Comparação entre o valor médio de cavado de rodeira (RDM) e o desvio padrão (RDS) das subsecções homogéneas

### 5.2.3. Tipo de distribuição

Este tópico tem como objetivo verificar se os valores de cavado de rodeira obedecem a uma distribuição normal ou log-normal (Kavussi, 2004). Para isso, utilizaram-se os valores de cavado de rodeira de 10 em 10 m fornecidos pela EP das três subsecções da secção E237 para se realizarem gráficos do tipo Quantil-Quantil (Q-Q). As três subsecções escolhidas estão apresentadas no Quadro 5.22. Nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 estão representados os gráficos Q-Q com os valores de profundidade de rodeira das subsecções, E237-A, E237-B e E237-C, respetivamente.

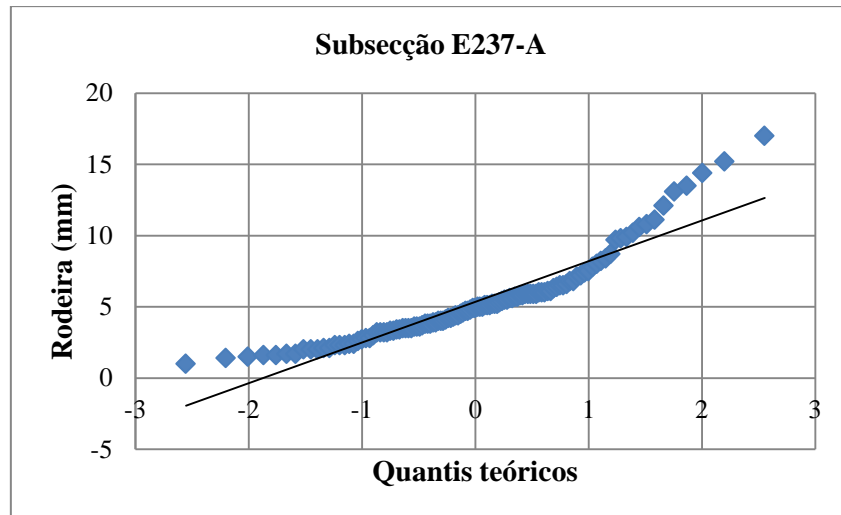


Figura 5.23 – Gráfico Q-Q com os valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-A

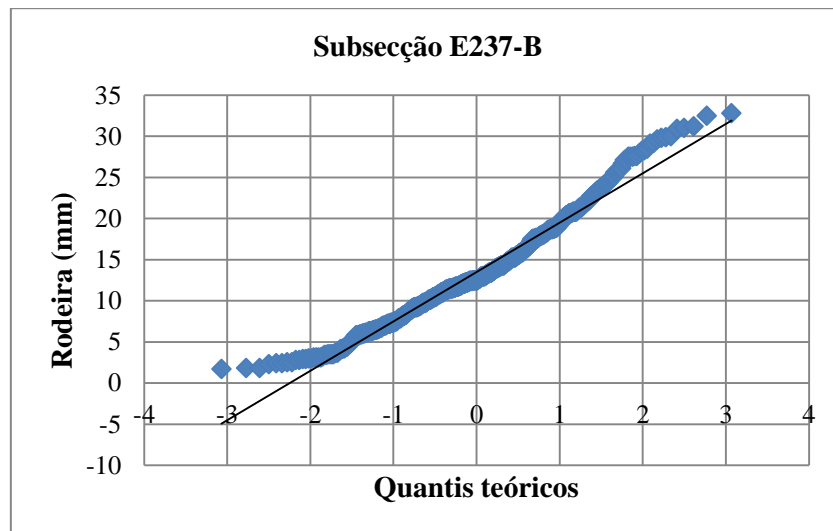


Figura 5.24 – Gráfico Q-Q com os valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-B

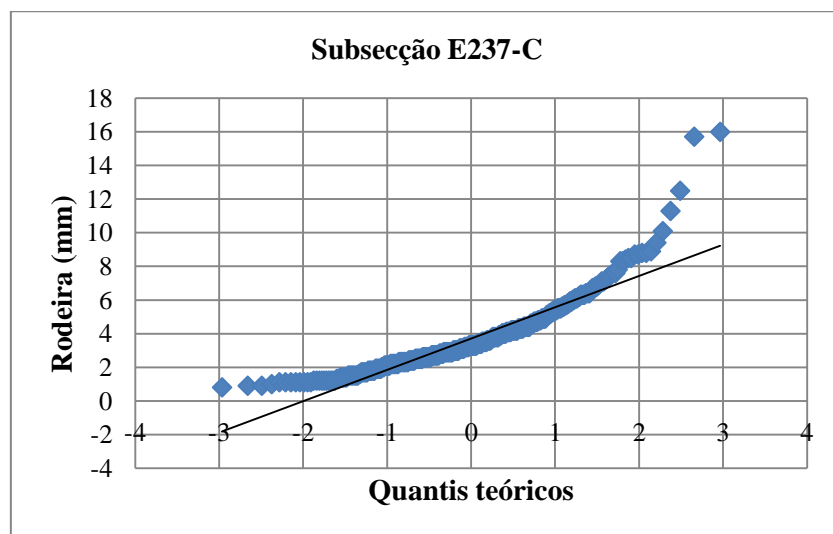


Figura 5.25 – Gráfico Q-Q com os valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-C

Observa-se na Figura 5.23 e na Figura 5.25 que os valores não têm uma distribuição normal devido ao facto de os mesmos se afastarem da linearidade.

Analisando os gráficos representados nessas duas figuras e comparando com a Figura 5.26, conclui-se que o desvio apresentado pelos valores de profundidade de rodeira é do tipo apresentado em (e), ou seja, desviado para a direita.

Quanto à Figura 5.24, observa-se que os valores de cavado de rodeira apresentam uma distribuição muito próxima da distribuição normal. Mesmo assim, consegue-se identificar um ligeiro desvio do tipo apresentado em (c) na Figura 5.26, denominado de cauda curta.

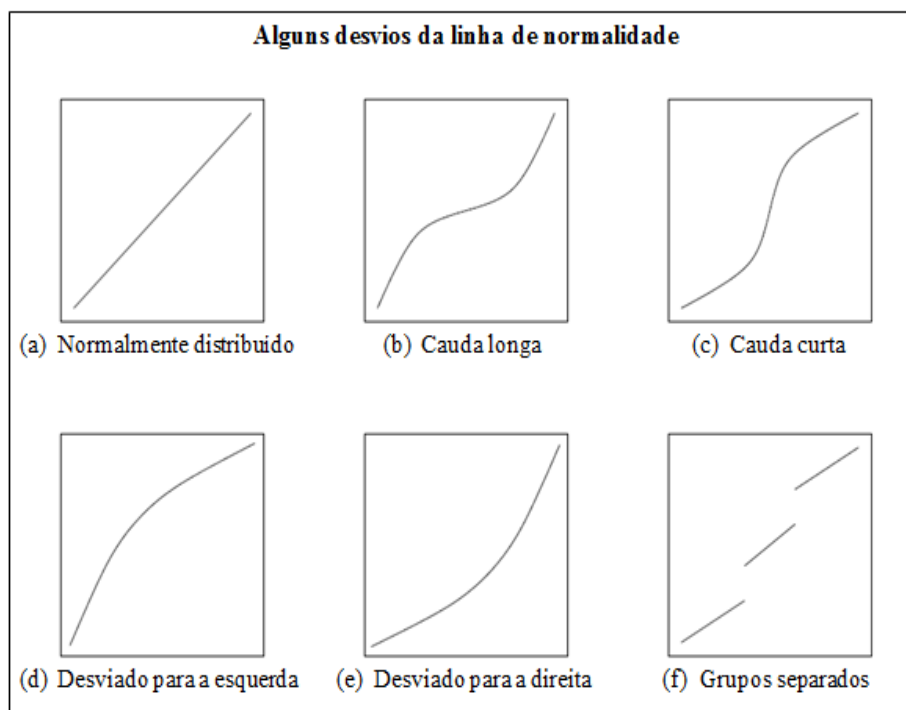


Figura 5.26 – Alguns desvios da linha de normalidade – adaptado de (Gerstman, 2008)

As próximas figuras (Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29) representam o traçado do mesmo tipo de gráfico apresentado anteriormente mas agora com o logaritmo neperiano ( $\ln$ ) dos valores de profundidade de rodeira das mesmas três subsecções.

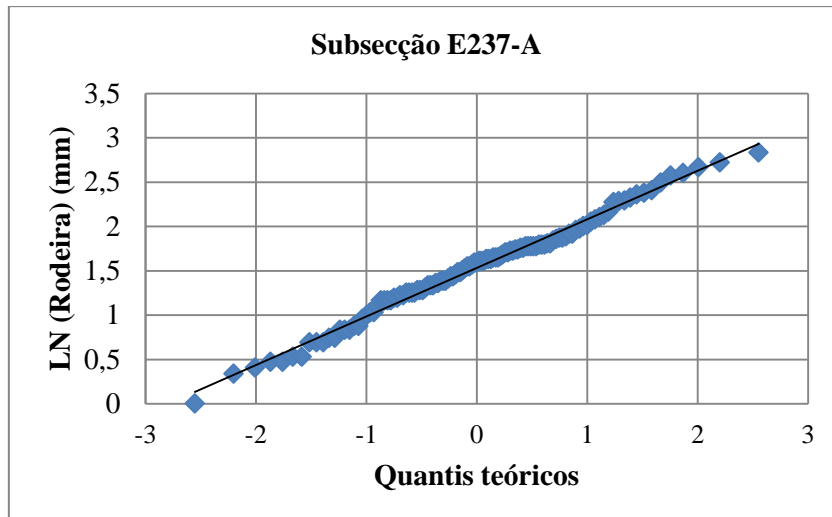


Figura 5.27 – Gráfico Q-Q com o logaritmo neperiano (ln) dos valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-A

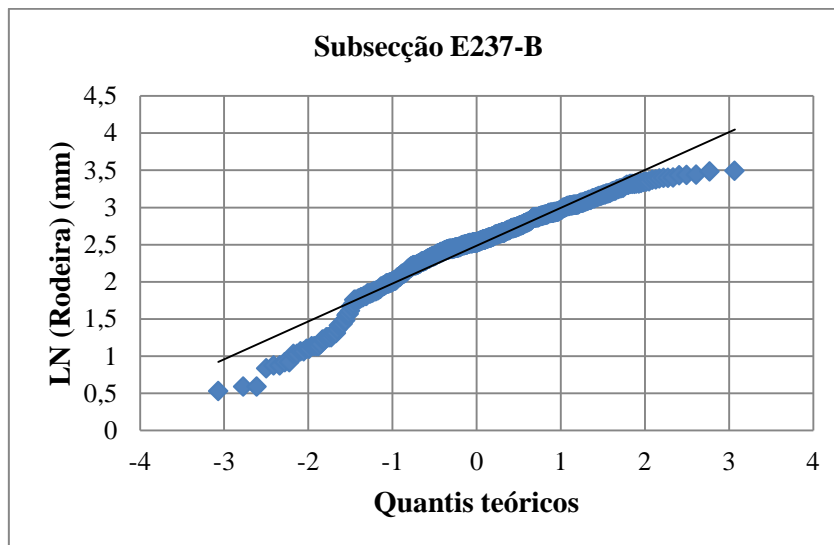


Figura 5.28 – Gráfico Q-Q com o logaritmo neperiano (ln) dos valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-B

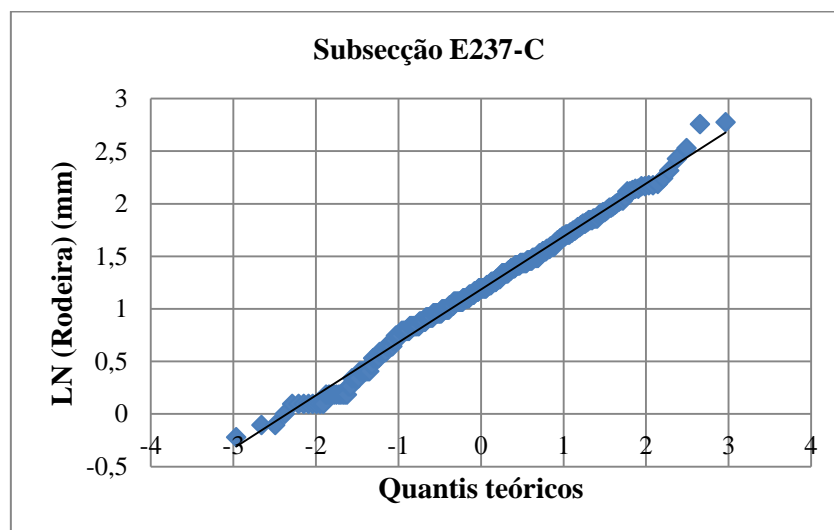


Figura 5.29 – Gráfico Q-Q com o logaritmo neperiano (ln) dos valores de profundidade de rodeira da subsecção E237-C

Conclui-se que com a Figura 5.27 e com a Figura 5.29 consegue-se obter uma melhor correlação com o logaritmo neperiano dos valores de cavado de rodeira, uma vez que se observa que os valores estão muito mais próximos da linearidade. Nestes dois casos, os valores de profundidade de rodeira, obedecem, pelos motivos anteriormente mencionados, a uma distribuição semelhante à designada por log-normal.

As conclusões obtidas para os dois casos referidos anteriormente não são as mesmas para o caso da subsecção E237-B, onde se observa uma melhor correlação com a distribuição normal.

De seguida, desenharam-se as curvas da distribuição normal e da distribuição log-normal com os valores de profundidade de rodeira das várias secções, representadas nas Figuras 5.30, 5.31 e 5.32.

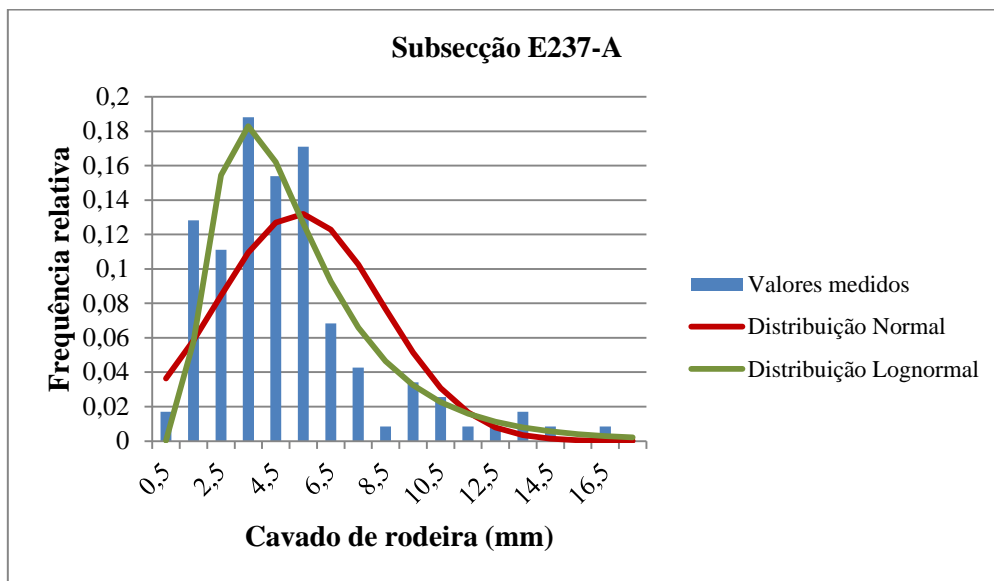


Figura 5.30 – Representação gráfica dos valores de profundidade de rodeira medidos na subsecção E237-A

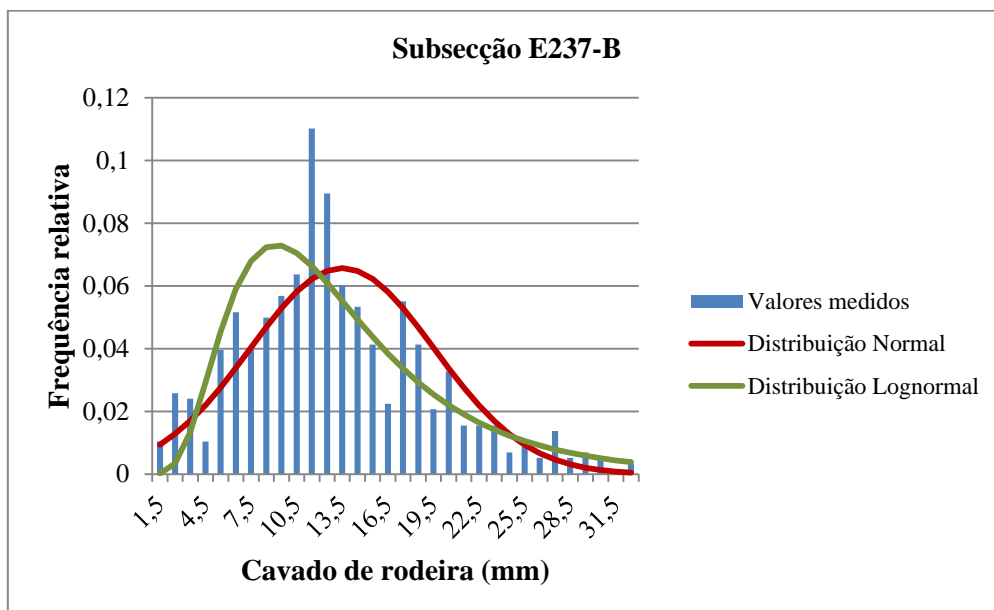


Figura 5.31 – Representação gráfica dos valores de profundidade de rodeira medidos na subsecção E237-B

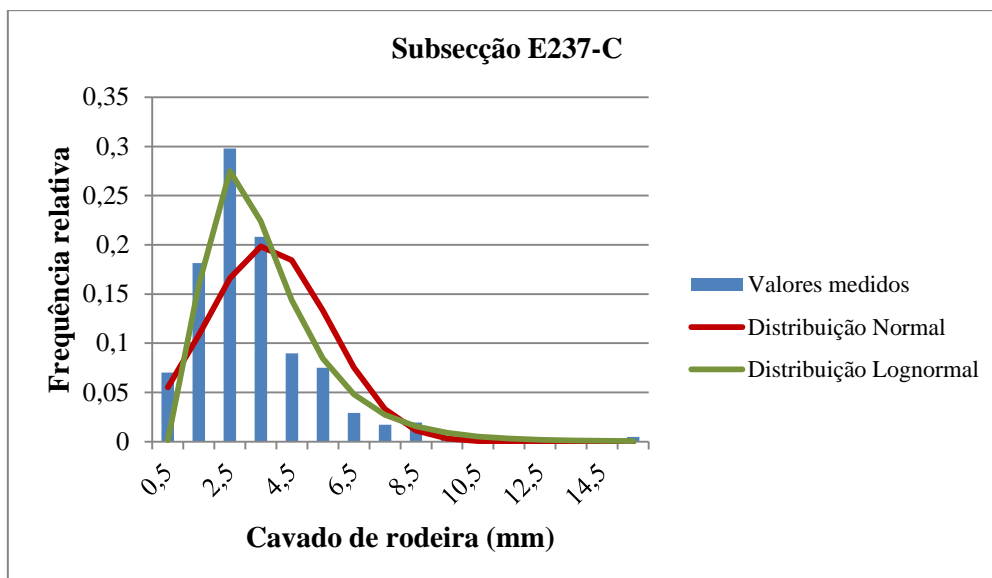


Figura 5.32 – Representação gráfica dos valores de profundidade de rodeira medidos na subsecção E237-C

Nas três figuras apresentadas (Figura 5.30, Figura 5.31 e Figura 5.32) observa-se, mais uma vez, que os valores de cavado de rodeira da subsecção E237-A e da subsecção E237-C obedecem melhor a uma distribuição log-normal e a subsecção E237-B a uma distribuição normal.

A distribuição encontrada para os valores da subsecção E237-B aproxima-se de uma distribuição normal devido ao facto da referida subsecção estar bastante deteriorada em que grande parte dos valores de cavado de rodeira é muito elevada. Como foi observado na Figura 2.16, a fases avançadas de degradação corresponde uma evolução para a distribuição normal. O mesmo já não pode ser afirmado para as restantes subsecções analisadas (E237-A e E237-C), uma vez que nessas subsecções a distribuição encontrada obedece melhor a uma distribuição log-normal, indicando um estado menos avançado de degradação.

### 5.3. Inspeções visuais

Das secções visitadas, apresenta-se, de seguida, a avaliação detalhada de três. Essas três secções foram as seguintes:

- E556;
- E237;
- E428.

Com os dados fornecidos pela EP foi possível realizar, para cada uma das três secções, um gráfico com os valores de cavado de rodeira medidos, no bordo direito e esquerdo da via, e com os níveis de gravidade de fendilhamento observados ao longo das secções. O objetivo de elaborar este tipo de gráfico para cada uma das três secções foi o de verificar se os dados fornecidos coincidiam com os aspetos observados em cada uma das inspeções realizadas.

Para a elaboração dos gráficos optou-se por seleccionar, para cada uma das secções, os intervalos apresentados no Quadro 5.17.

Esses gráficos encontram-se representados nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.35.

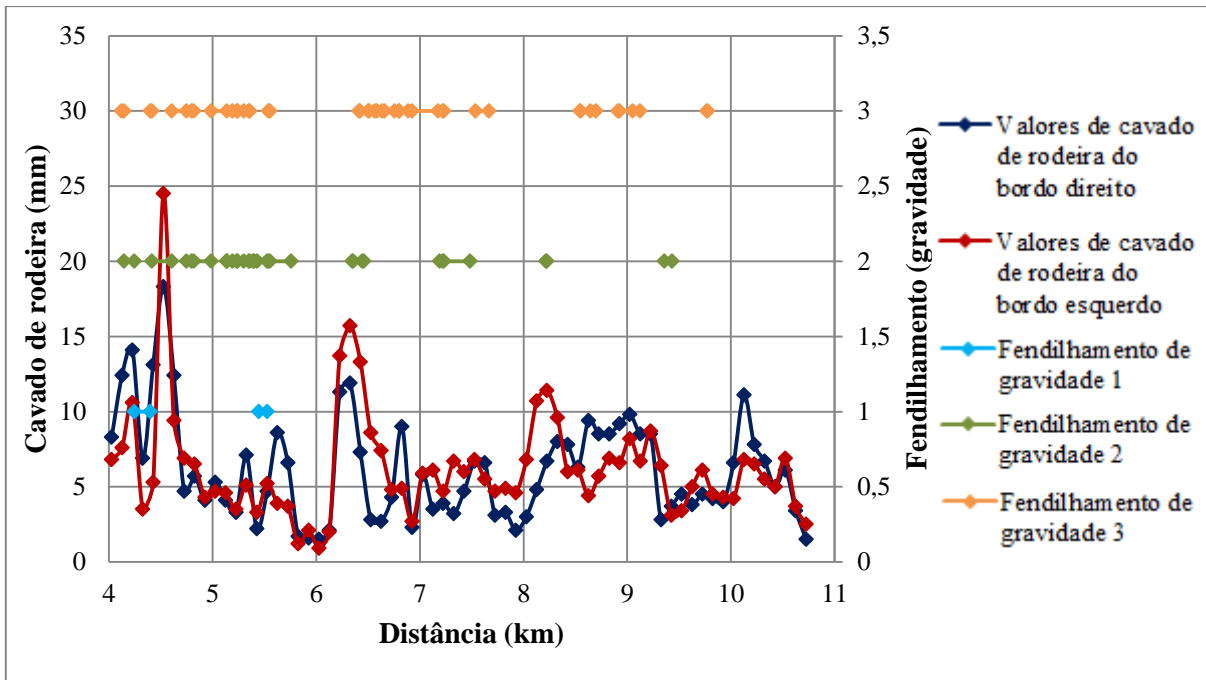


Figura 5.33 – Representação gráfica do cavado de rodeira, do bordo direito e do bordo esquerdo, e do fendilhamento medidos e observados ao longo da seção E556

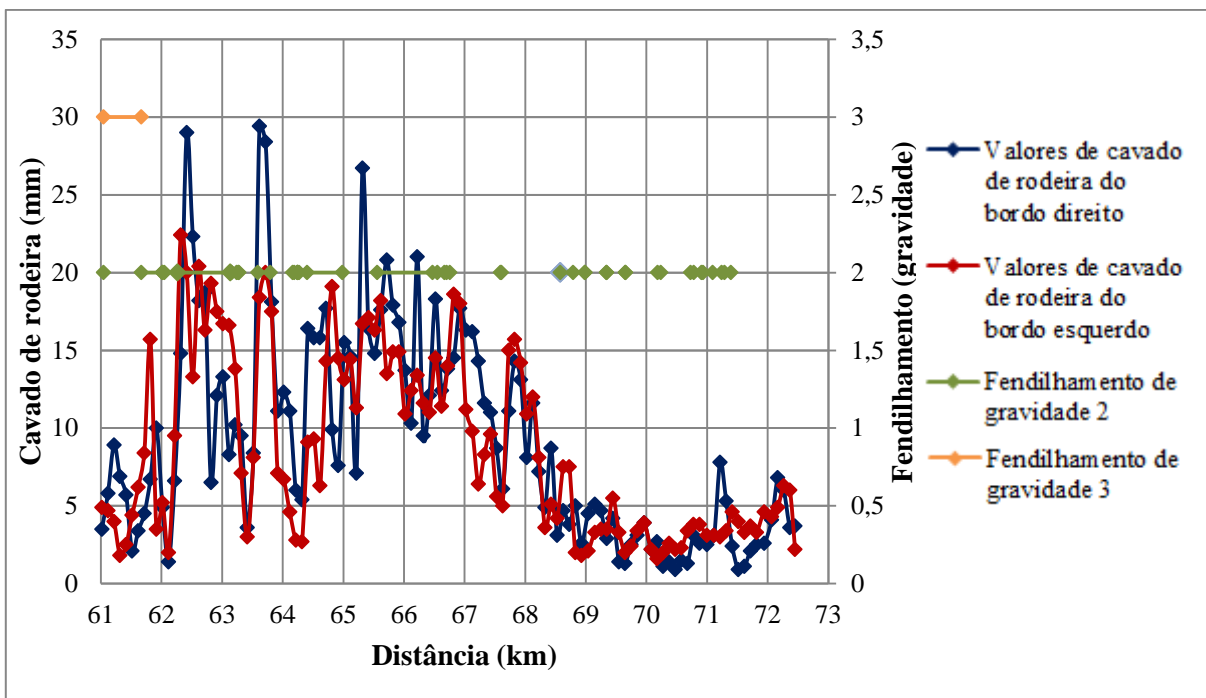


Figura 5.34 – Representação gráfica do cavado de rodeira, do bordo direito e do bordo esquerdo, e do fendilhamento medidos e observados ao longo da seção E237

