



Marlene Denise Pereira de Melo
Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Aplicação do modelo HDM-4 na previsão do IRI para pavimentos rodoviários da rede nacional

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Transportes e Urbanismo

Orientador: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo,
Professor Auxiliar, FCT-UNL
Co-orientador: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma,
Professor Auxiliar Convidado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Simona Fontul
Arguente: Prof. Doutor José Manuel Coelho das Neves
Vogal: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma

Aplicação do modelo HDM-4 na previsão do IRI para pavimentos rodoviários da rede nacional

Copyright © Marlene Denise Pereira de Melo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado na Universidade Nova de Lisboa, na Faculdade de Ciências e Tecnologias sob orientação do Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil (DEC) e co-orientação do Professor Luís Manuel Trindade Quaresma, Professor Auxiliar Convidado do DEC.

Os meus sinceros agradecimentos, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

Ao Doutor Rui Micaelo agradeço a orientação, os esclarecimentos prestados e o incentivo para a realização do trabalho. Quero também expressar a minha gratidão pelo apoio e esforço despendido ao longo da realização deste trabalho.

Ao Professor Luís Quaresma agradeço a co-orientação, a disponibilidade sempre demonstrada, a amizade, a partilha de conhecimentos essenciais para a realização deste trabalho, as sugestões valiosas e a ajuda na realização do programa no *Matlab*.

À Infraestruturas de Portugal, em particular ao Departamento de Gestão da Rede Rodoviária, agradeço a oportunidade desta colaboração e por disponibilizaram os dados necessários para a realização deste trabalho.

Obrigada a todos os meus amigos e colegas que me apoiaram, em particular gostaria de agradecer às minhas amigas de sempre por acreditarem em mim, ao David Manta pela amizade e ajuda, à Ana Amorim Silva e à Alexandra Teixeira Jesus pelas sugestões e paciência e à D. Tina pela motivação e força.

Por fim, mas não menos importante, os meus sinceros agradecimentos à minha família, em