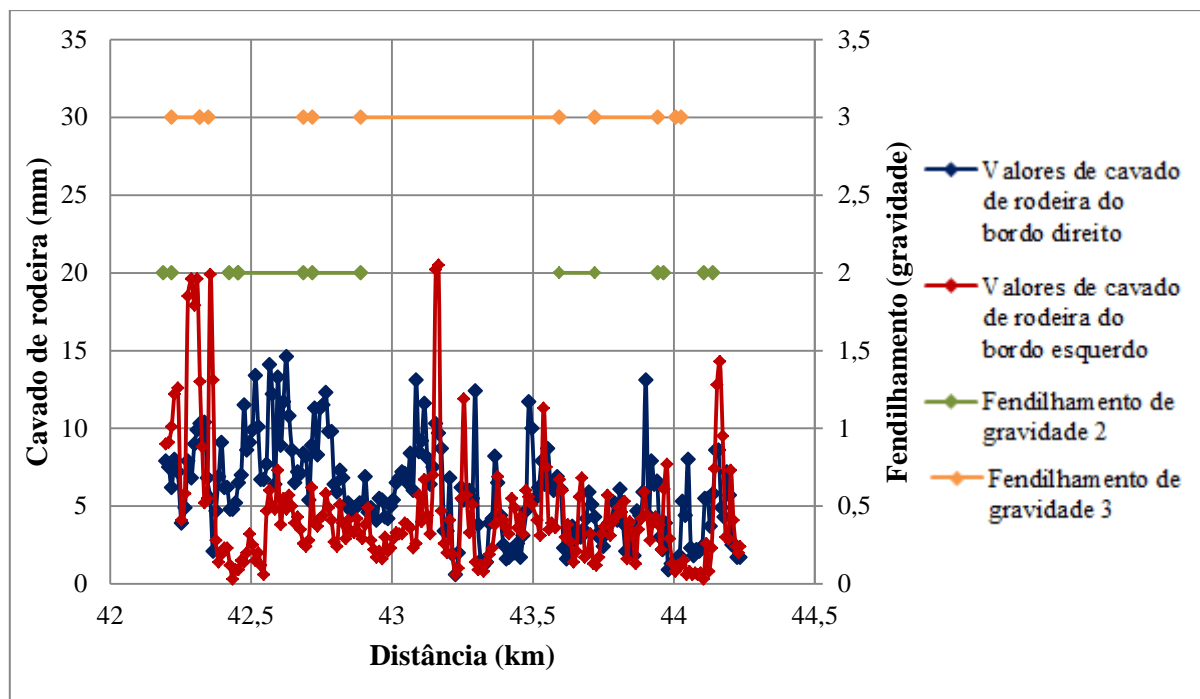


Figura 5.35 – Representação gráfica do cavado de rodeira, do bordo direito e do bordo esquerdo, e do fendilhamento medidos e observados ao longo da secção E428

Observando os gráficos representados nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.35 conclui-se que não existe uma relação direta entre o fendilhamento e a rodeira. Durante as visitas compararam-se os valores obtidos pelos gráficos com as características presentes em campo. Assim, foi possível identificar alguns aspetos em cada uma das secções visitadas. Esses aspetos encontram-se referidos já de seguida.

### 5.3.1. Aspetos observados

#### ➤ Secção E556

Na primeira subsecção desta secção, E556-A, observaram-se vários tipos de gravidade de fendilhamento (ver Figura 5.36), bermas em mau estado e, em épocas de chuva, acumulação de uma grande quantidade de água no bordo do lado direito da estrada (Figura 5.37). Por esta ser uma zona de escavação (Figura 5.38) pode ter provocado a origem de problemas de infiltração de água que levaram à origem do fendilhamento observado com posterior aparecimento de rodeiras consideradas bastante significativas (ver Quadro 5.19).



Figura 5.36 – Fendas ramificadas (à esquerda) e pele de crocodilo (à direita)



Figura 5.37 – Zona de acumulação de água e bermas em mau estado



Figura 5.38 – Zona de escavação

A subsecção seguinte, E556-B, para além de ter bermas revestidas também sofreu algumas reparações (Figura 5.39).



**Figura 5.39 – Bermas revestidas (à esquerda) e reparações (à direita)**

De seguida, na subsecção E556-C, é visível a existência de valetas não revestidas (Figura 5.40). Por ser uma zona de escavação e possuir valetas não revestidas, indica a possibilidade de se ter infiltrado água provocando o aparecimento e agravamento das rodeiras (ver Quadro 5.19).



**Figura 5.40 – Valetas não revestidas**

Na subsecção E556-D há novamente uma diminuição no valor das rodeiras (ver Quadro 5.19). Esta melhoria pode dever-se à existência de valetas revestidas (Figura 5.41).



**Figura 5.41 – Valetas revestidas**

A partir da subsecção E556-E até ao final da secção observou-se que a estrada apesar de não apresentar sinais de fendilhamento (Figura 5.42) não possui valetas nem bermas em bom estado

(Figura 5.43). Estes dois últimos aspetos podem ser os responsáveis pela origem e/ou agravamento das degradações observadas nos últimos quilómetros desta secção (ver Quadro 5.19).



**Figura 5.42 – Subsecção de estrada sem sinais de fendilhamento**



**Figura 5.43 – Inexistência de valetas (à esquerda) e bermas em mau estado (à direita)**

Ao longo desta secção foi ainda possível observar mais dois aspetos:

- Tráfego lento devido à existência de semáforos e de sinalização obrigando os condutores dos veículos a realizarem muitas paragens (Figura 5.44);
- Muito tráfego (Figura 5.45) e passagem regular de veículos pesados.

Os dois aspetos referidos anteriormente podem ter sido outros fatores responsáveis pela origem das degradações observadas (fendilhamento e rodeiras).



Figura 5.44 – Semáforos (à esquerda) e sinalização de controlo e limite de velocidade (à direita)



Figura 5.45 – Tráfego intenso

➤ Secção E237

De todas as secções analisadas, esta é a que apresenta maiores valores de cavado de rodeira (ver Figura 5.34 e Quadro 5.22). No entanto verifica-se que nas subsecções A e C os cavados de rodeira não são muito elevados sendo na subsecção B particularmente agravados (ver Quadro 5.22). Durante a visita ao local verificou-se que nesta secção a camada de desgaste da subsecção B é constituída por agregado rolado em vez de agregado britado (ver Figura 5.46). Admite-se que esta seja a causa responsável pela origem de rodeiras com cavados bastante significativos (ver Figura 5.47).



Figura 5.46 – Camada de desgaste constituída por agregado rolado (à esquerda) e camada de desgaste constituída por agregado britado (à direita)



**Figura 5.47 – Rodeira observada junto à berma na camada de desgaste constituída por agregado rolado (à esquerda) e rodeira observada junto ao eixo da faixa de rodagem na camada de desgaste constituída por agregado rolado (à direita)**

A utilização de agregado rolado em camadas de desgaste pode levar à origem de rodeiras porque o esqueleto mineral apresenta um mais reduzido atrito interno. Ao contrário dos agregados rolados, os agregados britados têm uma melhor resistência ao corte, pelo facto de as partículas serem angulosas, fazendo com que se verifiquem valores muito mais baixos de cavados de rodeira (ver Figura 5.48). De acordo com os resultados apresentados no Quadro 5.22, a subsecção com agregado rolado apresenta valores médios de cavado de rodeira que são entre 2 a 3 vezes superiores aos valores das outras duas subsecções.



**Figura 5.48 – Rodeira observada junto ao eixo da faixa de rodagem na camada de desgaste constituída por agregado britado**

Ao longo desta secção também existem zonas de rodeira onde se observaram fenómenos de exsudação de betume. Este é um fenómeno que acontece quando se utiliza quantidade excessiva de betume (ver Figura 5.49). Este problema combinado com a utilização de agregado rolado na camada de desgaste pode levar a um aumento ainda mais significativo da gravidade das rodeiras.



**Figura 5.49 – Exsudação de betume**

No decorrer da visita observou-se empolamento causado pelas raízes das árvores, principalmente nas bermas. Este fenómeno causa instabilidade na condução de viaturas por parte dos condutores (ver Figura 5.50).



**Figura 5.50 – Empolamento causado pelas raízes das árvores**

Apesar de todos os problemas observados e referidos anteriormente, também foi possível constatar que, nesta secção, não existem problemas de drenagem e os solos têm boas características uma vez que são areias.

É ainda importante notar que apesar de se encontrarem registados, para esta secção, níveis de gravidade de fendilhamento no grupo de dados fornecidos pela EP (ver Figura 5.34), durante a visita não se observaram problemas de fendilhamento. Pensa-se que os remendos observados correspondam à possibilidade de se terem realizado reparações, ao nível do fendilhamento, após a inspeção realizada em 2011 pela EP e registada no grupo de dados fornecidos.

➤ Secção E428

Observou-se que a maior parte desta secção apresenta níveis muito graves de fendilhamento permitindo concluir que o fendilhamento é a causa de origem de rodeiras nesta secção. Os níveis 2 (fendas abertas e/ou ramificadas) e 3 (pele de crocodilo) de gravidade de fendilhamento foram os observados no decorrer da visita a este local (ver Figura 5.51) e os registados pela EP (ver Figura 5.35).



**Figura 5.51 – Fendilhamento de gravidade 2 (à esquerda) e fendilhamento de gravidade 3 (à direita)**

De seguida apresentam-se algumas imagens que mostram que nas zonas onde existe fendilhamento, principalmente pele de crocodilo, são zonas com valores mais elevados de cavados de rodeira (ver Figura 5.52).



**Figura 5.52 – Rodeira provocada pelo fendilhamento de gravidade 3 (pele de crocodilo)**

A possível causa que pode ser responsável pela origem de fendilhamento de alta gravidade nesta secção é o tráfego demasiadamente elevado para a capacidade estrutural (SNC) do pavimento. Após a formação de fendilhamento, iniciam-se as rodeiras devido à infiltração de água pelas fendas geradas.

### **5.3.2. Conclusões**

Das visitas elaboradas às três secções anteriormente referidas é possível identificar alguns fatores responsáveis pela origem de rodeiras. O Quadro 5.25 mostra, resumidamente, os fatores encontrados em cada uma das secções analisadas:

Quadro 5.25 – Fatores responsáveis pela origem de rodeiras nas secções inspeccionadas

Secção	Subsecções	SNC e Tráfego	Teor em água			Fendilhamento	Deformação plástica
			Precipitação	Eficiência do sistema de drenagem	Profundidade do nível freático		
E556	A	X	X	X		X	
	B	X	X			X	
	C	X	X			X	
	D	X	X			X	
E237	B						X
E428	A a I	X	X			X	

Tendo em conta os fatores considerados pelo modelo HDM-4 e os encontrados nas visitas realizadas às secções, conclui-se que o HDM-4 considera os fatores mais importantes, contudo ou o efeito de alguns fatores considerados poderá não estar suficientemente bem expresso ou existem outros fatores que deveriam ser contabilizados no modelo, uma vez que são responsáveis pela origem de rodeiras com valores de cavado bastante significativos.

Os fatores considerados pelo modelo HDM-4 que poderão não estar suficientemente bem expressos são os seguintes:

- O efeito da eficiência do sistema de drenagem, uma vez que na avaliação paramétrica (subcapítulo 5.1) não parece ter o mesmo peso que na subsecção A da secção E556 (subsecção com sistema de drenagem mais deficiente) onde se obtiveram valores médios de cavado de rodeira superiores ao dobro dos valores medidos em subsecções adjacentes com sistemas de drenagem mais eficientes;
- O efeito do fendilhamento em estado avançado, que na avaliação paramétrica (subcapítulo 5.1) aparenta não ter o mesmo peso observado na secção E428, onde é o principal fator responsável pelos valores elevados de cavado de rodeira obtidos.

Os fatores encontrados que não são contabilizados no modelo HDM-4 e que influenciam significativamente o valor de cavado de rodeira são os seguintes:

- O tipo de agregado utilizado nas misturas betuminosas, principalmente na camada de desgaste do pavimento;
- A quantidade de betume utilizada nas misturas betuminosas, principalmente na camada de desgaste.

## 6. Modelos de Previsão de Rodeiras para a Rede Nacional Rodoviária

### 6.1. Informação disponível

Com base na informação fornecida pela EP sobre as secções que fazem parte da rede nacional rodoviária foi possível avaliar a gravidade, em termos de rodeira, das estradas de Portugal Continental. Para isso, recolheram-se todos os valores de cavado de rodeira medidos em intervalos de 10 m de todas as secções existentes na base de dados fornecida pela EP e agruparam-se os mesmos nos respetivos níveis de gravidade. Os níveis de gravidade utilizados foram os considerados pela EP para pavimentos flexíveis, referidos no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Níveis de gravidade de rodeiras adotados para trechos de 10 m – adaptado de (EP, 2009a)

Degradação	Níveis de Gravidade	Descrição do Nível de Gravidade
Rodeiras	1	Profundidade média da rodeira < 10 mm
	2	$10 \text{ mm} \leq$ Profundidade média da rodeira $\leq 30 \text{ mm}$
	3	Profundidade média da rodeira > 30 mm

Considerando os níveis de gravidade de rodeiras apresentados no Quadro 6.1 construiu-se o gráfico da Figura 6.1.

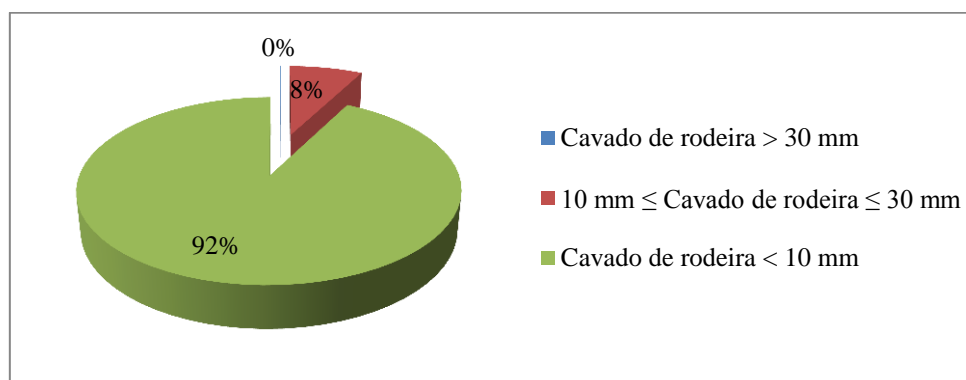


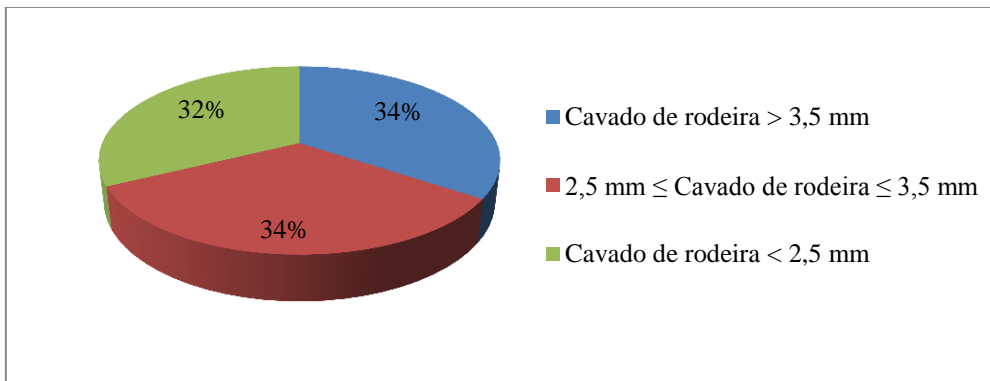
Figura 6.1 – Representação gráfica da gravidade das rodeiras nos trechos de 10 m da base de dados da EP

Observa-se na Figura 6.1 que a maior parte (92%) das rodeiras presentes na base de dados fornecida apresentam valores inferiores a 10 mm de profundidade, apenas 8% têm valores entre os 10 mm e os 30 mm e nenhuma tem valores superiores a 30 mm.

De seguida, decidiu-se agrupar os valores de cavado de rodeira médios das secções em diferentes níveis de gravidade. Decidiu-se estabelecer classes que, por se tratar do comprimento total de cada secção, são diferentes das do Quadro 6.1. Para cada nível de gravidade de rodeira, os intervalos são os apresentados no Quadro 6.2, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 6.2.

**Quadro 6.2 – Níveis de gravidade de rodeiras adotados para o comprimento total da secção**

Degradação	Níveis de Gravidade	Descrição do Nível de Gravidade
Rodeiras	1	Profundidade média da rodeira < 2,5 mm
	2	$2,5 \text{ mm} \leq$ Profundidade média da rodeira $\leq 3,5 \text{ mm}$
	3	Profundidade média da rodeira > 3,5 mm



**Figura 6.2 – Representação gráfica da gravidade das rodeiras médias nas secções da base de dados da EP**

Na Figura 6.2, observa-se que há uma repartição aproximadamente igual pelos diferentes níveis de gravidade. Note-se que dentro dos valores de cavado de rodeira que são superiores a 3,5 mm, o valor máximo presente nesse grupo é de 13 mm.

## 6.2. Critérios de seleção das secções

Neste estudo selecionaram-se no total 56 secções das fornecidas pelas EP.

Os principais critérios que levaram à seleção dessas 56 secções foram os seguintes:

- Escolher um número significativo de secções para estabelecer modelos que consigam prever o valor de cavado de rodeira em pavimentos rodoviários da rede nacional rodoviária;
- Escolher um número significativo de secções que representem os 3 níveis de gravidade referidos anteriormente (gravidade alta, intermédia e baixa) para detetar a eventualidade de existirem fatores diferentes para cada tipo de gravidade.

Na Figura 6.3 representa-se o mapa de Portugal Continental com a localização, em cada distrito, das 56 secções escolhidas com base nos critérios de seleção considerados, o que mostra uma distribuição das secções por todo o território.

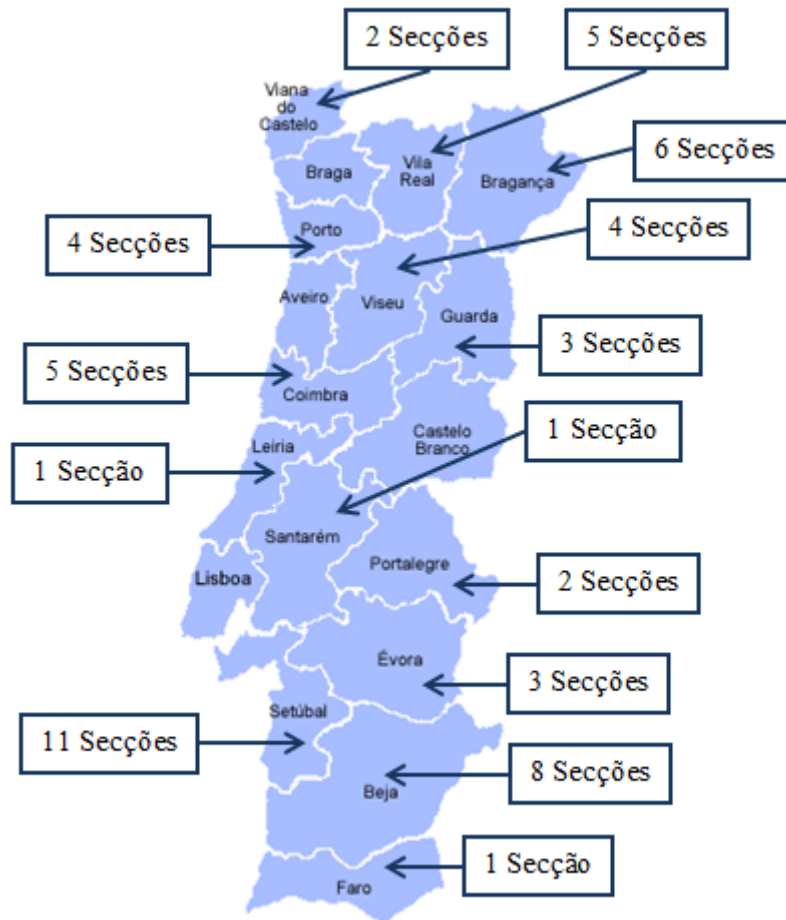


Figura 6.3 – Mapa de Portugal Continental com a localização das 56 secções escolhidas

### 6.3. Validação dos dados fornecidos pela EP

Neste trabalho considerou-se fundamental efetuar a validação dos dados fornecidos pela EP.

Dentro dos dados fornecidos pela EP, houve a tentativa de validar os seguintes:

- O tráfego médio diário anual de veículos pesados ( $TMDA_p$ );
- A estrutura dos pavimentos das diferentes secções;
- O CBR (Índice Californiano de capacidade de carga) da fundação.

Para proceder à validação do  $TMDA_p$  consultaram-se anuários desde o ano 1980 até ao ano 2005. Os valores de  $TMDA_p$  registados nos postos de contagem dos anuários consultados foram comparados com os valores de  $TMDA_p$  fornecidos pela EP e, nos casos em que eram distintos, optou-se pelos valores registados nos postos de contagem.

Nas secções em que não existiam postos de contagem, adotou-se o  $TMDA_p$  com base nos dados de uma secção localizada junto à secção analisada onde existia pelo menos um posto de contagem. Caso não existissem secções junto da analisada que tivessem postos de contagem, optou-se pelo valor de tráfego fornecido pela EP.

A estrutura dos pavimentos das diferentes secções foi validada analisando o histórico de cada uma das secções. Esta tarefa foi facilitada realizando um gráfico onde se apresenta a relação entre o

valor do número estrutural modificado do pavimento (SNC) de cada uma das secções e o número equivalente de passagens por ano de um eixo-padrão de 80kN ( $N_{80Y}$ ).

Dentro das 56 secções escolhidas, as que apresentavam um histórico de difícil interpretação ou dados não confiáveis, impossibilitando o cálculo do SNC, foram excluídas.

Em relação ao CBR da fundação, não foi possível confirmar o seu valor para cada uma das secções estudadas, que poderia ter sido confirmado com base em ensaios de carga.

Note-se que, como nem todas as secções apresentam a mesma estrutura ao longo de todo o seu comprimento e/ou as intervenções realizadas foram elaboradas em alturas diferentes ao longo da mesma secção, houve a necessidade de dividir essas secções em subsecções. Assim, analisaram-se, no total, 91 trechos.

### 6.3.1. Trechos escolhidos

Apresentam-se nos Quadros 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 os trechos escolhidos de gravidade alta, intermédia e baixa juntamente com o distrito a que pertencem, com a respetiva extensão, com o tipo de pavimento, com o valor de CBR e com um comentário sobre a inclusão ou não de cada trecho na elaboração de modelos.

**Quadro 6.3 – Lista dos 50 trechos de gravidade alta**

Gravidade Alta							
Número do Trecho	Nome do Trecho	Sentido	Distrito	Extensão (km)	CBR (%)	Tipo de pavimento	Comentário
1	A025	Crescente	Setúbal	8,529	6	AM	Incluído
2	A058 (8,43km-21,42km)	Crescente	Setúbal	12,99	6	AM	Incluído
3	A058 (21,42km-26,45km)	Crescente	Setúbal	5,03	6	ST	Incluído
4	<del>A061</del>	<del>Crescente</del>	<del>Beja</del>	<del>18,123</del>	<del>6</del>	<del>ST</del>	<del>Excluído</del>
5	<del>A062</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Beja</del>	<del>6,677</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
6	<del>A130</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Faro</del>	<del>7,554</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
7	A480	Crescente	Beja	13,866	6	ST	Incluído
8	A544	Crescente	Beja	12,493	6	ST	Incluído
9	A545	Crescente	Beja	9,483	6	ST	Incluído
10	A570	Decrescente	Beja	10,395	6	AM	Incluído
11	A571 (47,2km-48,59km)	Decrescente	Beja	1,39	6	AM	Incluído
12	A571 (48,59km-56,51km)	Decrescente	Beja	7,92	6	AM	Incluído
13	<del>A594</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Beja</del>	<del>11,337</del>	<del>6</del>	<del>ST</del>	<del>Excluído</del>
14	B028 (27,66km-33,82km)	Decrescente	Porto	6,16	6	AM	Incluído
15	<del>B060</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Porto</del>	<del>9,332</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
16	<del>B649 (22,8km-23,8km)</del>	<del>Crescente</del>	<del>Porto</del>	<del>1</del>	<del>6</del>	<del>ST</del>	<del>Excluído</del>
17	C295	Crescente	Bragança	16,405	7	ST	Incluído
18	C320	Decrescente	Bragança	4,04	7	ST	Incluído
19	C336 (0km-10,9km)	Decrescente	Vila Real	10,9	6	AM	Incluído

AM – Mistura betuminosa (*Asphaltic mix*);

ST – Tratamento superficial (*Surface Treatment*);

**Quadro 6.4 – Lista dos 50 trechos de gravidade alta (continuação)**

Gravidade Alta							
Número do Trecho	Nome do Trecho	Sentido	Distrito	Extensão (km)	CBR (%)	Tipo de pavimento	Comentário
20	C336 (10,9km-12,88km)	Decrescente	Vila Real	1,98	6	AM	Incluído
21	C361 (0km-6km)	Decrescente	Bragança	10,854	8	AM	Incluído
22	C399 (35,8km-36,329km)	Crescente	Vila Real	0,529	6	AM	Incluído
23	C399 (36,329 km-36,434 km)	Crescente	Vila Real	0,105	6	AM	Incluído
24	C474 (13,98 km-14,757 km)	Crescente	Vila Real	0,777	6	AM	Incluído
25	C494	Crescente	Bragança	2,715	7	ST	Incluído
26	C528	Crescente	Bragança	12,89	7	AM	Incluído
27	<del>D280D</del>	<del>Crescente</del>	<del>Viseu</del>	<del>14,556</del>	<del>12</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
28	D280E (0,425 km-9 km)	Decrescente	Viseu	8,575	12	AM	Incluído
29	D280E (9 km-14,94 km)	Decrescente	Viseu	5,94	12	AM	Incluído
30	D282D	Crescente	Viseu	6,337	12	AM	Incluído
31	D344 (0 km-2,2 km)	Crescente	Coimbra	2,2	8	AM	Incluído
32	<del>D348</del>	<del>Crescente</del>	<del>Coimbra</del>	<del>11,432</del>	<del>10</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
33	<del>D684</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Viseu</del>	<del>0,74</del>	<del>10</del>	<del>ST</del>	<del>Excluído</del>
34	E237 (60,93 km-68,485 km)	Crescente	Setúbal	7,555	5	AM	Incluído
35	E237 (72,08 km-72,487 km)	Crescente	Setúbal	0,407	5	AM	Incluído
36	E257	Decrescente	Setúbal	9,119	6	AM	Incluído
37	<del>E287 (76,25 km-76,28 km)</del>	<del>Crescente</del>	<del>Setúbal</del>	<del>0,03</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
38	<del>E320</del>	<del>Crescente</del>	<del>Leiria</del>	<del>14,322</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
39	E536	Crescente	Setúbal	8,871	5	AM	Incluído
40	<del>E556</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Setúbal</del>	<del>6,925</del>	<del>10</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
41	E560 (0 km-1,715 km)	Crescente	Setúbal	1,715	6	AM	Incluído
42	E708 (14,8 km-18,975 km)	Decrescente	Setúbal	4,175	6	AM	Incluído
43	E708 (18,975 km-22,11 km)	Decrescente	Setúbal	3,135	6	AM	Incluído
44	E761 (46,35 km-47,35 km)	Decrescente	Setúbal	1	5	AM	Incluído
45	E761 (47,35 km-50,30 km)	Decrescente	Setúbal	2,95	5	ST	Incluído
46	E761 (50,30 km-58,78 km)	Decrescente	Setúbal	8,48	5	ST	Incluído
47	E761 (58,78 km-64,35 km)	Decrescente	Setúbal	5,57	5	ST	Incluído
48	<del>E762 (76,80 km-79,20 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Setúbal</del>	<del>2,4</del>	<del>5</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
49	F522 (48,63 km-55,6 km)	Decrescente	Santarém	6,97	7	AM	Incluído
50	F522 (55,6 km-58,89 km)	Decrescente	Santarém	3,29	7	AM	Incluído

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 6.3.

Quadro 6.5 - Lista dos 19 trechos de gravidade intermédia

Gravidade Intermédia							
Número do Trecho	Nome do Trecho	Sentido	Distrito	Extensão (km)	CBR (%)	Tipo de pavimento	Comentário
51	<del>B054 (7,477 km-8,3 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Porto</del>	<del>0,823</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
52	<del>B054 (8,3 km-10,28 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Porto</del>	<del>1,98</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
53	B701	Decrescente	Viana do Castelo	14,818	7	AM	Incluído
54	C307	Decrescente	Vila Real	8,786	6	AM	Incluído
55	C361 (6 km-10,854 km)	Decrescente	Bragança	4,854	8	AM	Incluído
56	C474 (14,757 km-26,266 km)	Crescente	Vila Real	11,509	6	AM	Incluído
57	C474 (26,266 km-27,91 km)	Crescente	Vila Real	1,644	6	AM	Incluído
58	D372	Crescente	Coimbra	6,525	10	AM	Incluído
59	E237 (68,485 km-72,08 km)	Crescente	Setúbal	3,595	5	AM	Incluído
60	E287 (76,42 km-80,2 km)	Crescente	Setúbal	3,95	6	AM	Incluído
61	<del>E560 (1,715 km-1,76 km)</del>	<del>Crescente</del>	<del>Setúbal</del>	<del>8,43</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
62	E560 (1,76 km-8,43 km)	Crescente	Setúbal	8,43	6	AM	Incluído
63	<del>E762 (64,35 km-66,153 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Setúbal</del>	<del>1,803</del>	<del>5</del>	<del>ST</del>	<del>Excluído</del>
64	<del>E762 (66,153 km-74 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Setúbal</del>	<del>7,847</del>	<del>5</del>	<del>ST</del>	<del>Excluído</del>
65	<del>E762 (74 km-76,80 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Setúbal</del>	<del>2,8</del>	<del>5</del>	<del>ST</del>	<del>Excluído</del>
66	F513 (435,612 km-443,20 km)	Crescente	Portalegre	7,588	6	AM	Incluído
67	F513 (443,20 km-448,5 km)	Crescente	Portalegre	5,3	6	AM	Incluído
68	F553 (58,38 km-60,30 km)	Crescente	Portalegre	1,92	6	AM	Incluído
69	G026	Decrescente	Évora	19,468	6	AM	Incluído

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 6.3.

**Quadro 6.6 – Lista dos 22 trechos de gravidade baixa**

Gravidade Baixa							
Número do Trecho	Nome do Trecho	Sentido	Distrito	Extensão (km)	CBR (%)	Tipo de pavimento	Comentário
70	A609 (15,37 km-18 km)	Decrescente	Évora	2,63	6	AM	Incluído
71	A609 (18 km-24,325 km)	Decrescente	Évora	6,325	6	ST	Incluído
72	B028 (33,82 km-35,62 km)	Decrescente	Porto	1,8	6	AM	Incluído
73	B227	Crescente	Viana do Castelo	3,971	6	AM	Incluído
74	B649 (19,556 km-22,8 km)	Crescente	Porto	3,244	6	AM	Incluído
75	<del>C027 (118,22 km-122,72 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Vila Real</del>	<del>4,5</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
76	<del>C027 (122,72 km-129 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Vila Real</del>	<del>6,28</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
77	<del>C027 (129 km-139 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Vila Real</del>	<del>10</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
78	<del>C027 (139 km-146,155 km)</del>	<del>Decrescente</del>	<del>Vila Real</del>	<del>7,155</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
79	C097D	Crescente	Bragança	1,567	10	AM	Incluído
80	C137	Decrescente	Guarda	12,895	6	AM	Incluído
81	C317	Crescente	Guarda	12,156	10	AM	Incluído
82	C326 (158,59 km-163,99 km)	Crescente	Vila Real	5,4	6	AM	Incluído
83	C326 (163,99 km-166 km)	Crescente	Vila Real	2,01	6	AM	Incluído
84	C351 (10,1 km-11,65 km)	Decrescente	Guarda	1,55	6	AM	Incluído
85	C351 (11,65 km-12,5 km)	Decrescente	Guarda	0,85	6	AM	Incluído
86	C351 (12,5 km-26,97 km)	Decrescente	Guarda	14,47	6	AM	Incluído
87	<del>D344 (2,2 km-3,225)</del>	<del>Crescente</del>	<del>Coimbra</del>	<del>1,025</del>	<del>8</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
88	D365	Crescente	Coimbra	12,958	6	AM	Incluído
89	<del>E287 (76,28 km-76,42 km)</del>	<del>Crescente</del>	<del>Setúbal</del>	<del>0,14</del>	<del>6</del>	<del>AM</del>	<del>Excluído</del>
90	F553 (60,30 km-74,56 km)	Crescente	Portalegre	14,26	6	AM	Incluído
91	G032	Decrescente	Évora	20,344	6	AM	Incluído

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 6.3.

### 6.3.2. Relações encontradas entre SNC e $N_{80Y}$

#### ➤ Determinação do SNC

Para determinar o valor de SNC de cada um dos trechos considerados foi necessário consultar o histórico, presente na base de dados fornecida pela EP, e utilizar as expressões referidas no Anexo B deste trabalho.

Para calcular o valor de SNC é necessário adotar valores de coeficientes estruturais e valores de coeficientes de drenagem.

Os coeficientes estruturais utilizados estão apresentados no Anexo B, Quadro B. 1.

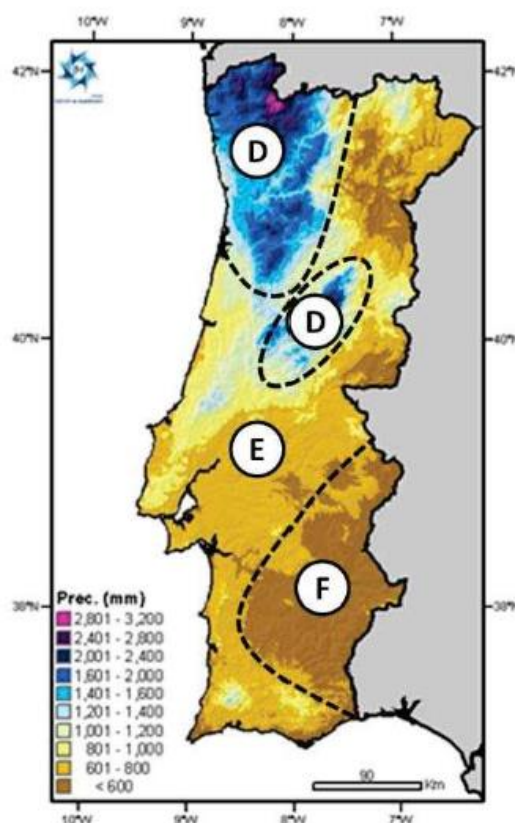
Uma vez que os coeficientes estruturais são afetados pelo estado de fendilhamento dos pavimentos, considerou-se, neste trabalho, que em situações de beneficiação de pavimentos já fendilhados as misturas betuminosas a quente do pavimento existente têm um coeficiente estrutural que atende ao seu estado de degradação (AASHTO, 1993). Apresentam-se no Quadro 6.7 os coeficientes estruturais recomendados pela AASHTO nessas situações.

**Quadro 6.7 – Coeficientes estruturais propostos pela AASHTO para camadas de misturas betuminosas existentes (AASHTO, 1993)**

Camada	Degradações	Coefficiente Estrutural
BB	Pouca ou não existência de pele de crocodilo e/ou apenas baixa severidade de fendas transversais	0,35-0,40
	<10% com baixa severidade e pele de crocodilo e/ou <5% com média e alta severidade de fendas transversais	0,25-0,35
	>10% com baixa severidade de pele de crocodilo e/ou <10% com média severidade de pele de crocodilo e/ou >5-10% com média e alta severidade de fendas transversais	0,20-0,30
	>10% com média severidade de pele de crocodilo e/ou <10% com alta severidade de pele de crocodilo e/ou >10% com média e alta severidade de fendas transversais	0,14-0,20
	>10% com alta severidade de pele de crocodilo e/ou >10% com alta severidade de fendas transversais	0,08-0,15

BB – Betão betuminoso

Quanto aos coeficientes de drenagem tornou-se necessário definir coeficientes de drenagem consoante as regiões do país, uma vez que o teor em água afeta as características mecânicas dos materiais não ligados, designadamente das camadas granulares de pavimento e do solo de fundação. Assim, delimitaram-se regiões consoante as precipitações que ocorrem em Portugal Continental (Silva, 2012). A delimitação das regiões está representada na Figura 6.4.



**Figura 6.4 – Delimitação das regiões com base nas precipitações acumuladas anuais (Silva, 2012)**

Adotaram-se, então, coeficientes de drenagem para as camadas granulares dentro do intervalo de valores propostos pela AASHTO (Anexo B, Quadro B. 2), considerando as precipitações a que estão sujeitos os pavimentos do território nacional (Silva, 2012). No Quadro 6.8 apresentam-se os coeficientes de drenagem adotados para cada região.

**Quadro 6.8 – Coeficientes de drenagem consoante a região do país (Silva, 2012)**

Materiais	Coeficientes de Drenagem		
	Região D	Região E	Região F
Semipenetração Betuminosa	0,85	1,0	1,1
Agregado Britado de Granulometria Extensa e Macadame Hidráulico	0,85	1,0	1,1

➤ Determinação do  $N_{80Y}$

A determinação deste parâmetro foi realizada com base na equação (5.1). Para estabelecer os valores de  $TMDA_p$  consultaram-se anuários desde o ano 1980 até ao ano 2005. Os valores de  $TMDA_p$  registados nos postos de contagem dos anuários consultados foram comparados com os valores de  $TMDA_p$  fornecidos pela EP e, nos casos em que eram distintos, optou-se pelos valores registados nos postos de contagem.

Nas secções em que não existiam postos de contagem, adotou-se o  $TMDA_p$  com base nos dados de uma secção localizada junto à secção analisada onde existia pelo menos um posto de contagem. Caso não existissem secções junto da analisada que tivessem postos de contagem, optou-se pelo valor de tráfego fornecido pela EP.

O tráfego foi expresso em eixos-padrão de 80 kN. Os fatores de agressividade foram estabelecidos com base no indicado no Quadro 5.3 em função do  $TMDA_p$ .

➤ Relação entre SNC e  $N_{80Y}$  nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)

Após a determinação do SNC e do  $N_{80Y}$  de cada um dos trechos considerados foi possível realizar um gráfico que demonstrasse a relação entre o SNC e o  $N_{80Y}$  dos trechos com pavimento do tipo AM (ver Figura 6.5). No Anexo D, Quadros D. 1, D. 2 e D. 3 apresentam-se os valores utilizados para os vários trechos.

Com os dados dos quadros referidos anteriormente construíram-se 3 curvas para níveis de gravidade alta, intermédia e baixa. Estes níveis encontram-se definidos no Quadro 6.2. Na Figura 6.5 observa-se que nas 3 famílias de gravidade os valores de SNC e  $N_{80Y}$  apresentam de facto uma relação. Encontrou-se uma relação logarítmica muito semelhante à proposta pela AASHTO (AASHTO, 1993):

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r \times S_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0,2 \times \frac{\log_{10}\left(\frac{p_i - p_t}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,5}}} + 2,32 \times \log_{10}(M_r) - 8,07 \quad (6.1)$$

Onde:

$W_{18}$  – Número equivalente de eixos-padrão de 18 kip=18000 lb (cerca de 80 kN) (ESALs);

$Z_r$  – Valor padronizado;

$S_0$  – Desvio padrão que atende ao efeito dos erros na previsão do tráfego e na previsão do desempenho;

SN – Número estrutural (polegadas):

$p_i$  – Nível de serviço inicial;

$p_t$  – Nível de serviço final;

$M_r$  – Módulo resiliente efetivo para a fundação (psi), dado por (AASHTO, 1993):

$$M_r = 2555 \times \text{CBR}^{0.64} \quad (6.2)$$

Este método compreende a consideração de um nível de fiabilidade (R) que representa a probabilidade, expressa em percentagem, de que o pavimento projetado suporte o tráfego previsto. O valor de R varia de acordo com a classificação funcional das estradas. Os valores, em percentagem, recomendados para cada tipo de classificação funcional estão apresentados no Quadro 6.9, de onde resulta um valor de  $Z_r$  (AASHTO, 1993).

**Quadro 6.9 – Valores de R recomendados (AASHTO, 1993)**

Classificação Funcional	Valores de R recomendados	
	Urbana	Interurbana
Estradas interurbanas e urbanas mais importantes	85-99,9	80-99,9
Artérias principais	80-90	75-95
Vias coletoras	80-95	75-95
Local	50-80	50-80

Para  $S_0$  é usual adotar os valores do Quadro 6.10.

**Quadro 6.10 – Valores típicos de  $S_0$  (AASHTO, 1993)**

Valores típicos de $S_0$	
Pavimentos flexíveis	Pavimentos rígidos
0,40-0,50	0,35-0,40

Na Figura 6.5 também estão representadas 3 curvas que representam a relação entre SNC e  $N_{80Y}$  proposta pela AASHTO. A diferença entre elas é o valor de  $p_t$  considerado. Para a primeira curva tem-se  $p_t = 1$ , para a segunda curva tem-se  $p_t = 1,5$  e para a terceira curva tem-se  $p_t = 2$ , refletindo diferentes níveis de serviço finais.

Concluiu-se que, apesar de os métodos de dimensionamento de pavimentos adotados por Portugal serem diferentes dos da AASHTO, as relações obtidas entre SNC e  $N_{80Y}$  são muito próximas.

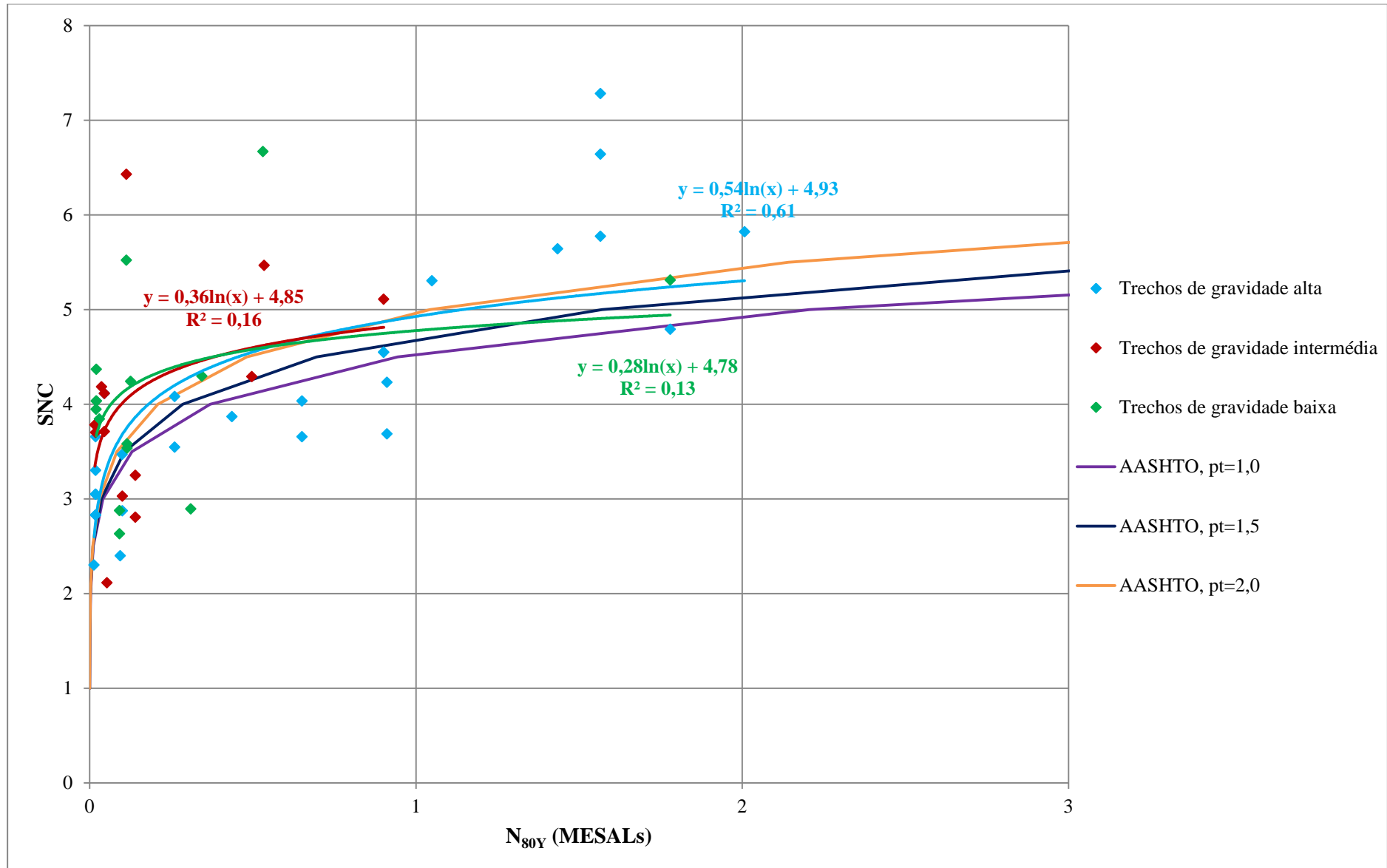


Figura 6.5 – Relações entre SNC e N<sub>80Y</sub> dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)

➤ Relação entre SNC e  $N_{80Y}$  nos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial)

No Anexo D, Quadro D. 4 referem-se as características necessárias para construir um gráfico que demonstre a relação entre o SNC e o  $N_{80Y}$  dos trechos com pavimento do tipo ST considerados.

Os pavimentos de baixo tráfego permitem pavimentos com capacidade de carga mais baixa e, portanto, valores de SNC mais reduzidos. Para garantir que a densificação inicial,  $R_0$ , neste tipo de pavimentos, não atinja valores muito elevados, é exigido um valor mínimo de SNC (Hickson, 2010). Observa-se, na Figura 6.6, que a partir de valores de SNC = 3, obtêm-se valores de  $R_0$  menores, levando, assim, a valores de cavado de rodeira total igualmente menores.

Pelo facto de o valor de SNC neste tipo de pavimentos ser menor, é, também, mais dependente do valor de CBR dos materiais de fundação. Esta dependência torna a utilização do valor correto de CBR bastante importante.

Como se pode observar no Anexo D, Quadro D. 4, a grande maioria dos valores de SNC das secções apresentadas é inferior ao valor mínimo de 3 e os valores de CBR das secções estudadas fornecidos pela EP e apresentados nos Quadros 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 podem não ser suficientemente representativos das secções. Utilizando as correlações entre o CBR e o módulo de deformabilidade poderia ser esclarecida a contribuição da fundação para o SNC através de ensaios de carga do tipo FWD (Defletómetro de impacto). No entanto, parece haver realmente uma relação entre os dois parâmetros (SNC e  $N_{80Y}$ ) dos trechos com pavimento do tipo ST (ver Figura 6.7 e Figura 6.8). É importante referir ainda que nos pavimentos do tipo AM este defeito já não se verifica devido ao facto de os mesmos terem valores de SNC mais elevados reduzindo, por isso, a importância do CBR da fundação.

Para determinar a relação entre o SNC e o  $N_{80Y}$ , neste tipo de pavimentos, considerou-se, numa única série de dados, todos os trechos apresentados no Anexo D, Quadro D. 4 para se conseguir obter uma correlação aceitável entre o SNC e o  $N_{80Y}$ .

Assim, está representada na Figura 6.7 a relação linear encontrada entre o SNC e o  $N_{80Y}$  dos trechos com pavimento do tipo ST considerados enquanto na Figura 6.8 apresenta-se a relação logarítmica encontrada para os mesmos trechos.

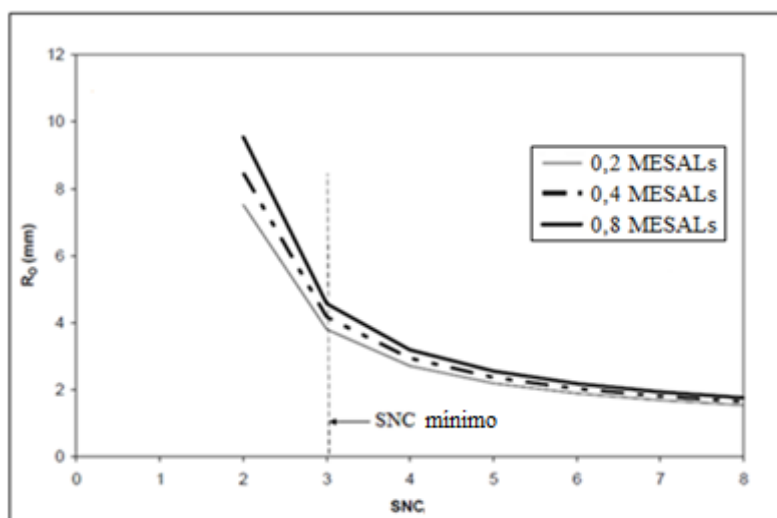


Figura 6.6 – Densificação inicial,  $R_0$ , versus número estrutural modificado do pavimento, SNC (Hickson, 2010)

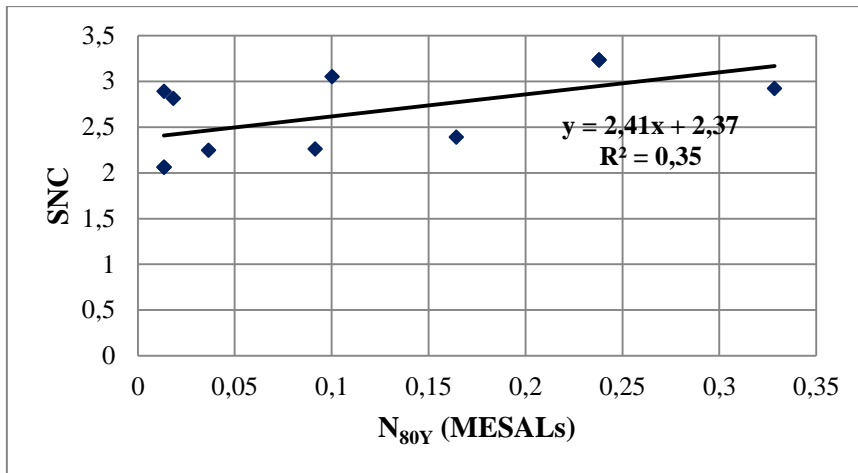


Figura 6.7 – Relação linear entre SNC e  $N_{80Y}$  dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial)

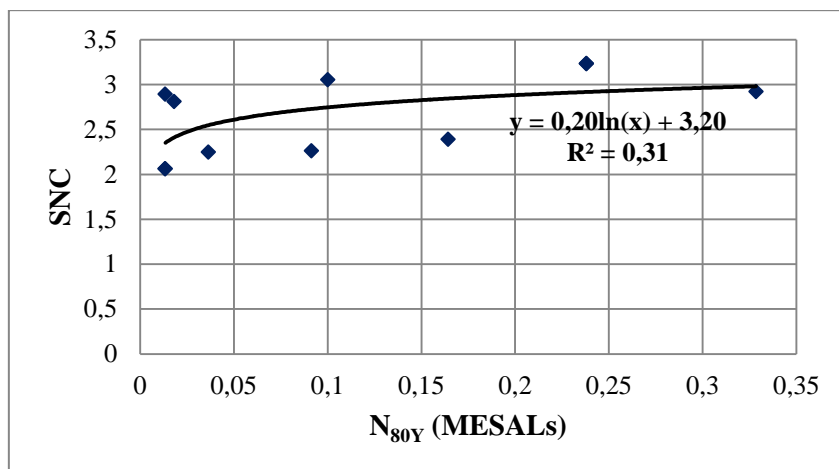


Figura 6.8 – Relação logarítmica entre SNC e  $N_{80Y}$  dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial)

Observando as Figuras 6.7 e 6.8, constata-se que, ao contrário dos trechos com pavimento do tipo AM, nos trechos com pavimento do tipo ST, a relação entre o SNC e o  $N_{80Y}$  aproxima-se mais de uma relação linear ( $R^2 = 0,35$ ) do que logarítmica ( $R^2 = 0,31$ ).

### 6.3.3. Relação entre fendilhamento e rodeiras

Com base nos níveis de gravidade de fendilhamento fornecidos pela EP calcularam-se os valores da área (em %) do fendilhamento existente em cada um dos trechos estudados com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) que estão apresentados no Anexo E, Quadros E. 1, E. 2 e E. 3. Construíram-se três gráficos (Figura 6.9, Figura 6.10 e Figura 6.11), um para cada tipo de gravidade (gravidade alta, intermédia e baixa) com o objetivo de se obter uma representação gráfica do peso do fendilhamento em cada tipo de trecho para entender se a valores mais elevados de rodeira estão associadas maiores percentagens de fendilhamento.

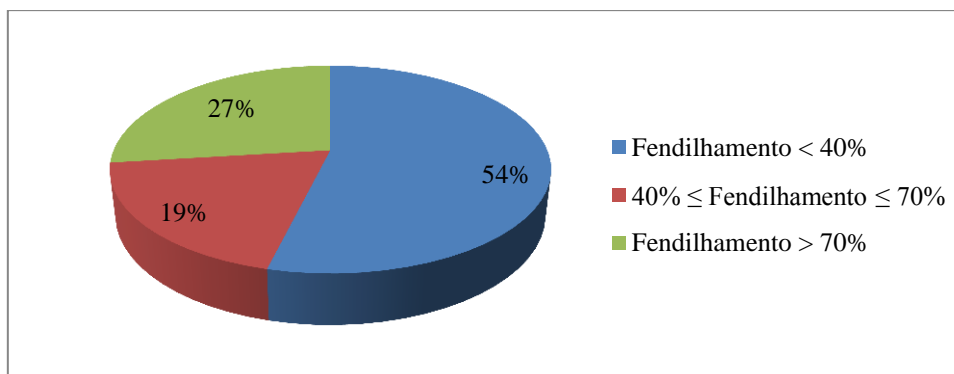


Figura 6.9 – Representação gráfica do fendilhamento existente nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta

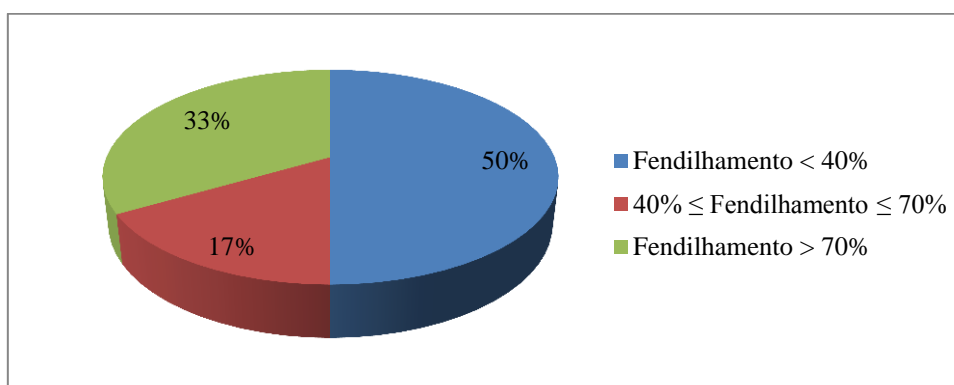


Figura 6.10 – Representação gráfica do fendilhamento existente nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia

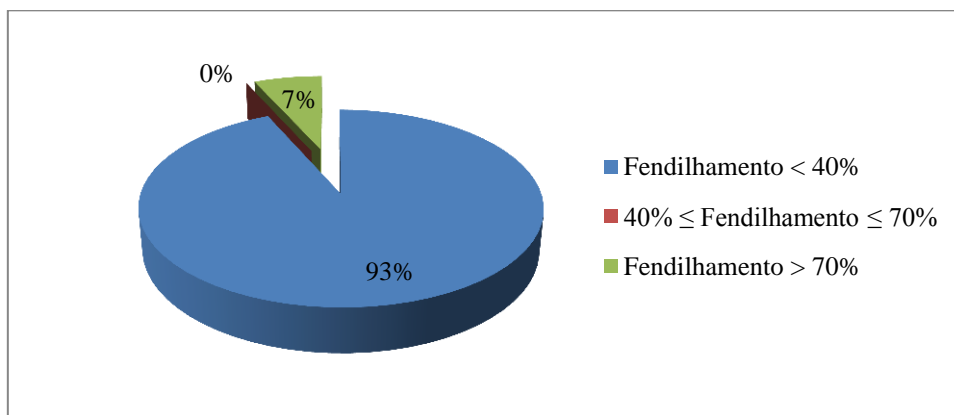


Figura 6.11 – Representação gráfica do fendilhamento existente nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa

Os gráficos das Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 mostram que os trechos de gravidade intermédia são os que apresentam valores mais elevados de fendilhamento. Isto significa que os valores mais elevados de rodeira não estão associados a maiores percentagens de fendilhamento, permitindo concluir que o fendilhamento não é o fator, ou pelo menos não é o único, responsável pelos valores de cavado de rodeira observáveis nos trechos de gravidade alta presentes na rede nacional rodoviária.

## 6.4. Aplicação dos dados em modelos existentes

Os dados dos trechos escolhidos foram aplicados em dois modelos. Os dados dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) foram aplicados no modelo HDM-4 enquanto os dados dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial) foram aplicados no modelo Austroads para prever rodeiras em pavimentos granulares com tratamento superficial.

### 6.4.1. Notas importantes

➤ Determinação dos dados introduzidos no modelo HDM-4

Nesta fase do trabalho, em vez de calcular o fendilhamento, para cada trecho, com as equações apresentadas no Anexo A, calculou-se a área (em %) de fendilhamento (ACX) com base nos dados fornecidos pela EP (tal como foi referido na subcapítulo 6.3) e introduziram-se as percentagens obtidas no modelo. Não foi possível, para alguns trechos, introduzir o valor correspondente de fendilhamento no modelo, levando, por isso, à sua exclusão. Os trechos excluídos foram os referidos no Quadro 6.11.

**Quadro 6.11 – Secções excluídas devido ao fendilhamento**

Trechos excluídos	
Trechos de gravidade alta	A058 (8,43 km-21,42 km)
	A570
	A571 (47,42 km-48,59 km)
	D282D
	E560 (0 km-1,715 km)
Trechos de gravidade intermédia	E761 (46,35 km-47,35 km)
	D372
	E560 (1,76 km-8,43 km)
	F553 (58,38 km-60,3 km)
Trechos de gravidade baixa	G026
	B227

Como a EP não forneceu informação sobre a percentagem de compactação relativa adotada aquando da construção dos pavimentos, admitiu-se a percentagem de 100% para este parâmetro.

Uma vez que também não foi fornecida qualquer tipo de informação sobre o tipo de betume utilizado na pavimentação das secções de estrada, as propriedades do ligante são desconhecidas, tendo-se, por isso, calculado a deformação plástica com a equação (3.4), com base num indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento.

Os restantes parâmetros foram determinados da forma apresentada nos subcapítulos 3.2 e 5.1 e no Anexo B.

➤ Determinação dos dados introduzidos no modelo Austroads para prever rodeiras em pavimentos granulares com tratamento superficial

Todos os parâmetros determinados foram calculados com base nos Quadros e equações apresentadas no subcapítulo 3.3 e no Anexo B.

É também importante referir que, com base nos diferentes tipos de clima apresentados no Quadro 3.12 e nas regiões da Figura 6.4, criou-se o Quadro 6.12 que descreve os diferentes tipos de clima observados em Portugal Continental com os respetivos índices de humidade de *Thornthwaite*.

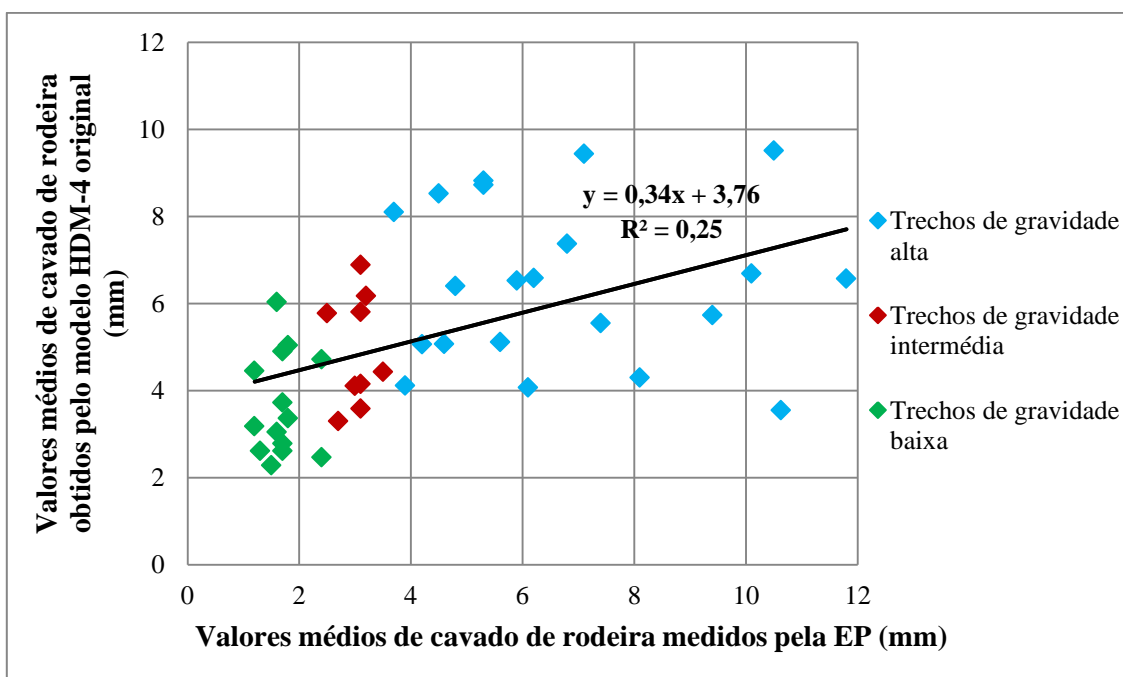
Foi com base no Quadro 6.12 que se escolheram os índices de humidade que deveriam ser utilizados de acordo com a localização dos trechos.

**Quadro 6.12 – Diferentes Tipos de Clima existentes em Portugal Continental com os respetivos Índices de Humidade de *Thornthwaite***

Região	Tipo de Clima	Descrição do Tipo de Clima	Índice de Humidade
D	B1	Húmido	20 a 40
E	C2	Sub-húmido molhado	0 a 20
F	C1	Sub-húmido seco	-20 a 0

**6.4.2. Resultados do HDM-4 original para os trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)**

Após a determinação dos valores de cavado de rodeira obtidos pelo HDM-4 original (sem calibração) dos trechos com pavimento do tipo AM (ver Anexo F, Quadros F. 1, F. 2 e F. 3) realizou-se um gráfico que compara os valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo modelo e determinou-se a correlação que existe entre eles (ver Figura 6.12).



**Figura 6.12 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 original dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)**

A correlação ( $R^2 = 0,25$ ) obtida com o gráfico da Figura 6.12 mostra que existe alguma correlação entre os valores obtidos pelo modelo e os medidos pela EP.

É também observável, na mesma figura, que a 0 mm de cavado de rodeira medido pela EP corresponde a 3,76 mm de cavado de rodeira previsto pelo HDM-4, ou seja, o ponto de interceção com o eixo das ordenadas é (0;3,76). Este é um aspeto que necessita de ser corrigido e/ou ajustado da melhor forma possível para que se consiga obter o que realmente faz sentido, que o ponto de interceção com o eixo das ordenadas seja (0;0) e não (0;3,76).

Assim, conclui-se que, devido às duas razões apontadas anteriormente, é fundamental realizar calibrações ao modelo para que os resultados por ele obtidos se consigam aproximar melhor dos medidos e que a linha de tendência passe pela origem.

Com o objetivo de melhorar os resultados obtidos pelo modelo, testaram-se, então, nos trechos escolhidos, algumas calibrações existentes. No subcapítulo 6.5, apresentam-se os resultados obtidos com as diferentes calibrações utilizadas.

#### 6.4.3. Resultados do Austroads original para os trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial)

Realizou-se o mesmo tipo de estudo para os trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial), mas utilizou-se o modelo Austroads original (sem calibração) indicado para este tipo de trechos. Os valores medidos pela EP e os obtidos com este modelo apresentam-se no Anexo G, Quadro G.1 e a comparação entre ambos encontra-se no gráfico da Figura 6.13.

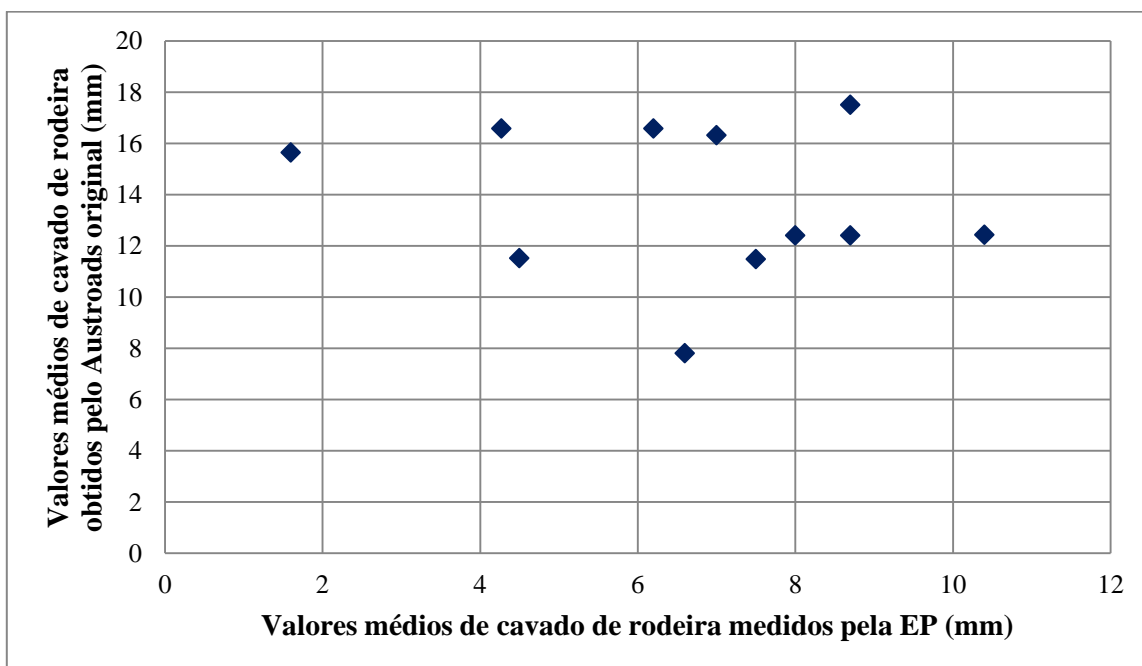


Figura 6.13 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo Austroads original dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial)

Pela Figura 6.13, observa-se que não é fácil obter uma correlação aceitável entre os valores medidos pela EP e os previstos pelo modelo Austroads original. A dificuldade em encontrar uma

correlação poderá resultar do problema de fiabilidade dos dados disponíveis relativos ao CBR da fundação e que, tal como já mencionado no subcapítulo 6.3, podem alterar significativamente o valor de SNC.

Pelas razões mencionadas decidiu-se não realizar qualquer tipo de calibração para os trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial). As calibrações que poderiam ser realizadas não conseguiriam ter a capacidade de introduzir uma correlação que se pudesse considerar aceitável a valores tão dispersos como são os da Figura 6.13.

## 6.5. Resultados de calibrações existentes

Utilizaram-se, então, calibrações existentes nos trechos com pavimentos do tipo AM (mistura betuminosa). As calibrações testadas para as secções deste tipo foram as seguintes:

- Modelo HDM-4 Chileno (De Solminhac, *et al.*, 2004);
- Modelo HDM-4 Australiano da Austroads (Hickson, 2008);
- Modelo HDM-4 Sul-Africano (Rohde, *et al.*, 1998);
- Modelo HDM-4 Indiano (Thube, 2011).

Os coeficientes de calibração adotados foram os referidos no subcapítulo 3.4.

### 6.5.1. Modelo HDM-4 Chileno

Os valores médios de cavado de rodeira obtidos com o modelo HDM-4 Chileno encontram-se, juntamente com os valores medidos pela EP, no Anexo H, Quadros H. 1, H. 2 e H. 3. Com esses valores construiu-se o gráfico da Figura 6.14.

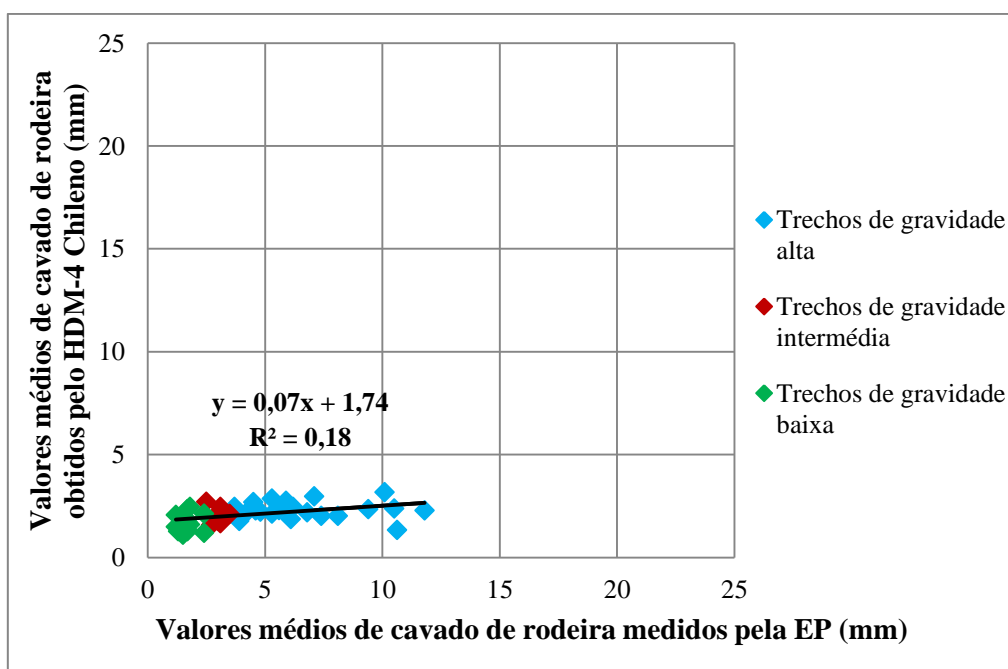


Figura 6.14 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Chileno dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)

Os valores previstos por este modelo calibrado estão em geral compreendidos entre 1 e 3 mm, o que não traduz a dispersão de valores que foram medidos pela EP.

Observa-se que, com a utilização deste modelo calibrado nos trechos escolhidos, se obteve uma pior correlação ( $R^2 = 0,18$ ) do que a obtida sem qualquer tipo de calibração ( $R^2 = 0,25$ ), permitindo concluir que, com a utilização desta calibração, não foi possível melhorar o ajustamento entre os valores previstos e os medidos. Porém, o ponto de interceção com o eixo das ordenadas obtido foi, aproximadamente, (0;1,74) que é muito mais próximo da origem do que o obtido pelo HDM-4 original (0;3,76).

### 6.5.2. Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória

No Anexo H, Quadros H. 4, H. 5 e H. 6 apresentam-se os valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os calculados com o modelo HDM-4 Australiano da Austroads do Estado de Vitória.

Com os valores anteriores realizou-se um gráfico que permitisse relacionar os valores medidos pela EP com os obtidos com o modelo HDM-4 Australiano da Austroads do Estado de Vitória (ver Figura 6.15).

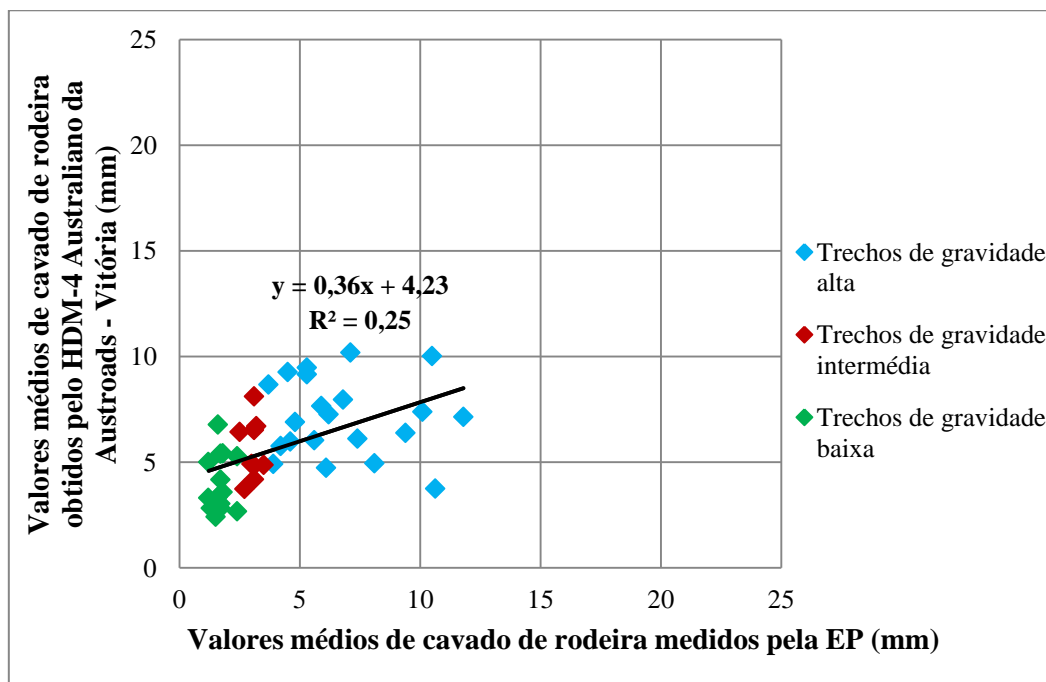


Figura 6.15 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)

Verifica-se que existe uma razoável correlação entre os valores medidos e os obtidos pelo modelo. No entanto, a correlação afasta-se da linearidade havendo uma subavaliação pelo modelo para os trechos com rodeiras mais elevadas e uma sobreavaliação para os trechos com rodeiras mais baixas.

A correlação obtida ( $R^2 = 0,25$ ) entre os valores medidos e os previstos (ver Figura 6.15) é idêntica à do modelo original e o ponto de interseção com o eixo das ordenadas (0;4,23) apresenta uma posição semelhante ao do modelo original (0;3,76).

### 6.5.3. Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia

Os valores obtidos com esta calibração encontram-se, juntamente com os medidos pela EP, no Anexo H, Quadros H. 7, H. 8 e H. 9. O gráfico construído com base nesses valores está na Figura 6.16.

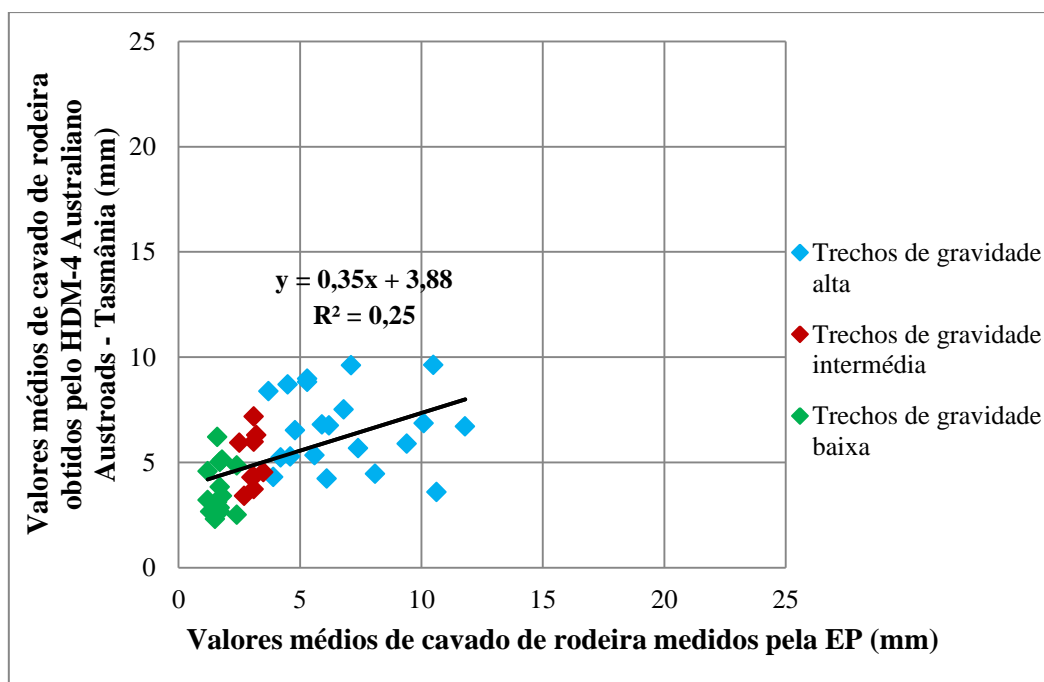


Figura 6.16 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)

As conclusões que podem ser retiradas deste modelo são semelhantes às do Estado de Vitória, não havendo alterações significativas em relação ao modelo original.

### 6.5.4. Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia

Com os coeficientes de calibração deste modelo conseguiram-se obter os valores apresentados no Anexo H, Quadros H. 10, H. 11 e H. 12. Nesses quadros também se encontram os valores medidos pela EP correspondentes. A Figura 6.17 mostra o gráfico realizado com esses valores.

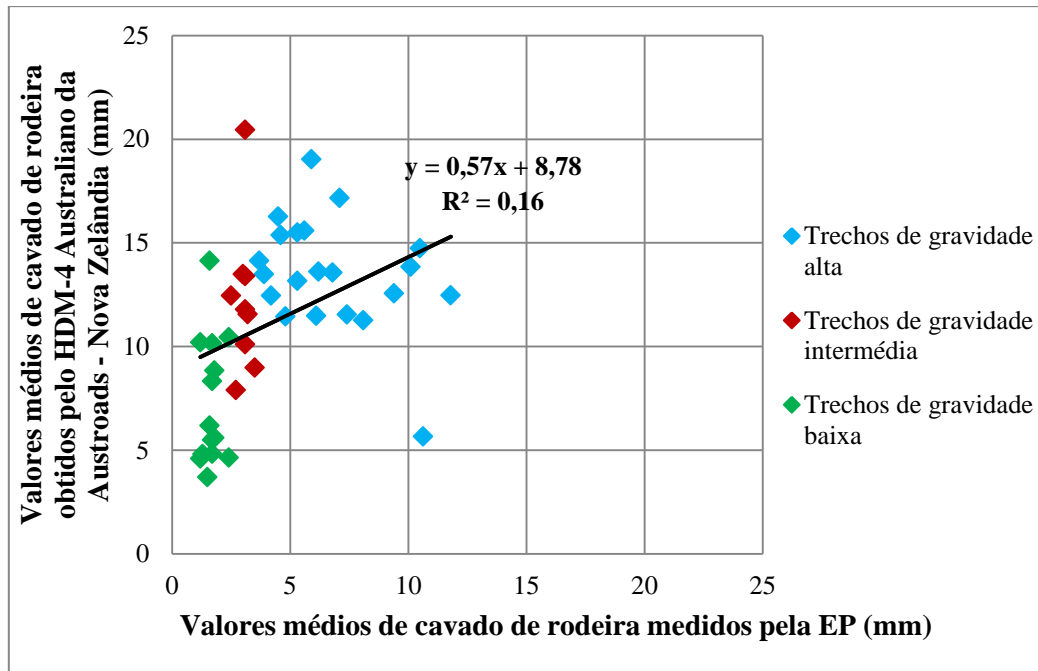


Figura 6.17 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)

Esta calibração apresenta valores muito superiores aos medidos pela EP. Para além disso, a correlação obtida entre os valores medidos e os calculados com esta calibração ( $R^2 = 0,16$ ) é pior que a do modelo original ( $R^2 = 0,25$ ) e o ponto de interseção com o eixo das ordenadas é mais distante da origem.

### 6.5.5. Modelo HDM-4 Sul-Africano

Os resultados calculados com esta calibração ao modelo HDM-4 apresentam-se no Anexo H, Quadros H. 13, H. 14 e H. 15. O gráfico realizado com esses valores encontra-se na Figura 6.18.

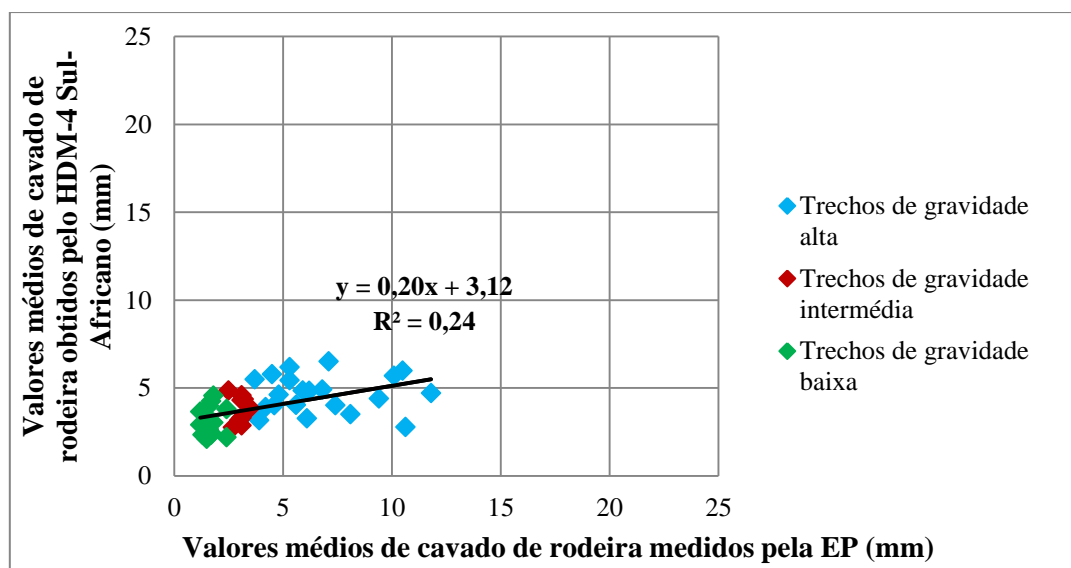


Figura 6.18 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Sul-Africano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)

Verifica-se, na Figura 6.18, que há uma boa aproximação dos valores medidos com os do modelo. No entanto, tal como no modelo HDM-4 Australiano da Austroads do Estado de Vitória e no do Estado da Tasmânia, a correlação afasta-se da linearidade havendo uma subavaliação pelo modelo para os trechos com rodeiras mais elevadas e uma sobreavaliação para os trechos com rodeiras mais baixas.

A correlação obtida ( $R^2 = 0,24$ ) é muito próxima da do modelo original ( $R^2 = 0,25$ ) e o ponto de interceção com o eixo das ordenadas (0;3,12) apresenta uma posição semelhante ao do modelo original (0;3,76).

#### 6.5.6. Modelo HDM-4 Indiano

No Anexo H, Quadros H. 16, H. 17 e H. 18 apresentam-se os valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo modelo HDM-4 Indiano. As relações encontradas entre esses valores estão na Figura 6.19.

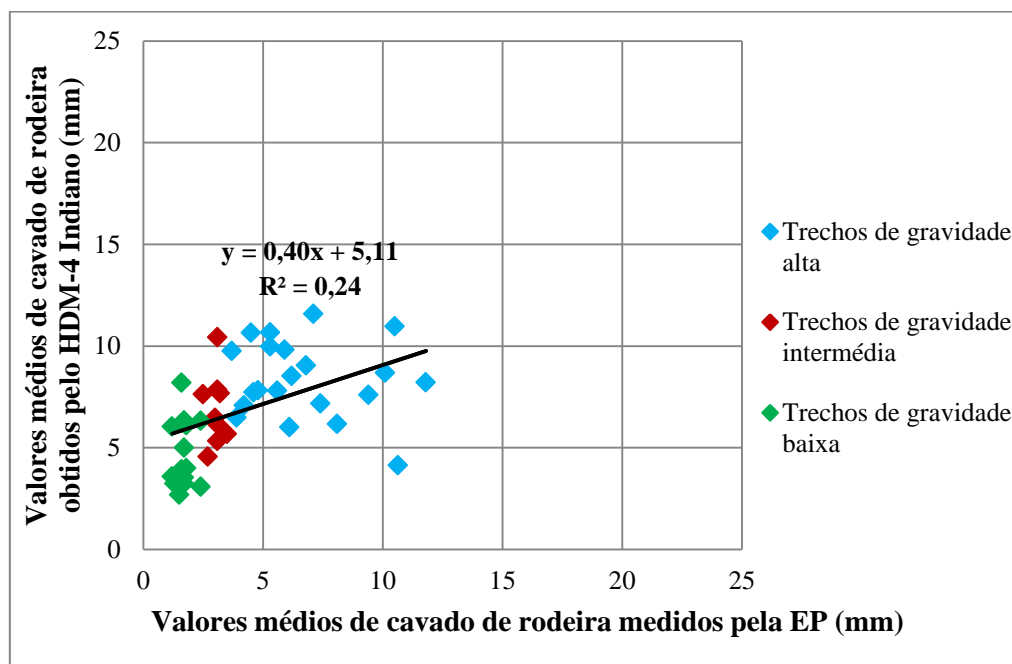


Figura 6.19 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 Indiano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa)

Com esta calibração (ver Figura 6.19), os valores previstos são, no geral, maiores que os medidos. Para valores de rodeira medidos superiores a 4 mm parece existir uma linha de tendência próxima da horizontal. Por outro lado, para valores inferiores a 4 mm parece haver uma razoável correlação.

Na Figura 6.19 observa-se que a correlação obtida ( $R^2 = 0,24$ ) é muito próxima da do modelo original ( $R^2 = 0,25$ ) e o ponto de interceção com o eixo das ordenadas (0;5,12) encontra-se mais afastado da origem do que o ponto de interceção do modelo original (0;3,76).

### 6.5.7. Conclusões

De uma forma geral não houve uma melhoria significativa dos modelos calibrados relativamente ao modelo original no ajustamento aos valores medidos. No entanto, alguns dos modelos parecem conduzir a melhores correlações para rodeiras até 4 mm, como é o caso do HMD-4 Indiano e do HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia.

Na generalidade dos casos os coeficientes de calibração analisados incidem sobre a componente estrutural da rodeira. Admite-se que uma calibração que incida sobre as restantes componentes de cálculo de rodeira possa melhorar a correlação obtida entre os valores previstos e os medidos.

Com o objetivo de alcançar uma melhor correlação, resolveu-se elaborar uma nova calibração com base nos valores obtidos com o modelo HDM-4 original e utilizando uma técnica de regressão. A parte do trabalho relativa a esta tarefa apresenta-se no subcapítulo 6.6.

## 6.6. Calibrações realizadas

### 6.6.1. Avaliação de rodeiras por parcelas usando o modelo HDM-4

Para a realização das calibrações em trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) utilizou-se o modelo HDM-4 e as equações do subcapítulo 3.2 e dividiu-se o valor total médio de cavado de rodeira nas quatro componentes seguintes:

- Densificação inicial;
- Deformação estrutural sem fendilhamento;
- Deformação estrutural com fendilhamento;
- Deformação plástica.

Os valores obtidos, para as quatro componentes, encontram-se apresentados nos Quadros 6.13, 6.14 e 6.15.

O valor total médio de cavado de rodeira, após calibração, é dado pela equação seguinte:

$$RDM = K_{rid} \times RD0 + K_{rst(uc)} \times RDST_{uc} + K_{rst(crk)} \times RDST_{crk} + K_{rpd} \times RDPD \quad (6.3)$$

Onde:

RDM – Profundidade média da rodeira de ambos os lados da via;

$K_{rid}$  – Coeficiente de calibração para a densificação inicial;

RD0 – Cavado de rodeira por densificação inicial;

$K_{rst(uc)}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural sem fendilhamento;

$RDST_{uc}$  – Cavado de rodeira estrutural sem fendilhamento;

$K_{rst(crk)}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural com fendilhamento;

$RDST_{crk}$  – Cavado de rodeira estrutural com fendilhamento;

$K_{rpd}$  – Coeficiente de calibração para a deformação plástica;

RDPD – Cavado de rodeira por deformação plástica.

Nos presentes cálculos realizados antes de qualquer calibração adotaram-se para os quatro coeficientes,  $K_{rid}$ ,  $K_{rst(uc)}$ ,  $K_{rst(crk)}$  e  $K_{rpd}$ , um valor de 1.

**Quadro 6.13 – Valores das componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras de gravidade alta**

Trechos de gravidade alta				
Trecho	RD0	RDST <sub>uc</sub>	RDST <sub>crk</sub>	RDPD
A025	2,49	1,04	0,36	1,66
A571 (48,59 km-56,51 km)	2,70	1,35	0,22	0,03
B028 (27,66 km-33,82 km)	2,89	1,08	0,35	3,77
C336 (0 km-10,9 km)	2,95	1,43	0,64	0,04
C336 (10,9 km-12,88 km)	2,95	1,47	0,65	0,05
C361 (0 km-6 km)	2,47	1,24	0,34	0,02
C399 (35,8 km-36,329 km)	3,18	1,40	1,27	0,67
C399 (36,329 km-36,434 km)	2,73	1,34	0,38	0,62
C474 (13,98 km-14,757 km)	2,21	1,22	0,58	0,10
C528	3,07	1,29	0,32	1,05
D280E (0,425 km-9 km)	2,15	1,11	0,00	5,46
D280E (9 km-14,94 km)	2,01	0,52	0,01	1,01
D344 (0 km-2,2 km)	2,46	1,14	0,13	5,78
E237 (60,93 km-68,485 km)	2,82	1,26	0,17	2,32
E237 (72,08 km-72,487 km)	2,82	1,26	0,00	2,32
E257	2,44	1,03	0,40	3,49
E536	4,68	1,71	0,06	0,23
E708 (14,8 km-18,975 km)	3,54	1,41	0,22	3,66
E708 (18,975 km-22,11 km)	3,04	1,38	0,45	3,66
F522 (48,63 km-55,6 km)	3,07	1,37	0,31	1,83
F522 (55,6 km-58,89 km)	3,43	1,67	0,22	4,11

RD0 – Cavado de rodeira por densificação inicial;

RDST<sub>uc</sub> – Cavado de rodeira estrutural sem fendilhamento;

RDST<sub>crk</sub> – Cavado de rodeira estrutural com fendilhamento;

RDPD – Cavado de rodeira por deformação plástica.

**Quadro 6.14 – Valores das componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras de gravidade intermédia**

Trechos de gravidade intermédia				
Trecho	RD0	RDST <sub>uc</sub>	RDST <sub>crk</sub>	RDPD
B701	2,25	1,27	1,55	1,80
C307	2,79	1,21	0,52	1,28
C361 (6 km-10,854 km)	2,20	1,01	0,07	0,01
C474 (14,757 km-26,266 km)	2,45	1,23	0,36	0,10
C474 (26,266 km-27,91 km)	2,21	1,22	0,57	0,10
E237 (68,485 km-72,08 km)	2,53	1,25	0,08	2,32
E287 (76,42 km-80,2 km)	2,12	1,23	0,20	0,03
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,26	0,99	0,10	0,09
F513 (443,2 km-448,5 km)	3,93	1,47	0,15	0,22

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 6.13.

**Quadro 6.15 – Valores das componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa				
Trecho	RD0	RDST <sub>uc</sub>	RDST <sub>crk</sub>	RDPD
A609 (15,37 km-18 km)	4,06	0,91	0,03	0,04
B028 (33,82 km-35,62 km)	2,63	0,36	0,00	0,19
B649 (19,556 km-22,8 km)	2,68	0,55	0,01	0,13
C097D	1,92	1,20	0,59	2,32
C137	2,25	0,77	0,01	0,02
C317	2,42	1,07	0,05	0,19
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,88	1,43	0,00	0,40
C326 (163,99 km-166 km)	2,84	1,31	0,09	0,21
C351 (10,1 km-11,65 km)	2,05	0,55	0,00	0,01
C351 (11,65 km-12,5 km)	1,91	0,54	0,00	0,01
C351 (12,5 km-26,97 km)	2,05	0,55	0,00	0,01
D365	2,09	0,68	0,00	0,01
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,90	0,35	0,00	0,03
G032	3,60	1,11	0,14	0,06

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 6.13.

### 6.6.2. Calibração realizada para a totalidade dos trechos

A regressão realizada com o Lab Fit Curve permitiu obter os valores dos quatro coeficientes da equação (6.3). O valor obtido para o coeficiente de calibração para a deformação estrutural com fendilhamento foi de -0,30. Como não se admite que esta parcela contribua para uma redução da rodeira, atribuiu-se ao  $K_{rst (crk)}$  um valor positivo reduzido de 0,1. Os valores adotados encontram-se no Quadro 6.16. Utilizando esses valores na equação (6.3), obtiveram-se os valores de HDM-4 calibrado que se apresentam no Anexo I, Quadro I. 1 e Quadro I. 2, juntamente com os valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP. Com os valores médios de cavado de rodeira do HDM-4 calibrado e com os medidos pela EP, construiu-se o gráfico da Figura 6.20. O gráfico da Figura 6.21 mostra o

peso, em percentagem, que cada uma das componentes tem sobre o valor total médio de cavado de rodeira da totalidade dos trechos.

Quadro 6.16 – Coeficientes obtidos com o Lab Fit Curve considerando a totalidade dos trechos

Coeficientes de calibração			
$K_{rid}$	$K_{rst (uc)}$	$K_{rst (crk)}$	$K_{rpd}$
0,47	2,18	0,10	0,65

$K_{rid}$  – Coeficiente de calibração para a densificação inicial;  
 $K_{rst (uc)}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural sem fendilhamento;  
 $K_{rst (crk)}$  – Coeficiente de calibração para a deformação estrutural com fendilhamento;  
 $K_{rpd}$  – Coeficiente de calibração para a deformação plástica.

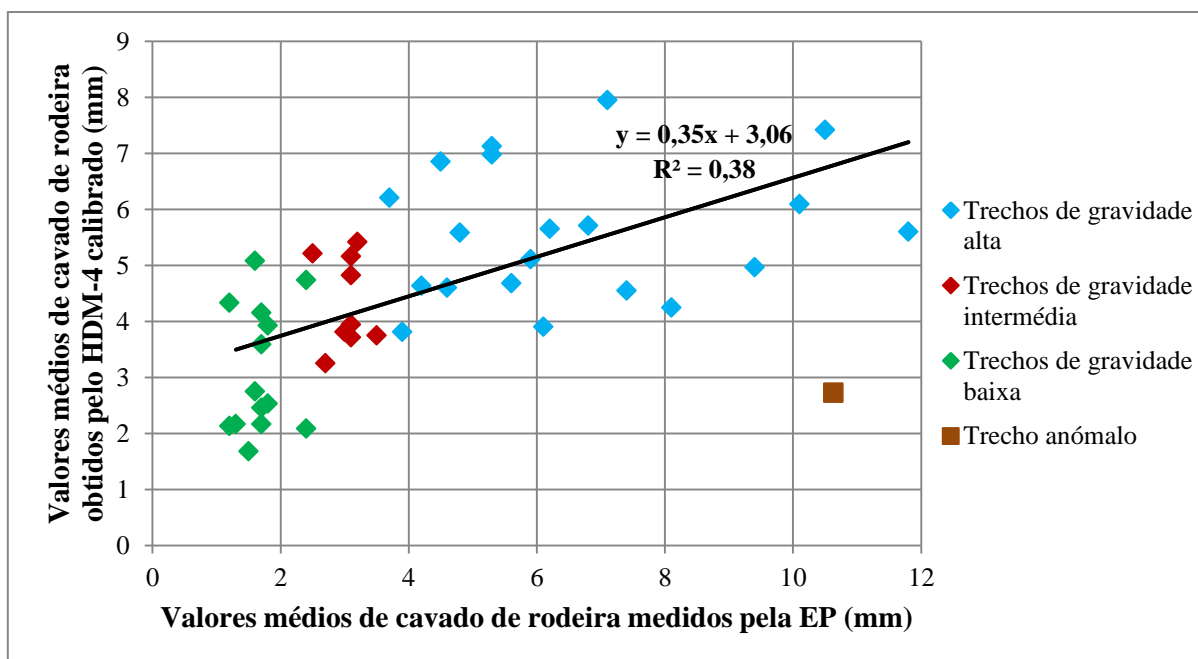


Figura 6.20 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 calibrado da totalidade dos trechos

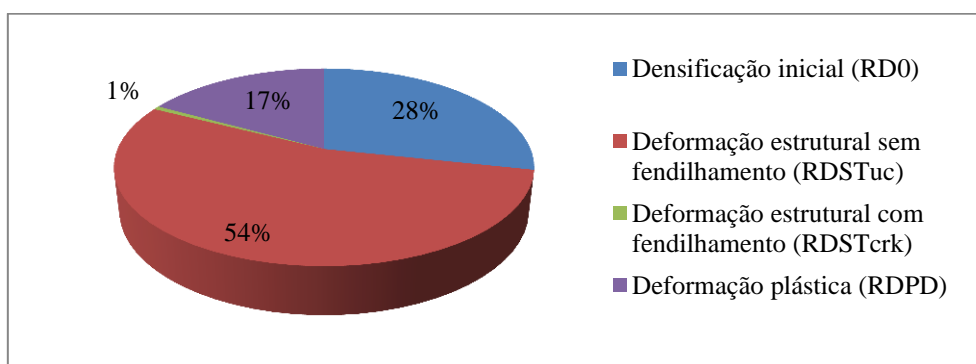


Figura 6.21 – Representação gráfica do peso de cada uma das componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira da totalidade dos trechos

No gráfico da Figura 6.20, observa-se que a correlação apresentada entre os valores medidos e os previstos pelo HDM-4 calibrado ( $R^2 = 0,38$ ) é melhor do que a apresentada quando se compara os valores medidos com os previstos pelo HDM-4 original ( $R^2 = 0,25$ ). O ponto de interseção com o eixo das ordenadas (0;3,06) apresenta uma posição semelhante ao do modelo original (0;3,76).

Pelo gráfico da Figura 6.21, constata-se que a componente correspondente à deformação estrutural com fendilhamento é a que tem menos peso (1%) no valor total médio de cavado de rodeira. Sobre as restantes componentes, verifica-se que a deformação estrutural sem fendilhamento é a que mais afeta o valor total médio de cavado de rodeira, uma vez que contribui para mais de metade (54%) desse valor. A densificação inicial e a deformação plástica têm uma contribuição intermédia, representado no seu total cerca de metade do valor total de cavado de rodeira.

Analisando o gráfico da Figura 6.20 com mais detalhe, identifica-se que existe um comportamento diferenciado entre os valores médios de cavado de rodeira mais reduzidos e os mais elevados. Considerou-se que a transição entre estes dois comportamentos se situa para um valor medido de 5,9 mm. Assim, na Figura 6.22 apresentam-se duas séries distintas, uma em que se consideram os trechos que apresentam valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP até aos 5,9 mm e outra que representa os trechos com valores de cavado de rodeira medidos pela EP superiores a 5,9 mm. Observa-se para rodeiras medidas até aos 5,9 mm que a linha de tendência representativa exhibe um comportamento crescente onde a correlação entre os valores medidos e os previstos é  $R^2 = 0,49$ , enquanto a linha de tendência para rodeiras mais elevadas é, praticamente, horizontal e muito dispersa e não representa qualquer tipo de correlação ( $R^2 = 0,00$ ) entre os valores medidos e os previstos. Como as duas séries apresentam comportamentos distintos em termos de correlação entre os valores medidos e os previstos, decidiu-se realizar uma calibração em que se consideram separadamente cada uma das séries.

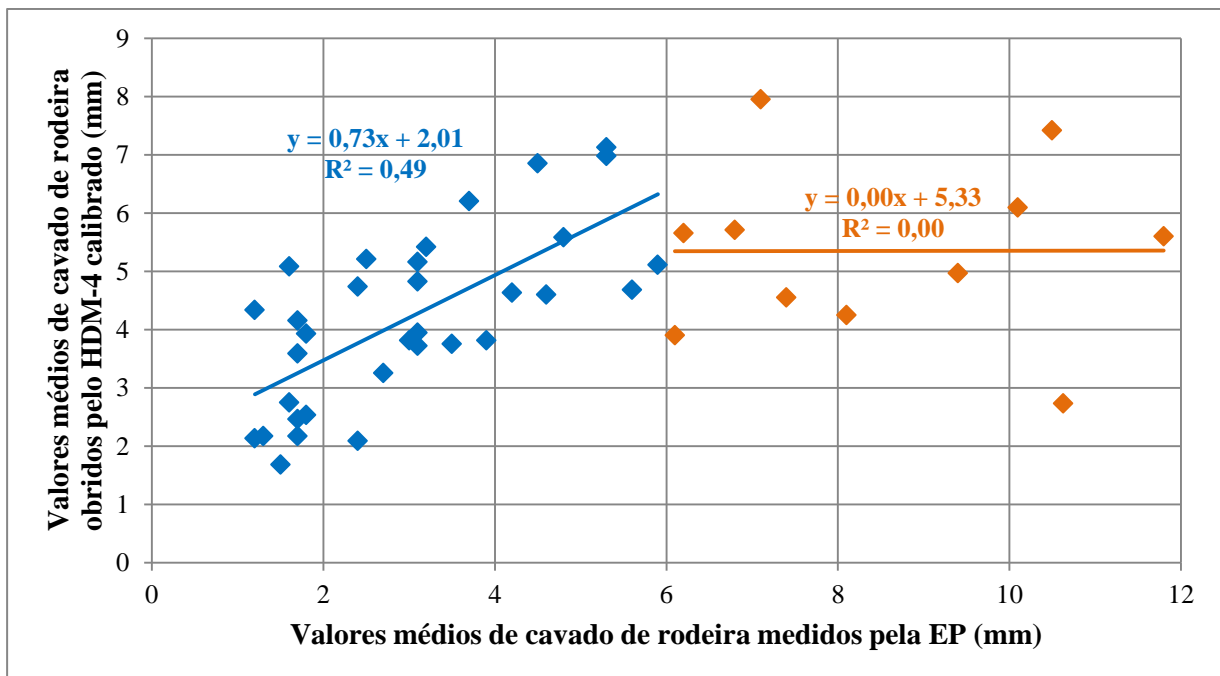


Figura 6.22 – Comparação das correlações usando um ponto de transição em valores medidos de 5,9 mm

### 6.6.3. Calibração realizada para os trechos com rodeiras até 5,9 mm

Os coeficientes de calibração obtidos com o Lab Fit Curve para os trechos com valores medidos até 5,9 mm apresentam-se no Quadro 6.17 e como se pode observar já se conseguiram obter

coeficientes de calibração de sinal positivo para que todas as componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira sejam consideradas.

Os resultados correspondentes ao HDM-4 calibrado encontram-se no Anexo I, Quadro I. 3, juntamente com os valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP. Com os valores médios de cavado de rodeira do HDM-4 calibrado e com os medidos pela EP, construiu-se o gráfico da Figura 6.23. O gráfico da Figura 6.24 mostra o peso, em percentagem, que cada uma das componentes tem sobre o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras até 5,9 mm.

Quadro 6.17 – Coeficientes obtidos com o Lab Fit Curve considerando os trechos com rodeiras até 5,9 mm

Coeficientes de calibração			
$K_{rid}$	$K_{rst(uc)}$	$K_{rst(erk)}$	$K_{rpd}$
0,24	1,67	0,87	0,35

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 6.16.

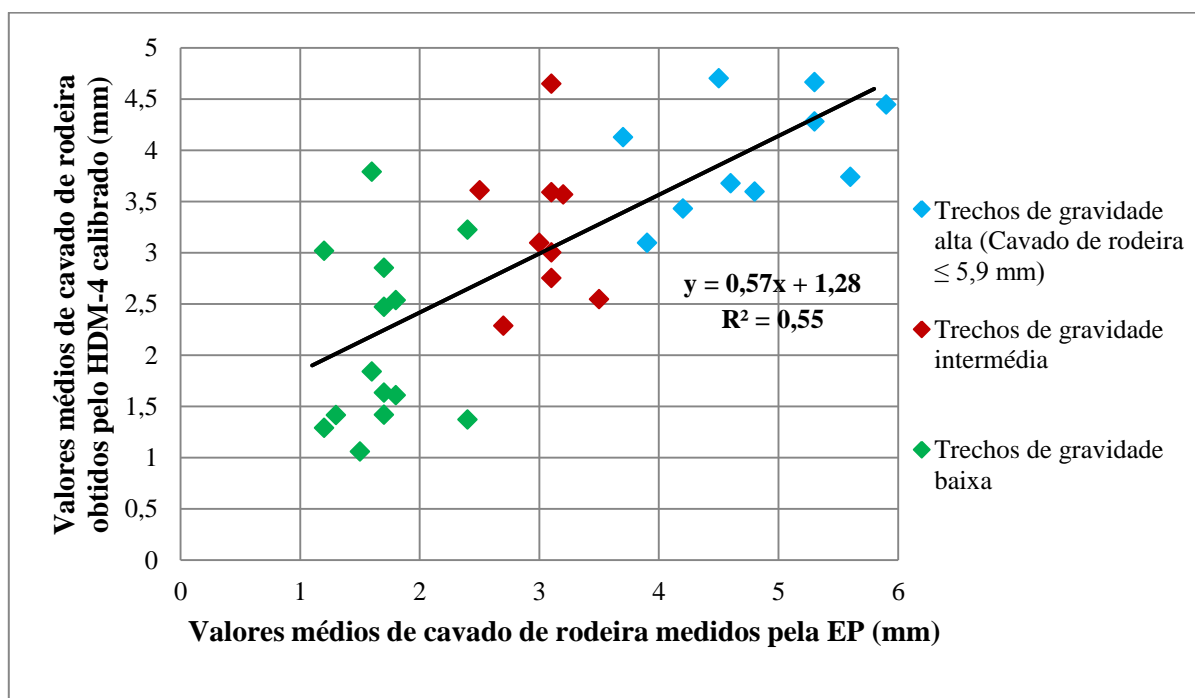


Figura 6.23 – Comparação dos valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP com os obtidos pelo HDM-4 calibrado dos trechos com rodeiras até 5,9 mm

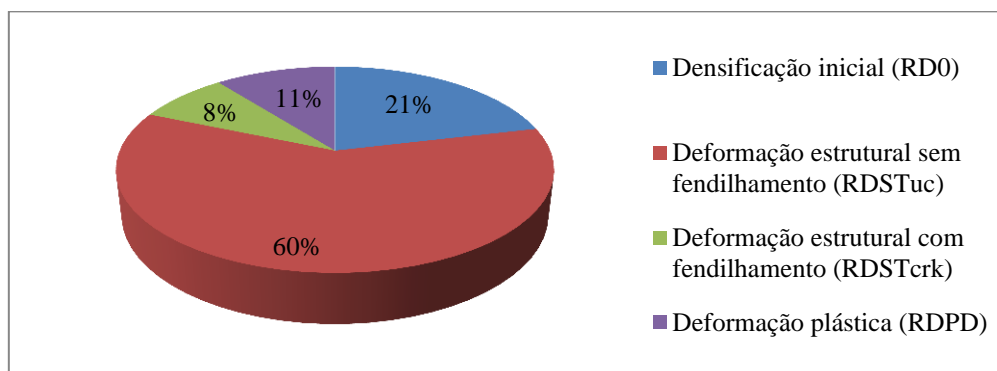


Figura 6.24 – Representação gráfica do peso de cada uma das parcelas que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira dos trechos com rodeiras até 5,9 mm

Ao fazer a calibração considerando apenas os trechos com rodeiras até 5,9 mm (ver Figura 6.23), conseguiu-se obter uma melhor correlação ( $R^2 = 0,55$ ) do que a obtida considerando a totalidade do trechos ( $R^2 = 0,38$ ). O ponto de interceção com o eixo das ordenadas, neste caso, é igualmente melhor, uma vez que está mais próximo da origem (0;1,28).

Como já foi referido, a contribuição das quatro componentes que contribuem para o valor total médio de cavado de rodeira deve ser positiva. Verifica-se pelo gráfico da Figura 6.24, que, em média, a deformação estrutural sem fendilhamento continua a ser a que mais contribui para a origem de rodeiras nestes trechos, correspondendo a um valor superior a mais de metade (60%), e a deformação estrutural com fendilhamento já contém uma percentagem mais significativa (8%). Este tipo de repartição parece estar de acordo com os valores que seriam espectáveis.

#### 6.6.4. Calibração realizada para os trechos com rodeiras superiores a 5,9 mm

Os coeficientes de calibração obtidos com o Lab Fit Curve para os trechos com rodeiras superiores a 5,9 mm encontram-se no Quadro 6.18.

**Quadro 6.18 – Coeficientes obtidos com o Labfit considerando os trechos com rodeiras superiores a 5,9 mm**

Coeficientes de calibração			
$K_{rid}$	$K_{rst (uc)}$	$K_{rst (erk)}$	$K_{rpd}$
4,68	-5,36	0,69	0,63

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro 6.16.

Observa-se que dentro dos coeficientes obtidos, existe um que é, do ponto visto matemático, bastante negativo ( $K_{rst (uc)}$ ) o que não se admite, uma vez que esta componente não pode contribuir para uma redução da rodeira. Acresce-se o facto de a linha de tendência obtida na Figura 6.22 para este tipo de trechos não apresentar qualquer tipo de correlação ( $R^2 = 0,00$ ). Pelas duas razões mencionadas anteriormente, não faz sentido realizar qualquer tipo de calibração para este tipo de trechos, uma vez que a mesma não teria a capacidade de introduzir uma correlação que se pudesse considerar aceitável a valores tão dispersos.

Tudo isto permite concluir que, mesmo com calibrações, as previsões do modelo HDM-4 não se conseguem ajustar bem a trechos com rodeiras mais elevadas. Esta situação pode resultar por o efeito dos fatores considerados no modelo HDM-4 não estar suficientemente bem expresso ou existirem outros fatores que deveriam ser contabilizados no modelo.



## 7. Considerações Finais

### 7.1. Conclusões

Ao longo da realização deste trabalho foi possível reunir algumas informações relevantes sobre as rodeiras existentes nos pavimentos da rede nacional rodoviária. Verificou-se que quanto mais deteriorada, em termos de rodeira, é uma dada secção maior é a homogeneidade entre os valores de cavado de rodeira fazendo com que esses mesmos valores se aproximem mais de uma distribuição dita normal. O mesmo já não se verifica quando uma dada secção apresenta valores reduzidos de cavado de rodeira, uma vez que, nesse caso, passam a apresentar uma distribuição log-normal. Constatou-se ainda que, para secções ou subsecções homogêneas a dispersão entre os valores de cavado de rodeira é muito menor do que em secções que não sejam homogêneas, resultando um coeficiente de variação, ou seja, o quociente entre o desvio padrão e a média de cerca de 30%. Caso não seja considerada a divisão das secções em subsecções homogêneas, obtém-se um coeficiente de variação de cerca de 50%, idêntico ao que resulta da aplicação do modelo HDM-4. Outra informação bastante útil que se obteve neste trabalho foi que na rede nacional rodoviária não existem valores médios, por secção, de cavado de rodeira superiores a 13 mm.

No que diz respeito aos parâmetros considerados no modelo HDM-4, concluiu-se que os que têm mais influência sobre o cavado de rodeira, ou seja, os que mais contribuem para o aumento do seu valor são, o número estrutural modificado do pavimento (SNC), o tráfego e o fendilhamento e o parâmetro que menos influencia as rodeiras é o tipo de betume. Embora o efeito do teor em água, em cada um dos três aspetos analisados (precipitação, eficiência do sistema de drenagem e profundidade do nível freático), não seja muito significativo, quando considerados em conjunto podem alterar de forma importante o valor de cavado de rodeira.

A visita a algumas secções que fazem parte da rede nacional rodoviária e cuja informação se encontra na base de dados fornecida pela EP, permitiu constatar que o modelo HDM-4 considera os fatores mais importantes, mas existe a possibilidade de o efeito de alguns deles não estar suficientemente bem expresso, como é o caso do efeito da eficiência do sistema de drenagem e do fendilhamento. Para além disso, no decorrer das visitas também se identificaram dois fatores que têm forte possibilidade de serem responsáveis pela origem/agravamento de rodeiras e que não são contabilizados no modelo. Esses fatores são o tipo de agregado e a quantidade de betume utilizados na mistura betuminosa que constitui a camada de desgaste dos pavimentos rodoviários.

Após a validação dos dados de 91 trechos presentes na base de dados fornecida pela EP, excluíram-se alguns e dentro dos escolhidos, verificou-se que os trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) apresentam uma relação logarítmica entre os valores de SNC e de  $N_{80Y}$  (Número de passagens por ano de um eixo-padrão de 80 kN) muito semelhante à proposta pela AASHTO, permitindo constatar que, apesar de os métodos de dimensionamento de pavimentos adotados por Portugal serem diferentes dos da AASHTO, as relações obtidas entre SNC e  $N_{80Y}$  são muito próximas. Quanto aos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial), a relação encontrada entre os valores de SNC e de  $N_{80Y}$  aproxima-se mais de uma relação linear.

Relacionando o fendilhamento com os valores de cavado de rodeira dos trechos com pavimento do tipo AM, verificou-se que nem sempre os trechos com maior cavado de rodeira correspondem a locais com maior fendilhamento, o que indica que o fendilhamento não é o fator, ou pelo menos não é o único, responsável pelos valores de cavado de rodeira observáveis nos trechos de gravidade alta presentes na rede nacional rodoviária.

A última tarefa deste trabalho foi desenvolver modelos de previsão de rodeiras para a rede nacional rodoviária com base em medições realizadas pela EP. Para a sua realização, aplicaram-se, inicialmente, os dados dos trechos com pavimento do tipo AM no modelo HDM-4 original enquanto os dados dos trechos com pavimento do tipo ST foram aplicados no modelo Austroads original para pavimentos granulares com tratamento superficial e compararam-se os resultados obtidos pelos modelos com os valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP. Concluiu-se que, nos trechos com pavimento do tipo AM, os resultados do modelo HDM-4 original correlacionam-se razoavelmente com os medidos pela EP e o ponto de interceção com o eixo das ordenadas corresponde a um cavado de rodeira de 3,76 mm. Quanto aos trechos com pavimento do tipo ST, verificou-se que não é fácil obter uma correlação aceitável entre os valores medidos pela EP e os previstos pelo modelo Austroads original. A dificuldade em encontrar uma correlação poderá resultar do problema de fiabilidade dos dados disponíveis relativos ao CBR da fundação e que podem alterar significativamente o valor de SNC.

Com o objetivo de aproximar melhor os resultados obtidos pelo modelo HDM-4 original com os medidos pela EP e de obter uma linha de tendência que passe pela origem, testaram-se, então, nos trechos com pavimento do tipo AM, algumas calibrações existentes. Decidiu-se não realizar qualquer tipo de calibração para os trechos com pavimento do tipo ST, uma vez que as calibrações que poderiam ser realizadas não conseguiriam ter a capacidade de introduzir uma correlação que se pudesse considerar aceitável a valores tão dispersos.

As calibrações existentes utilizadas nos trechos com pavimento do tipo AM foram as seguintes:

- Modelo HDM-4 Chileno (De Solminhac, *et al.*, 2004);
- Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória (Hickson, 2008);
- Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia (Hickson, 2008);
- Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia (Hickson, 2008);
- Modelo HDM-4 Sul-Africano (Rohde, *et al.*, 1998);
- Modelo HDM-4 Indiano (Thube, 2011).

De uma forma geral não houve uma melhoria significativa dos modelos calibrados relativamente ao modelo original no ajustamento aos valores medidos. No entanto, alguns dos modelos parecem conduzir a melhores correlações para rodeiras até 4 mm, como é o caso do HMD-4 Indiano e do HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia. Na generalidade dos casos os coeficientes de calibração analisados incidem sobre a componente estrutural da rodeira. Admite-se que uma calibração que incida sobre as restantes componentes de cálculo de rodeira possa melhorar a correlação obtida entre os valores previstos e os medidos.

Com o objetivo de alcançar uma melhor correlação, resolveu-se elaborar uma nova calibração com base nos valores obtidos com o modelo HDM-4 original e utilizando uma técnica de regressão, através da utilização do programa informático Lab Fit Curve.

Considerando a totalidade dos trechos na elaboração da nova calibração, obteve-se uma correlação entre os valores medidos e os previstos pelo HDM-4 calibrado ( $R^2 = 0,38$ ), melhor do que a apresentada quando se comparou os valores medidos com os previstos pelo HDM-4 original ( $R^2 = 0,25$ ). O ponto de interseção com o eixo das ordenadas apresentou uma posição semelhante ao do modelo original.

Após uma análise detalhada do gráfico que relaciona os valores medidos pela EP com os previstos pelo HDM-4 calibrado, verificaram-se comportamentos diferenciados entre os valores médios de cavado de rodeira mais reduzidos e os mais elevados. Observou-se que para rodeiras medidas até aos 5,9 mm a linha de tendência representativa exibe um comportamento crescente onde a correlação entre os valores medidos e os previstos é  $R^2 = 0,49$ , enquanto a linha de tendência para rodeiras mais elevadas é, praticamente, horizontal e muito dispersa e não representa qualquer tipo de correlação ( $R^2 = 0,00$ ) entre os valores medidos e os previstos, tendo-se decidido realizar uma calibração em que se consideram separadamente cada um dos casos.

Ao fazer a calibração considerando apenas os trechos com rodeiras até 5,9 mm, conseguiu-se obter uma melhor correlação ( $R^2 = 0,55$ ) do que a obtida considerando a totalidade do trechos. O ponto de interseção com o eixo das ordenadas, neste caso, é igualmente melhor, uma vez que está mais próximo da origem. Quanto aos trechos com rodeiras superiores a 5,9 mm, obteve-se um dos coeficientes de calibração bastante negativo, o que não se admite, uma vez que esta componente não pode contribuir para uma redução da rodeira. Acresce-se o facto de a linha de tendência obtida para este tipo de trechos não apresentar qualquer tipo de correlação. Por essas duas razões, não faz sentido realizar qualquer tipo de calibração para este tipo de trechos, uma vez que a mesma não teria a capacidade de introduzir uma correlação que se pudesse considerar aceitável a valores tão dispersos.

Tudo isto permite concluir que as previsões do modelo HDM-4 apenas se ajustam bem a trechos da rede nacional rodoviária que apresentem valores médios de rodeiras até aos 5,9 mm. Quanto aos trechos com rodeiras mais elevadas, as previsões do modelo HDM-4, mesmo com calibrações, não se conseguem ajustar bem. Esta situação pode resultar por o efeito dos fatores considerados no modelo HDM-4 não estar suficientemente bem expresso ou existirem outros fatores que deveriam ser contabilizados no modelo.

Note-se ainda que, dentro das quatro componentes que contribuem para o valor médio de cavado de rodeira (densificação inicial, deformação estrutural sem fendilhamento, deformação estrutural com fendilhamento e deformação plástica), a que mais contribui para a origem de rodeiras em trechos com pavimento do tipo AM com rodeiras até 5,9 mm é a deformação estrutural sem fendilhamento e a que tem menos peso é a deformação estrutural fendilhada.

## 7.2. Trabalhos futuros

Com a realização deste trabalho constatou-se que a base de dados utilizada pela EP pode ser utilizada para desenvolver modelos de previsão de rodeiras para a rede nacional rodoviária.

Contudo, sugere-se que, para algumas secções presentes na referida base, se realizem ajustamentos dos dados. Para isso deve-se:

- Utilizar geo-radares para confirmar a estrutura das secções;
- Realizar ensaios de carga do tipo FWD para avaliar a capacidade estrutural do pavimento (SNC), quer através do módulo de deformabilidade das camadas do pavimento quer para atender ao efeito da fundação, utilizando as correlações entre o CBR e o módulo de deformabilidade;
- Realizar contagens que permitam confirmar os dados de tráfego;
- Elaborar mais inspeções às secções para que a evolução das rodeiras e do fendilhamento seja mais completa.

Para esclarecer a situação das rodeiras superiores a 5,9 mm poderá ser necessário elaborar novos modelos que expressem melhor os fatores que influenciam as rodeiras mais elevadas. Para tal, é essencial que se visite o maior número possível de secções com rodeiras que fazem parte da rede nacional rodoviária para que sejam identificados mais fatores responsáveis pela origem de rodeiras que não estejam a ser contabilizados nos modelos e fazer com que os mesmos possam vir a ser contabilizados.

## Referências Bibliográficas

- AASHO. 1962.** *The AASHO road test: Report 5 - Pavement Research.* HRB Special Report 61E. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. 1993.** *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Technical Report.* American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Africon. 1995.** *Rut Depth Survey on TPA Roads.* Internal Report. Africon International Engineering, Pretoria.
- Bennett, C. e Wang, H. 2002.** *Harmonising Automated Rut Depth Measurements.* Transfund New Zealand Research Report. New Zealand.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado Santos, L. 2011.** *Pavimentos Rodoviários.* Edições Almedina, Coimbra.
- CEN. 1999.** *EN 12591: 1999 - Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens.* Brussels.
- CEN. 2003.** *EN 13036-7: 2003 - Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 7: Irregularity measurement of pavement courses: the straightedge test.* Brussels.
- Cenek, P. e Patrick, J. 1994.** *New Zealand Experience in Comparing Manual and Automatic Pavement Condition Rating Systems.* Third International Conference on Managing Pavements. Vol. 2, Transportation Research Board, San Antonio, Texas.
- CRRI. 1993.** *Pavement Performance Study: Study of Existing Pavement Sections.* Vol. II. Data Management and Model Development. New Delhi.
- Choummanivong, L. e Martin, T. 2009.** *Pavement Structural Deterioration.* Contract Report. Austroads Project AT1064. ARRB Group, Vermont South.
- COST. 1997.** *COST 324 - Long Term Performance of Road Pavements.* Final Report. European Cooperation in field of Scientific and Technical Research.
- COST. 1999.** *COST 333 - Development of New Bituminous Pavement Design Method.* Final Report of the Action. European Cooperation in field of Scientific and Technical Research, Luxembourg.
- COST. 2008.** *COST 354 - Performance Indicators for Road Pavements.* Final Report. European Cooperation in field of Scientific and Technical Research.
- De Solminhac, H., Hidalgo, P., Salgado, M. e Valdés, M. 2004.** *Calibración de Modelos de Comportamiento HDM de Pavimentos Asfálticos a las Condiciones de Chile.* Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- EP. 2009a.** *Sistema de Gestão de Pavimentos. Manual de Utilização.* Estradas de Portugal, Almada.

- EP. 2009b.** *Caderno de Encargos Tipo de Obra. Métodos Construtivos - Pavimentação.* Estradas de Portugal, Almada.
- Fontul, S. 2005.** *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários.* Curso FUNDEC/LNEC. Acedido em Março de 2013, em [http://www.lnec.pt/organizacao/dt/nira/cursoCRPR/apresentacao\\_geral.pdf](http://www.lnec.pt/organizacao/dt/nira/cursoCRPR/apresentacao_geral.pdf).
- Fridtjof T. 2004.** *Generating homogeneous road sections based on surface measurements: available methods.* Paper No. 48. Swedish National Road and Transport Research Institute, Berlin.
- Gerstman, B. 2008.** *Basic Biostatistics - Statistics for Public Health Practice.* Jones and Bartlett Publishers, Inc, Sudbury.
- Gonçalves, F. 1999.** *O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis.* Acedido em Junho de 2013, em <http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/09.pdf>.
- HCT. 2001.** *Equipment Calibration and Validation. Contract SM3-688/P6/10.* Report to Transit New Zealand. HTC Infrastructure Management Ltd., Auckland.
- Hickson, I. 2008.** *Development of HDM-4 Road Deterioration (RD) Model Calibration for Sealed Granular and Asphalt Roads.* Austroads Publication No. AP-T97/08. Sydney.
- Hickson, I. 2010.** *Interim Network Level Functional Road Deterioration Models.* Austroads Publication No. AP-T158/10. Sydney.
- INMG. 1990.** *O Clima de Portugal.* Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa.
- IPMA. 2013.** *Clima de Portugal Continental.* Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Acedido em Novembro de 2013, em <http://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/index.jsp?page=clima.pt.xml>.
- JAE. 1995.** *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Nacional Rodoviária.* Junta Autónoma de Estradas, Almada.
- Kavussi, A. 2004.** *Analysis of Rutting and Roughness Distresses in PCC Pavements Overlaid with Asphalt Concrete.* Manitoba.
- Li, N., Xie, W. e Haas, R. 1997.** *Investigation of Relationship Between Deterministic and Probabilistic Prediction Models in Pavement Management Systems.* Transportation Research Record 1592. Pavement Management and Performance. Transportation Research Board. pp. 70-79. Washington.
- Luz, A. 2011.** *Contribuição para a Modelação do Índice de Qualidade na Caracterização da Rede Rodoviária Nacional.* Dissertação para obtenção do Grau Mestre em Engenharia Civil. IST - Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Maia, I. 2012.** *Caracterização de Patologias em Pavimentos Rodoviários.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

- Menezes, M. 2008.** *Estudos das Características de Superfície de Pavimentos Rodoviários para Análise de Segurança do Tráfego*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. IST - Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Morgado, J. 2011.** *Implementação de um Sistema de Gestão de Pavimentos: O caso de uma rede de carácter nacional*. Ação de Formação Avançada em Gestão da Conservação de Pavimentos de Infraestruturas de Transporte, Apoio FUNDEC.
- Morosiuk, G., Riley, M. e Odoki, J. 2004.** *HDM-4 Modelling Road Deterioration and Works Effects*. Version 2. Vol. 6. The Highway Development and Management Series.
- N. D. Lea International Ltd. 1995.** *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4. RETA 5549-REG Highway Development and Management Research. Final Report*. International study of highway development and management tools.
- Paterson, W. 1987.** *Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management*. A World Bank Publication. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Pereira, P. e Miranda, V. 1999.** *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Universidade do Minho, Braga.
- PIARC. 1995.** *XXth World Road Congress*. Technical Committee on Flexible Roads. Report N° 20.08.B. Permanent International Association of Road Congress, Montréal.
- PIARC. 1998.** *International Experiment to Harmonize Longitudinal and Transverse Profile Measurement and Reporting Procedures*. Committee C1. Permanent International Association of Road Congress, Montréal.
- Picado Santos, L., Ferreira, A. e Pereira, P. 2006.** *Estruturação de um Sistema de Gestão de Pavimentos para uma Rede Rodoviária de Carácter Nacional*. Revista Engenharia Civil, Vol. 26, pp. 45-59.
- Quaresma, L. 2010.** *Apontamentos de Vias de Comunicação*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Quaresma, L. 2012.** *Apontamentos de Transportes*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Ramboll. 2010.** *LASER RST - Measurement System Users Manual*. Sweden.
- Rodrigues, C. 2013.** *Modelos de Degradação de Pavimentos: Parâmetro IRI*. Dissertação para obtenção do Grau Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Rohde, G., et al. 1998.** *The Calibration and use of HDM-IV Performance Models in Pavement Management System*. Fourth International Conference on Managing Pavements in Durban, South Africa.

- Santinho Horta, C., Costa Pereira, F., Lopes, S. e Morgado J. 2013.** *O Sistema de Gestão de Conservação de Pavimentos das Estradas de Portugal, S.A. - Balanço de uma Implementação Consolidada.* 7º Congresso Rodoviário Português, Almada.
- Santucci, L. 2001.** *Specialists Rut Resistant Asphalt Pavements. Technology Transfer Program.* Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies. University of California, Berkeley.
- Sebaaly, P., Hand, A., Epps, J., Bosch, C. 1996.** *Nevada's Approach to Pavement Management.* Transportation Research Board. Vol. 1524, pp. 109-117.
- Silva, R. 2012.** *Contribuição para o Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Fendilhamento de Pavimentos Rodoviários.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, W. e Silva, C. 2013.** *Lab Fit Curve Fitting Software - Nonlinear Regression and Treatment of Data Program (Version 7.2.48 (1999-2011)).* Acedido em Dezembro de 2013, em <http://www.labfit.net>.
- Soares, A. 2008.** *Análise da Ocorrência de Hidroplanagem num Caso Real.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Theyse, H. 2008.** *Revision of the South African Flexible Pavement Design Method. Project SAPDM-ILP. System Design: HDM4 Deterioration Models - Part 1, Pavement Models.* Pavement Modelling Corporation, Pretoria.
- Thorntwaite, C. 1948.** *An Approach Toward a Rational Classification of Climate.* Geographical Review, Vol. 38, No. 1, pp. 55-94.
- Thube, D. 2011.** *Highway Development and Management Model (HDM-4): calibration and adoption for low-volume roads in local conditions.* International Journal of Pavement Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 50-59. Taylor & Francis, New Delhi.
- TRL. 1975.** *A Guide to the Structural Design of Bitumen-Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Countries.* Overseas Road Note 31, TRL, Crowthorne.
- Veiga, J. 2012.** *Modelos de Previsão de Deformação Permanente de Pavimentos Rodoviários.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

## Anexo A – Cálculo do Fendilhamento no Modelo HDM-4

O HDM-4 caracteriza o fendilhamento segundo a gravidade do fendilhamento, grau de fissuração (baseado na área de fendilhamento) e tipo de fendilhamento (Theyse, 2008).

A gravidade, a área e o tipo de fendilhamento estão definidas no Quadro A. 1.

Quadro A. 1 – Classificação do Fendilhamento utilizada no HDM-4 (N. D. Lea International Ltd, 1995; Theyse, 2008)

Fendilhamento	Descrição
Gravidade	Classe 1: Abertura da fenda $\leq 1$ mm abertura
	Classe 2: $1 \text{ mm} < \text{Abertura da fenda} \leq 3$ mm
	Classe 3: Abertura da fenda $> 3$ mm sem desagregação
	Classe 4: Abertura da fenda $> 3$ mm com desagregação
Área	Somatório das áreas fendilhadas em $\text{m}^2$ , definida como a percentagem da área total da secção. As fendas isoladas foram convertidas em área pela multiplicação de uma largura padrão de 0,5 m.
Tipo	Foram identificados os seguintes tipos de fendilhamento: pele de crocodilo, irregular, em bloco, transversal, longitudinal.

O modelo HDM-4 considera que a área de fendilhamento total é a área que corresponde às classes 2, 3 e 4 e a área de fendilhamento aberto é apenas a que corresponde à área de fendilhamento para a classe 4. Os modelos, que são fornecidos pelo HDM-4, para a iniciação e para a propagação do fendilhamento total são diferentes dos modelos fornecidos para a iniciação e para a propagação do fendilhamento aberto. Os modelos que correspondem à iniciação e à progressão do fendilhamento aberto são extensões dos modelos do fendilhamento total (Theyse, 2008).

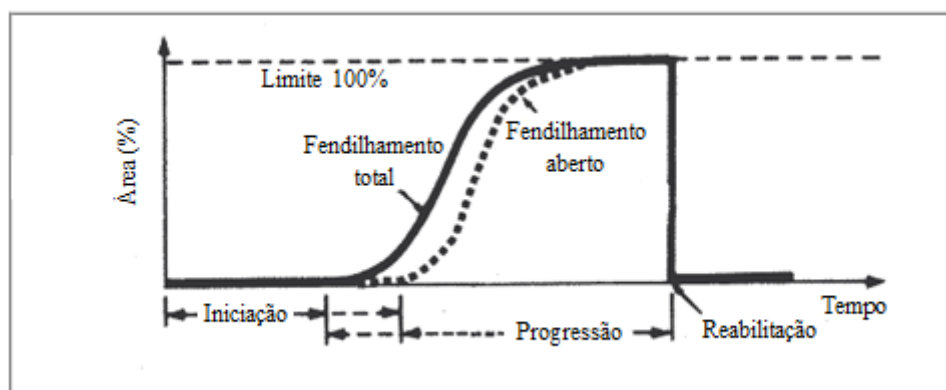


Figura A. 1 – Iniciação e progressão do fendilhamento (Theyse, 2008)

### ➤ Iniciação do fendilhamento no Modelo HDM-4

Os modelos de iniciação do fendilhamento desenvolvidos para o fendilhamento total dependem do tipo de pavimento. Com os modelos de iniciação de fendilhamento estruturais fornecidos pelo HDM-4 torna-se possível estimar o tempo, em anos, para o início do fendilhamento (Theyse, 2008).

A Figura A. 2 mostra o fluxograma utilizado para calcular o tempo para o início do fendilhamento total.

O significado da simbologia apresentada na Figura A. 2 encontra-se na equação (A.1) e/ou na lista de abreviaturas, siglas e símbolos.

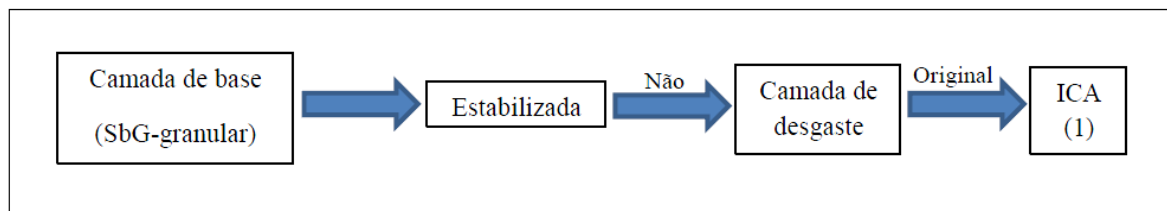


Figura A. 2 – Fluxograma utilizado para calcular o tempo para o início do fendilhamento total (ICA) (Theyse, 2008)

A equação utilizada para calcular o tempo para o início do fendilhamento é a seguinte (Theyse, 2008):

$$ICA = K_{cia} \times \left\{ CDS^2 \times a_0 \times e^{[a_1 \times SNC + a_2 \times \left(\frac{YE4}{SNP^2}\right)]} + CRT \right\} \quad (A. 1)$$

Em que:

ICA – Tempo para o início do fendilhamento total (anos);

$K_{cia}$  – Coeficiente de calibração para o tempo para o início do fendilhamento (=1);

CDS – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento (ver Quadro A. 2);

$a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro A. 3);

SNC – Número estrutural modificado;

YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelos modelos HDM;

CRT – Tempo que levou ao atraso do fendilhamento devido à execução de reparações (anos).

Para o cálculo de SNC deve-se consultar o Anexo B.

Quadro A. 2 – Valores de CDS recomendados (Theyse, 2008)

Estado da superfície		CDS
Pobre	Teor em ligante cerca de 10% abaixo do ideal ou ligante envelhecido	0,5
Normal	Ligante novo com teor ideal	1,0
Bom	Teor em ligante cerca de 10% acima do ideal	1,5

CDS – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento

**Quadro A. 3 – Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do tempo para o início do fendilhamento total (Theyse, 2008)**

Tipo de Pavimento	Material da Camada de Desgaste	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>
AMGB	Todos	4,21	0,14	-17,1
	Todos exceto CM	4,21	0,14	-17,1
	CM	13,2	0	-20,7

AMGB – Mistura betuminosa sobre base granular (*Asphalt mix & granular base*);

CM – Mistura betuminosa a frio (*Cold mix*).

Depois de calculado o tempo para o início do fendilhamento total, calcula-se o tempo para o início do fendilhamento aberto. Para isso, utiliza-se a equação (Theyse, 2008):

$$ICW = K_{cia} \times \max[(a_3 + a_4 \times ICA), a_5 \times ICA] \quad (A. 2)$$

Onde:

ICW – Tempo para o início do fendilhamento aberto (anos);

K<sub>cia</sub> – Coeficiente de calibração para o tempo para o início do fendilhamento (=1);

a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub> e a<sub>5</sub> – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro A. 4);

ICA – Tempo para o início do fendilhamento total (anos).

**Quadro A. 4 – Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo do tempo para o início do fendilhamento aberto (Theyse, 2008)**

Tipo de Pavimento	Material da Camada de Desgaste	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>
AMGB	Todos	2,46	0,93	0
	Todos exceto CM	2,04	0,98	0
	CM	0,7	1,65	0

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro A. 3.

➤ Progressão do fendilhamento no Modelo HDM-4

Os modelos de progressão do fendilhamento foram desenvolvidos tanto para o fendilhamento total como para o fendilhamento aberto (Theyse, 2008).

Para saber qual a área de fendilhamento total ao fim de cada ano é necessário calcular a progressão desse dito fendilhamento ao longo dos anos. Para isso, é necessário seguir o fluxograma representado na Figura A. 3 e utilizar as equações apresentadas no Quadro A. 5.

**Quadro A. 5 – Fórmulas utilizadas para calcular a área do fendilhamento total (ACA) (Theyse, 2008)**

Equação	Número da equação
Se $ACA_a > 0$ , então $\delta t_A = 1$ Caso contrário, $\delta t_A = \max\{0, \min[(AGE2 - ICA), 1]\}$	(A. 3)
Se $ACA_a > 50$ , então $z_A = -1$ Caso contrário, $z_A = 1$	(A. 4)
$SCA = \min[\max(ACA_a, 0.5), \{100 - \max(ACA_a, 0.5)\}]$	(A. 5)
$Y_A = [a_0 \times a_1 \times z_A \times \delta t_a + SCA^{a_1}]$	(A. 6)
$dACA = K_{cpa} \times \left(\frac{CRP}{CDS}\right) \times (100 - ACA_a)$	(A. 7)
$dACA = K_{cpa} \times \left(\frac{CRP}{CDS}\right) \times z_A \times \left(Y_{a_1} - SCA\right)$	(A. 8)
$dACA = K_{cpa} \times \left(\frac{CRP}{CDS}\right) \times \left(100 - c_{1a}^{a_1} - ACA_a\right)$ $c_{1a} = \max\{[2 \times (50^{a_1}) - SCA^{a_1} - a_0 \times a_1 \times \delta t_A], 0\}$	(A. 9)

$ACA_a$  – Área de fendilhamento total no início do ano em análise (%);  
 $\delta t_A$  – Fração do ano aplicada na progressão do fendilhamento total (anos);  
 AGE2 – Tempo que decorreu desde a colocação de uma nova camada de desgaste (anos);  
 ICA – Tempo para o início do fendilhamento total (anos);  
 $z_A$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4;  
 SCA – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4;  
 $Y_A$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4;  
 $a_0$  e  $a_1$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro A. 6);  
 $dACA$  – Incremento anual da área de fendilhamento total (%);  
 $K_{cpa}$  – Coeficiente de calibração para a área do fendilhamento total (=1);  
 CRP – Atraso da progressão do fendilhamento;  
 CDS – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento (ver Quadro A. 2);  
 $c_{1a}$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4.

**Quadro A. 6 – Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo da área de fendilhamento total (Theyse, 2008)**

Tipo de Pavimento	Material da Camada de Desgaste	$a_0$	$a_1$
AMGB	Todos	1,84	0,45
	Todos exceto CM	1,07	0,28
	CM	2,41	0,34

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro A. 3.

O cálculo da área de fendilhamento aberto é feito com base no fluxograma representado na Figura A. 4 e nas expressões apresentadas no Quadro A. 7.

**Quadro A. 7 – Fórmulas utilizadas para calcular a progressão do fendilhamento aberto (ACW) (Theyse, 2008)**

Equação	Número da equação
Se $ACW_a > 0$ , então $\delta t_W = 1$ Caso contrário, $\delta t_W = \max\{0, \min[(AGE2 - ICW), 1]\}$	(A. 10)
Se $(ACA_a \leq 5$ e $ACW_a \leq 0.5$ e $\delta t_W > 0$ ), então $\delta t_W = 0$ Caso contrário, $\delta t'_W = \delta t_W$	(A. 11)
Se $ACW_a \geq 50$ , então $z_W = -1$ Caso contrário, $z_W = 1$	(A. 12)
$SCW = \min[\max(ACW_a, 0.5), \{100 - \max(ACW_a, 0.5)\}]$	(A. 13)
$Y_W = [a_2 \times a_3 \times z_W \times \delta t_W + SCW^{a_3}]$	(A. 14)
$dACW = K_{cpw} \times \left(\frac{CRP}{CDS}\right) \times \min[(ACA_a + dACA - ACW_a), (100 - ACW_a)]$	(A. 15)
$dACW = K_{cpw} \times \left(\frac{CRP}{CDS}\right) \times \min \left[ (ACA_a + dACA - ACW_a), z_W \left( Y^{1/a_3} - SCW \right) \right]$	(A. 16)
$dACW = K_{cpw} \times \left(\frac{CRP}{CDS}\right) \times \min[(ACA_a + dACA - ACW_a), (100 - c_{1w}^{1/a_3} ACW_a)]$ $c_{1w} = \max\{[2 \times (50^{a_3}) - SCW^{a_3} - a_2 \times a_3 \times \delta t'_W], 0\}$	(A. 17)

$ACW_a$  – Área de fendilhamento aberto no início do ano em análise (%);  
 $\delta t_W$  ou  $\delta t'_W$  – Fração do ano aplicada na progressão do fendilhamento aberto (anos);  
 $AGE2$  – Tempo que decorreu desde a colocação de uma nova camada de desgaste (anos);  
 $ICW$  – Tempo para o início do fendilhamento aberto (anos);  
 $z_W$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento aberto no modelo HDM-4;  
 $SCW$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4;  
 $Y_W$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento aberto no modelo HDM-4;  
 $a_2$  e  $a_3$  – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro A. 8);  
 $dACW$  – Incremento anual da área de fendilhamento aberto (%);  
 $K_{cpw}$  – Coeficiente de calibração para a área do fendilhamento aberto (=1);  
 $CRP$  – Atraso da progressão do fendilhamento;  
 $CDS$  – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento (ver Quadro A. 2);  
 $c_{1w}$  – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento aberto no modelo HDM-4.

**Quadro A. 8 – Valores dos coeficientes utilizados para o cálculo da área do fendilhamento aberto (Theyse, 2008)**

Tipo de Pavimento	Material da Camada de Desgaste	a2	a3
AMGB	Todos	2,94	0,56
	Todos exceto CM	2,58	0,45
	CM	3,4	0,35

O significado da simbologia é idêntico ao apresentado no Quadro A. 3.

➤ Área total de fendilhamento no Modelo HDM-4

Para calcular a área total de fendilhamento usa-se a seguinte expressão (Theyse, 2008):

$$ACX = 0,62 \times ACA + 0,39 \times ACW \quad (A. 18)$$

Onde:

ACX – Área de fendilhamento;

ACA – Área de fendilhamento total;

ACW – Área de fendilhamento aberto.

O significado da simbologia apresentada nas Figuras A.3 e A.4 encontra-se nas equações (A. 1) e (A. 2), nos Quadros A. 5 e A. 7 e/ou na lista de abreviaturas, siglas e símbolos.

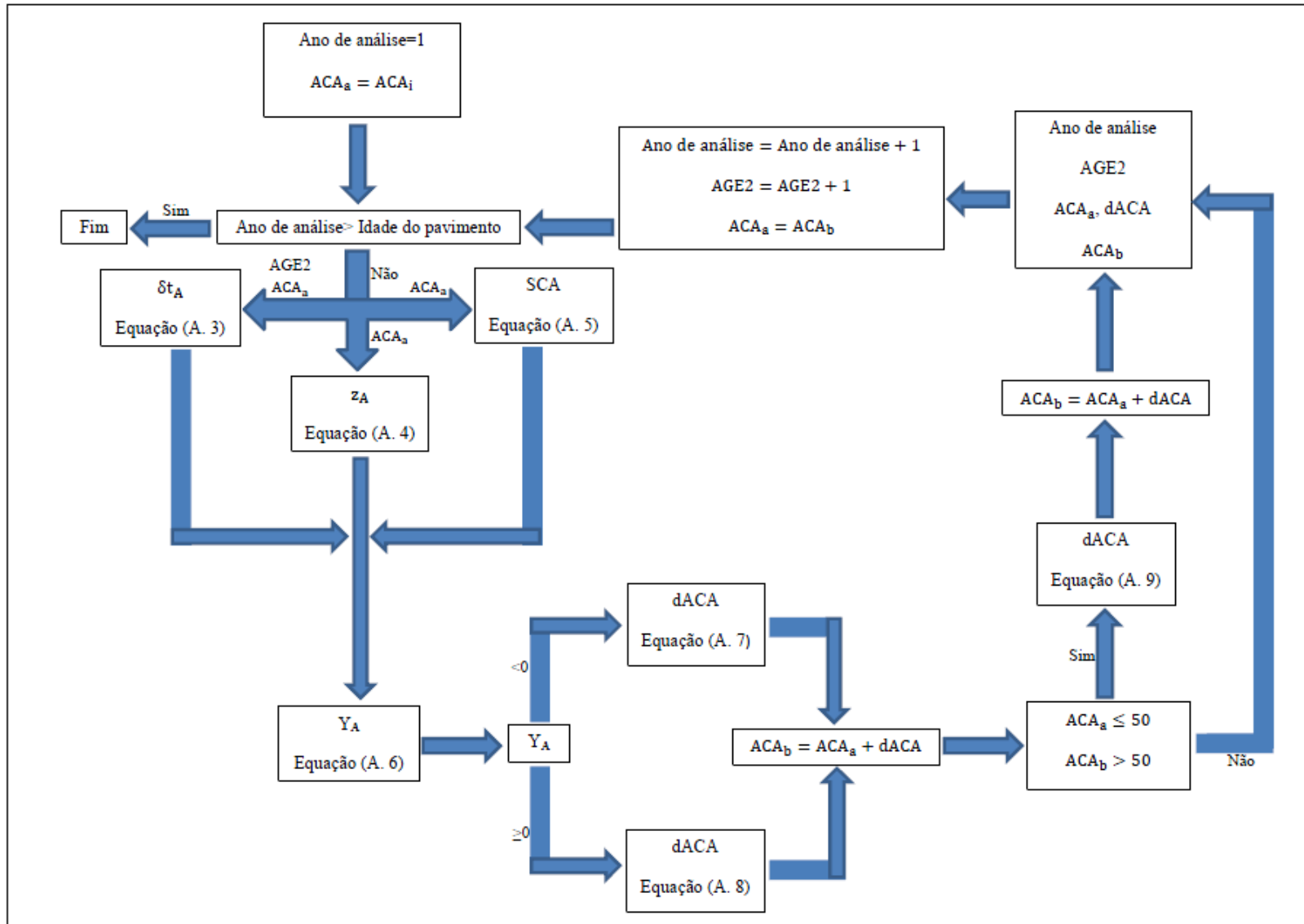


Figura A. 3 – Fluxograma utilizado para calcular a progressão do fendilhamento total (ACA) (Theyse, 2008)

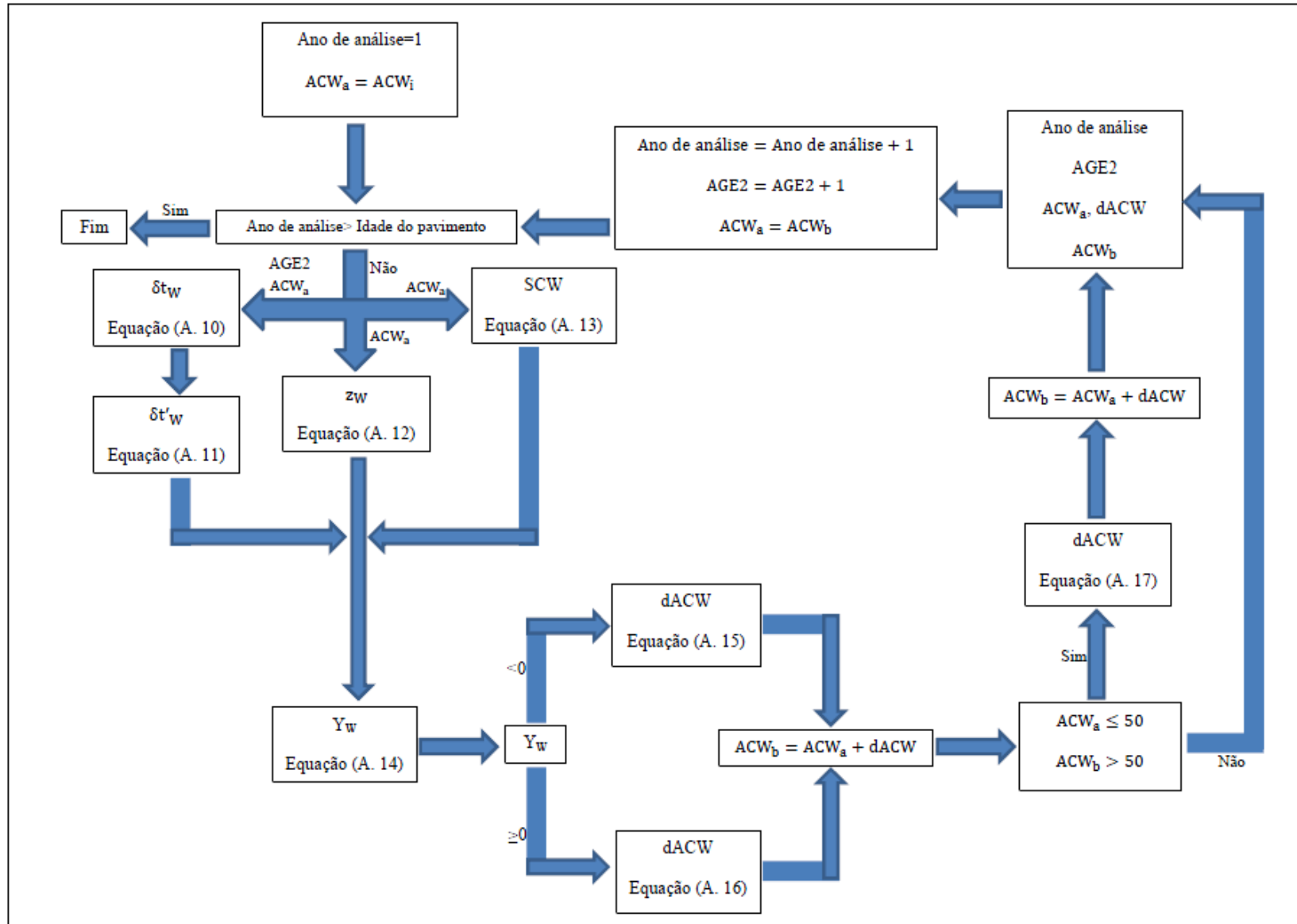


Figura A. 4 – Fluxograma utilizado para calcular a progressão do fendilhamento aberto (ACW) (HL Theyse, 2008)

## Anexo B – Cálculo do Número Estrutural Modificado do Pavimento (SNC)

O número estrutural (SN) é um parâmetro que quantifica a capacidade estrutural do pavimento. Para pavimentos flexíveis é definido por (AASHTO, 1993):

$$SN = a_1 \times h_1 + a_2 \times h_2 \times d_2 + a_3 \times h_3 \times d_3 + \dots a_x \times h_x \times d_x \quad (B. 1)$$

Onde:

SN – Número estrutural;

$a_i$  – Coeficiente estrutural da camada  $i$ ;

$h_i$  – Espessura da camada  $i$  (polegadas);

$d_i$  – Coeficiente de drenagem da camada  $i$ ;

$x$  – Número de camadas por cima do solo de fundação.

É de notar que a primeira camada, que é assumida como sendo betuminosa, não é modificada pelo coeficiente de drenagem.

No Quadro B. 1 apresentam-se os valores dos coeficientes estruturais resultantes de diversos estudos.

No Quadro B. 2 apresentam-se os valores recomendados pela AASHTO (American Association of State and Transportation Officials) para os coeficientes de drenagem.

Quadro B. 1 – Coeficientes estruturais (a<sub>i</sub>) resultantes de diversos estudos (N. D. Lea International Ltd, 1995)

Camada do Pavimento	Coeficientes Estruturais			
	TRL (1975)	AASHTO (1993)	Paterson (1987)	Cenek e Patrick (1994)
<b>Camada de Desgaste</b>				
Tratamento Superficial			0,20 - 0,40	0,300
Revestimento Superficial	0,100			
Micro-aglomerado				
Mistura Betuminosa a Quente Semi-Aberta, 25 mm				
Mistura Betuminosa	0,200		0,200	0,200
Betão Betuminoso, 25 mm	0,180			
Betão Betuminoso, 40/25 mm				
Betão Betuminoso MR30=1500 MPa			0,300	0,300
Betão Betuminoso MR30=2500 MPa			0,400	0,400
Betão Betuminoso MR30=4000 MPa			0,500	0,450
Betão Betuminoso Mod. Elast. a 20°C, E=100,000 psi (≈700MPa)		0,200		
Betão Betuminoso Mod. Elast. a 20°C, E=200,000 psi (≈1400MPa)		0,300		
Betão Betuminoso Mod. Elast. a 20°C, E=300,000 psi (≈2100MPa)		0,350		
Betão Betuminoso Mod. Elast. a 20°C, E=400,000 psi (≈21800MPa)		0,425		
<b>Camada de Base</b>				
GB (Base Granular), CBR=30%	0,070	0,095	0,00 - 0,07	
GB (Base Granular), CBR=50%	0,100	0,110	0,00 - 0,10	
GB (Base Granular), CBR=70%	0,120	0,125	0,10 - 0,12	
GB (Base Granular), CBR=90%	0,135	0,130	0,12 - 0,13	
GB (Base Granular), CBR=100%	0,140	0,140	0,140	
Macadame Hidráulico				0,140
CB (Base cimento), UCS (Resistência à comp.)=0,7 MPa	0,100	0,100	0,100	
CB (Base cimento), UCS (Resistência à comp.)=2,0 MPa	0,150	0,140	0,150	
CB (Base cimento), UCS (Resistência à comp.)=3,5 MPa	0,200	0,175	0,200	
CB (Base cimento), UCS (Resistência à comp.)=5,0 MPa	0,245	0,205	0,240	
Mistura a Quente para Base			0,320	
AB (Base Betuminosa), Estabilidade Marshall, 200lb (≈890N)		0,120		
AB (Base Betuminosa), Estabilidade Marshall, 200lb (≈1779N)		0,160		
AB (Base Betuminosa), Estabilidade Marshall, 200lb (≈3559N)		0,200		
AB (Base Betuminosa), Estabilidade Marshall, 200lb (≈5338N)		0,240		
<b>Camada de Sub-base</b>				
GB (Sub-base Granular), CBR=5%	0,055	0,040	0,060	
GB (Sub-base Granular), CBR=15%	0,085	0,090	0,090	
GB (Sub-base Granular), CBR=25%	0,100	0,100	0,100	
GB (Sub-base Granular), CBR=50%	0,120	0,130	0,120	
GB (Sub-base Granular), CBR=100%	0,140	0,140	0,140	
Solo-cimento			0,140	

**Quadro B. 2 – Valores recomendados para o coeficiente de drenagem ( $d_i$ ) para as camadas de base e sub-base não tratadas em pavimentos flexíveis (AASHTO, 1993)**

Qualidade do Sistema de Drenagem	Porcentagem do Tempo em que a Estrutura estará Exposta a Teores de Humidade Próximos ao de Saturação			
	< 1%	1 a 5%	5 a 25%	> 25%
Muito Bom	1,40 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,2
Bom	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1
Médio	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,00 - 0,80	0,8
Pobre	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,6
Muito Pobre	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,4

No HDM a contribuição da fundação é incorporada no SNC sendo considerada a sua contribuição no cálculo do SN. Assim, SN torna-se SNC por se considerar o solo de fundação (N. D. Lea International Ltd, 1995):

$$SNC = 0,0394 \sum_i^{n^{\circ} \text{ camadas}} a_i \times h_i \times d_i + SNSG \quad (B. 2)$$

$$SNSG = 3,51 \times \log_{10}(CBR) - 0,85 \times (\log_{10}(CBR))^2 - 1,43 \quad (B. 3)$$

Em que:

SNC – Número estrutural modificado;

$a_i$  – Coeficiente estrutural da camada  $i$ ;

$h_i$  – Espessura da camada  $i$  (mm);

$d_i$  – Coeficiente de drenagem da camada  $i$ ;

SNSG – Contribuição estrutural da fundação.

CBR – Índice Californiano de capacidade de carga (*California Bearing Ratio*) (%);



## Anexo C – Valores Médios de Cavado de Rodeira e Desvio Padrão

Quadro C. 1 – Valores médios de cavado de rodeira e desvio padrão medidos pela EP dos trechos de gravidade alta

Trechos de gravidade alta		
Trecho	Rodeira medida pela EP (mm)	
	Média	Desvio padrão
A025	7,4	4,09
A571 (48,59 km-56,51km)	8,1	4,63
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	2,49
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	2,66
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	3,22
C361 (0 km-6 km)	6,1	4,71
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	9,21
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	8,02
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	1,22
C528	9,4	5,11
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	2,22
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	6,13
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	5,70
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	6,42
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	1,51
E257	6,8	3,45
E536	10,1	4,23
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	4,72
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	3,32
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	3,80
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	2,85

Quadro C. 2 – Valores médios de cavado de rodeira e desvio padrão medidos pela EP dos trechos de gravidade intermédia

Trechos de gravidade intermédia		
Trechos	Rodeira medida pela EP (mm)	
	Média	Desvio padrão
B701	3,1	1,98
C307	3,1	3,30
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	0,86
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	1,71
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	1,14
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	1,39
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	2,49
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	2,01
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	0,66

**Quadro C. 3 – Valores médios de cavado de rodeira e desvio padrão medidos pela EP dos trechos de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa		
Trechos	Rodeira medida pela EP (mm)	
	Média	Desvio padrão
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	1,56
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	0,61
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	1,04
C097D	1,6	1,15
C137	1,6	0,61
C317	1,7	0,87
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	1,38
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	0,88
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	1,00
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	1,56
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	0,57
D365	1,7	1,26
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	0,83
G032	1,7	1,45

**Quadro C. 4 – Valores médios de cavado de rodeira e desvio padrão obtidos pelo HDM-4 dos trechos de gravidade alta**

Trechos de gravidade alta		
Trecho	Rodeira prevista pelo HDM-4 original(mm)	
	Média	Desvio padrão
A025	5,54	3,02
A571 (48,59 km-56,51km)	4,30	2,40
B028 (27,66 km-33,82 km)	8,09	4,09
C336 (0 km-10,9 km)	5,07	2,77
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,11	2,79
C361 (0 km-6 km)	4,07	2,30
C399 (35,8 km-36,329 km)	6,52	3,44
C399 (36,329 km-36,434 km)	5,06	2,78
C474 (13,98 km-14,757 km)	4,11	2,34
C528	5,73	3,08
D280E (0,425 km-9 km)	8,72	4,39
D280E (9 km-14,94 km)	3,54	2,02
D344 (0 km-2,2 km)	9,51	4,65
E237 (60,93 km-68,485 km)	6,57	3,48
E237 (72,08 km-72,487 km)	6,40	3,40
E257	7,37	3,83
E536	6,68	3,34
E708 (14,8 km-18,975 km)	8,82	4,34
E708 (18,975 km-22,11 km)	8,52	4,28
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,58	3,47
F522 (55,6 km-58,89 km)	9,43	4,60

**Quadro C. 5 – Valores médios de cavado de rodeira e desvio padrão obtidos pelo HDM-4 dos trechos de gravidade intermédia**

Trechos de gravidade intermédia		
Trecho	Rodeira prevista pelo HDM-4 original(mm)	
	Média	Desvio padrão
B701	6,88	3,66
C307	5,80	3,13
C361 (6 km-10,854 km)	3,30	1,90
C474 (14,757 km-26,266 km)	4,15	2,34
C474 (26,266 km-27,91 km)	4,11	2,34
E237 (68,485 km-72,08 km)	6,17	3,32
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,58	2,07
F513 (435,612 km-443,2 km)	4,43	2,42
F513 (443,2 km-448,5 km)	5,77	3,02

**Quadro C. 6 – Valores médios de cavado de rodeira e desvio padrão obtidos pelo HDM-4 dos trechos de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira prevista pelo HDM-4 original(mm)	
	Média	Desvio padrão
A609 (15,37 km-18 km)	5,04	2,64
B028 (33,82 km-35,62 km)	3,18	1,80
B649 (19,556 km-22,8 km)	3,36	1,90
C097D	6,03	3,30
C137	3,05	1,76
C317	3,72	1,76
C326 (158,59 km-163,99 km)	4,72	2,60
C326 (163,99 km-166 km)	4,45	2,47
C351 (10,1 km-11,65 km)	2,61	1,53
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,47	1,45
C351 (12,5 km-26,97 km)	2,61	1,53
D365	2,78	1,62
F553 (60,3 km-74,56 km)	2,28	1,35
G032	4,90	2,63



## Anexo D – Valores de SNC e N<sub>80Y</sub> dos Trechos Escolhidos

Quadro D. 1 – Valores de SNC e N<sub>80Y</sub> dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta

Trechos de gravidade alta		
Trecho	SNC	N <sub>80Y</sub> (MESALs)
A025	5,30	1,049
A058 (8,43 km-21,42 km)	3,47	0,100
A570	3,66	0,018
A571 (47,42 km-48,59 km)	3,05	0,018
A571 (48,59 km-56,51 km)	3,05	0,018
B028 (27,66 km-33,82 km)	4,79	1,78
C336 (0 km-10,9 km)	2,83	0,018
C336 (10,9 km-12,88 km)	2,83	0,018
C361 (0 km-6 km)	3,30	0,018
C399 (35,8 km-36,329 km)	3,55	0,261
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,08	0,261
C474 (13,98 km-14,757 km)	4,11	0,046
C528	3,87	0,436
D280E (0,425 km-9 km)	6,64	1,566
D280E (9 km-14,94 km)	7,28	1,566
D282D	5,77	1,566
D344 (0 km-2,2 km)	5,82	2,008
E237 (60,93 km-68,485 km)	4,55	0,902
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,55	0,902
E257	5,64	1,434
E536	2,40	0,094
E560 (0 km-1,715 km)	2,87	0,100
E708 (14,8 km-18,975 km)	3,69	0,912
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,23	0,912
E761 (46,35 km-47,35 km)	2,30	0,014
F522 (48,63 km-55,6 km)	4,03	0,651
F522 (55,6 km-58,89 km)	3,66	0,651

**Quadro D. 2 – Valores de SNC e  $N_{80Y}$  dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia**

Trechos de gravidade intermédia		
Trecho	SNC	$N_{80Y}$ (MESALs)
B701	5,47	0,535
C307	4,29	0,497
C361 (6 km-10,854 km)	3,70	0,018
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,71	0,046
C474 (26,266 km-27,91 km)	4,11	0,046
D372	4,19	0,037
E237 (68,485 km-72,08 km)	5,11	0,902
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,78	0,016
E560 (1,76 km-8,43 km)	3,03	0,100
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,25	0,140
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,81	0,140
F553 (58,38 km-60,3 km)	6,43	0,113
G026	2,11	0,053

**Quadro D. 3 – Valores de SNC e  $N_{80Y}$  dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa		
Trecho	SNC	$N_{80Y}$ (MESALs)
A609 (15,37 km-18 km)	2,63	0,091
B028 (33,82 km-35,62 km)	5,31	1,780
B227	2,89	0,310
B649 (19,556 km-22,8 km)	4,30	0,344
C097D	6,67	0,531
C137	3,84	0,030
C317	4,24	0,126
C326 (158,59 km-163,99 km)	3,54	0,115
C326 (163,99 km-166 km)	3,58	0,115
C351 (10,1 km-11,65 km)	4,03	0,020
C351 (11,65 km-12,5 km)	4,37	0,020
C351 (12,5 km-26,97 km)	4,03	0,020
D365	3,95	0,020
F553 (60,3 km-74,56 km)	5,52	0,113
G032	2,88	0,091

Quadro D. 4 – Valores de SNC e N<sub>80Y</sub> dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial) com rodeiras de gravidade alta e baixa

Trechos de gravidade alta		
Trecho	SNC	N <sub>80Y</sub> (MESALs)
A058 (21,42 km-26,45 km)	3,05	0,100
A480	2,81	0,018
A544	3,23	0,238
A545	3,23	0,238
C295	2,39	0,164
C320	2,92	0,329
C494	2,24	0,037
E761 (47,35 km-50,3 km)	2,06	0,014
E761 (50,3 km-58,78 km)	2,89	0,014
E761 (58,78 km-64,35 km)	2,06	0,014
Trechos de gravidade baixa		
Trecho	SNC	N <sub>80Y</sub> (MESALs)
A609 (18 km-24,325 km)	2,26	0,091



## Anexo E – Fendilhamento Existente nos Trechos Escolhidos

Quadro E. 1 – Fendilhamento existente nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta

Trechos de gravidade alta	
Trecho	Área de Fendilhamento (%)
A025	54,09
A058 (8,43 km-21,42 km)	35,71
A570	72,68
A571 (47,42 km-48,59 km)	98,42
A571 (48,59 km-56,51km)	94,49
B028 (27,66 km-33,82 km)	8,07
C336 (0 km-10,9 km)	93,48
C336 (10,9 km-12,88 km)	93,52
C361 (0 km-6 km)	-
C399 (35,8 km-36,329 km)	67,53
C399 (36,329 km-36,434 km)	13,91
C474 (13,98 km-14,757 km)	100,00
C528	53,55
D280E (0,425 km-9 km)	0,00
D280E (9 km-14,94 km)	0,34
D282D	5,67
D344 (0 km-2,2 km)	12,07
E237 (60,93 km-68,485 km)	24,77
E237 (72,08 km-72,487 km)	0,00
E257	73,40
E536	7,40
E560 (0 km-1,715 km)	38,58
E708 (14,8 km-18,975 km)	29,44
E708 (18,975 km-22,11 km)	58,32
E761 (46,35 km-47,35 km)	8,30
F522 (48,63 km-55,6 km)	44,34
F522 (55,6 km-58,89 km)	25,68

**Quadro E. 2 – Fendilhamento nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia**

Trechos de gravidade intermédia	
Trecho	Área de Fendilhamento (%)
B701	80,76
C307	69,72
C361 (6 km-10,854 km)	-
C474 (14,757 km-26,266 km)	60,73
C474 (26,266 km-27,91 km)	99,42
D372	0,71
E237 (68,485 km-72,08 km)	11,90
E287 (76,42 km-80,2 km)	87,25
E560 (1,76 km-8,43 km)	26,36
F513 (435,612 km-443,2 km)	34,81
F513 (443,2 km-448,5 km)	30,52
F553 (58,38 km-60,3 km)	10,10
G026	80,09

**Quadro E. 3 – Fendilhamento nos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa	
Trecho	Área de Fendilhamento (%)
A609 (15,37 km-18 km)	4,48
B028 (33,82 km-35,62 km)	0,00
B227	9,89
B649 (19,556 km-22,8 km)	0,91
C097D	94,37
C137	5,96
C317	12,08
C326 (158,59 km-163,99 km)	0,00
C326 (163,99 km-166 km)	24,13
C351 (10,1 km-11,65 km)	0,00
C351 (11,65 km-12,5 km)	0,00
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,04
D365	0,37
F553 (60,3 km-74,56 km)	0,00
G032	36,17

## Anexo F – Valores Médios de Cavado de Rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 original

**Quadro F. 1 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 original dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta**

Trechos de gravidade alta		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 original
A025	7,4	5,54
A571 (48,59 km-56,51 km)	8,1	4,30
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	8,09
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	5,07
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	5,11
C361 (0 km-6 km)	6,1	4,07
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	6,52
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	5,06
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	4,11
C528	9,4	5,73
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	8,72
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	3,54
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	9,51
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	6,57
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	6,40
E257	6,8	7,37
E536	10,1	6,68
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	8,82
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	8,52
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	6,58
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	9,43

**Quadro F. 2 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 original dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia**

Secções de gravidade intermédia		
Secção	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 original
B701	3,1	6,88
C307	3,1	5,80
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	3,30
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	4,15
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	4,11
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	6,17
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	3,58
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	4,43
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	5,77

**Quadro F. 3 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 original dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeira de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 original
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	5,04
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	3,18
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	3,36
C097D	1,6	6,03
C137	1,6	3,05
C317	1,7	3,72
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	4,72
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	4,45
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	2,61
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	2,47
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	2,61
D365	1,7	2,78
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	2,28
G032	1,7	4,90

## Anexo G – Valores Médios de Cavado de Rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo Austroads original

Quadro G. 1 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo Austroads original dos trechos com pavimento do tipo ST (tratamento superficial) com rodeiras de gravidade alta e baixa

Trechos de gravidade alta		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	Austroads original
A058 (21,42 km-26,45 km)	4,5	11,52
A480	7,5	11,48
A544	8,7	12,41
A545	8,0	12,41
C295	8,7	17,50
C320	10,4	12,44
C494	7,0	16,32
E761 (47,35 km-50,3 km)	6,2	16,58
E761 (50,3 km-58,78 km)	6,6	7,81
E761 (58,78 km-64,35 km)	4,3	16,58
Trechos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	Austroads original
A609 (18 km-24,325 km)	1,6	15,64



## Anexo H – Valores Médios de Cavado de Rodeira medidos pela EP e os obtidos com a utilização de Calibrações

### ➤ Modelo HDM-4 Chileno

Quadro H. 1 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Chileno dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta

Trechos de gravidade alta		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Chileno
A025	7,4	2,02
A571 (48,59 km-56,51km)	8,1	2,02
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	2,46
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	2,29
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	2,31
C361 (0 km-6 km)	6,1	1,87
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	2,75
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	2,17
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	1,78
C528	9,4	2,35
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	2,13
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	1,35
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	2,38
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	2,29
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	2,22
E257	6,8	2,19
E536	10,1	3,17
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	2,87
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	2,69
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	2,47
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	2,98

Quadro H. 2 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Chileno dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia

Trechos de gravidade intermédia		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Chileno
B701	3,1	2,46
C307	3,1	2,27
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	1,58
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	1,88
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	1,78
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	2,10
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	1,67
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	2,12
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	2,72

**Quadro H. 3 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Chileno dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Chileno
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	2,46
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	1,50
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	1,60
C097D	1,6	1,95
C137	1,6	1,48
C317	1,7	1,73
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	2,14
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	2,07
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	1,28
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	1,21
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	1,28
D365	1,7	1,36
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	1,11
G032	1,7	2,35

➤ Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória

**Quadro H. 4 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta**

Trechos de gravidade alta		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Vitória
A025	7,4	6,12
A571 (48,59 km-56,51km)	8,1	4,95
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	8,68
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	5,98
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	6,04
C361 (0 km-6 km)	6,1	4,74
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	7,67
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	5,77
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	4,92
C528	9,4	6,39
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	9,17
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	3,75
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	10,02
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	7,15
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	6,90
E257	6,8	7,96
E536	10,1	7,39
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	9,47
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	9,27
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	7,27
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	10,19

**Quadro H. 5 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia**

Trechos de gravidade intermédia		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Vitória
B701	3,1	8,11
C307	3,1	6,52
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	3,74
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	4,84
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	4,91
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	6,71
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	4,19
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	4,87
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	6,43

**Quadro H. 6 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Vitória dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa**

Trecos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Vitória
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	5,42
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	3,32
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	3,59
C097D	1,6	6,79
C137	1,6	3,36
C317	1,7	4,17
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	5,29
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	5,02
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	2,83
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	2,68
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	2,84
D365	1,7	3,05
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	2,43
G032	1,7	5,41

➤ Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia

**Quadro H. 7 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta**

Trechos de gravidade alta		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Tasmânia
A025	7,4	5,69
A571 (48,59 km-56,51km)	8,1	4,46
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	8,38
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	5,29
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	5,34
C361 (0 km-6 km)	6,1	4,23
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	6,81
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	5,24
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	4,31
C528	9,4	5,89
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	8,83
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	3,59
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	9,64
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	6,72
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	6,53
E257	6,8	7,51
E536	10,1	6,86
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	8,98
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	8,71
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	6,76
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	9,62

**Quadro H. 8 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia**

Trechos de gravidade intermédia		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Tasmânia
B701	3,1	7,18
C307	3,1	5,98
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	3,41
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	4,32
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	4,30
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	6,31
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	3,73
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	4,54
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	5,94

**Quadro H. 9 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Tasmânia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Tasmânia
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	5,13
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	3,21
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	3,42
C097D	1,6	6,22
C137	1,6	3,13
C317	1,7	3,83
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	4,86
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	4,59
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	2,67
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	2,52
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	2,67
D365	1,7	2,85
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	2,32
G032	1,7	5,03

➤ Modelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia

**Quadro H. 10 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia dos trechos com pavimentos do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta**

Trechos de gravidade alta		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Nova Zelândia
A025	7,4	11,54
A571 (48,59 km-56,51km)	8,1	11,27
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	14,13
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	15,37
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	15,58
C361 (0 km-6 km)	6,1	11,48
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	19,03
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	12,45
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	13,48
C528	9,4	12,56
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	13,16
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	5,66
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	14,73
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	12,47
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	11,45
E257	6,8	13,56
E536	10,1	13,84
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	15,49
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	16,26
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	13,61
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	17,17

**Quadro H. 11 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia**

Trechos de gravidade intermédia		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Nova Zelândia
B701	3,1	20,44
C307	3,1	13,40
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	7,90
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	11,80
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	13,49
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	11,56
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	10,10
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	8,99
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	12,45

**Quadro H. 12 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Australiano da Austroads – Nova Zelândia dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Australiano da Austroads - Nova Zelândia
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	8,84
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	4,60
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	5,60
C097D	1,6	14,14
C137	1,6	6,19
C317	1,7	8,33
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	10,44
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	10,20
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	4,82
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	4,64
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	4,83
D365	1,7	5,49
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	3,70
G032	1,7	10,16

➤ Modelo HDM-4 Sul-Africano

**Quadro H. 13 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Sul-Africano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta**

Trecos de gravidade alta		
Trecos	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Sul-Africano
A025	7,4	4,02
A571 (48,59 km-56,51km)	8,1	3,50
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	5,49
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	4,01
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	4,03
C361 (0 km-6 km)	6,1	3,27
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	4,85
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	3,89
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	3,16
C528	9,4	4,40
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	5,44
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	2,78
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	5,98
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	4,70
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	4,61
E257	6,8	4,90
E536	10,1	5,68
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	6,18
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	5,78
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	4,83
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	6,51

**Quadro H. 14 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Sul-Africano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia**

Trecos de gravidade intermédia		
Trecos	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Sul-Africano
B701	3,1	4,57
C307	3,1	4,30
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	2,75
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	3,30
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	3,16
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	4,35
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	2,85
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	3,84
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	4,85

**Quadro H. 15 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Sul-Africano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa**

Trecos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Sul-Africano
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	4,55
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	2,90
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	3,02
C097D	1,6	3,98
C137	1,6	2,65
C317	1,7	3,07
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	3,80
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	3,65
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	2,33
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	2,19
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	2,33
D365	1,7	2,43
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	2,09
G032	1,7	4,25

➤ Modelo HDM-4 Indiano

**Quadro H. 16 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Indiano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade alta**

Trechos de gravidade alta		
Trechos	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Indiano
A025	7,4	7,17
A571 (48,59 km-56,51km)	8,1	6,17
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	9,75
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	7,71
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	7,80
C361 (0 km-6 km)	6,1	6,01
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	9,81
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	7,07
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	6,47
C528	9,4	7,60
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	9,97
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	4,14
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	10,96
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	8,21
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	7,82
E257	6,8	9,05
E536	10,1	8,68
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	10,67
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	10,64
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	8,52
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	11,58

**Quadro H. 17 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Indiano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade intermédia**

Trechos de gravidade intermédia		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Indiano
B701	3,1	10,43
C307	3,1	7,85
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	4,56
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	6,14
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	6,47
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	7,67
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	5,32
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	5,68
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	7,62

**Quadro H. 18 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 Indiano dos trechos com pavimento do tipo AM (mistura betuminosa) com rodeiras de gravidade baixa**

Trechos de gravidade baixa		
Trecho	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 Indiano
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	6,10
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	3,57
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	3,99
C097D	1,6	8,20
C137	1,6	3,93
C317	1,7	5,00
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	6,32
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	6,04
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	3,23
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	3,08
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	3,23
D365	1,7	3,54
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	2,68
G032	1,7	6,34

## Anexo I – Valores Médios de Cavado de Rodeira medidos pela EP e os obtidos com as Calibrações Realizadas

➤ Calibração realizada para a totalidade dos trechos

Quadro I. 1 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 calibrado da totalidade dos trechos

Totalidade dos trechos		
Trechos	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 calibrado
A025	7,4	4,55
A571 (48,59 km-56,51km)	8,1	4,25
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	6,21
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	4,60
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	4,68
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	3,90
B701	3,1	5,11
C097D	1,6	4,63
C137	1,6	3,81
C307	3,1	4,97
C317	1,7	6,98
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	2,73
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	7,42
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	5,60
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	5,58
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	5,71
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	6,09
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	7,13
C361 (0 km-6 km)	6,1	6,85
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	5,66
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	7,95
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	5,16
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	4,83
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	3,25
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	3,95
C528	9,4	3,81
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	5,42
D280E (9 km-14,94 km)	10,6	3,72
D344 (0 km-2,2 km)	10,5	3,75
D365	1,7	5,21
E237 (60,93 km-68,485 km)	11,8	3,93
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	2,13
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	2,53
E257	6,8	5,08
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	2,75

**Quadro I. 2 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 calibrado da totalidade dos trechos (continuação)**

<b>Totalidade dos trechos</b>		
<b>Trechos</b>	<b>Rodeira (mm)</b>	
	<b>EP</b>	<b>HDM-4 calibrado</b>
E536	10,1	3,59
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	4,74
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	4,34
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	2,17
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	2,09
F522 (48,63 km-55,6 km)	6,2	2,17
F522 (55,6 km-58,89 km)	7,1	2,46
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	1,68
G032	1,7	4,16

➤ Calibração realizada para os trechos com rodeiras até 5,9 mm

**Quadro I. 3 – Valores médios de cavado de rodeira medidos pela EP e os obtidos pelo HDM-4 calibrado dos trechos com rodeiras até 5,9 mm**

Trechos com rodeiras até 5,9 mm		
Trechos	Rodeira (mm)	
	EP	HDM-4 calibrado
A609 (15,37 km-18 km)	1,8	2,54
B028 (27,66 km-33,82 km)	3,7	4,13
B028 (33,82 km-35,62 km)	1,2	1,29
B649 (19,556 km-22,8 km)	1,8	1,61
B701	3,1	4,65
C097D	1,6	3,79
C137	1,6	1,84
C307	3,1	3,59
C317	1,7	2,47
C326 (158,59 km-163,99 km)	2,4	3,22
C326 (163,99 km-166 km)	1,2	3,02
C336 (0 km-10,9 km)	4,6	3,68
C336 (10,9 km-12,88 km)	5,6	3,74
C351 (10,1 km-11,65 km)	1,3	1,42
C351 (11,65 km-12,5 km)	2,4	1,37
C351 (12,5 km-26,97 km)	1,7	1,42
C361 (6 km-10,854 km)	2,7	2,29
C399 (35,8 km-36,329 km)	5,9	4,44
C399 (36,329 km-36,434 km)	4,2	3,43
C474 (13,98 km-14,757 km)	3,9	3,10
C474 (14,757 km-26,266 km)	3,1	3,00
C474 (26,266 km-27,91 km)	3,0	3,10
D280E (0,425 km-9 km)	5,3	4,28
D365	1,7	1,63
E237 (68,485 km-72,08 km)	3,2	3,57
E237 (72,08 km-72,487 km)	4,8	3,60
E287 (76,42 km-80,2 km)	3,1	2,75
E708 (14,8 km-18,975 km)	5,3	4,67
E708 (18,975 km-22,11 km)	4,5	4,70
F513 (435,612 km-443,2 km)	3,5	2,55
F513 (443,2 km-448,5 km)	2,5	3,61
F553 (60,3 km-74,56 km)	1,5	1,06
G032	1,7	2,85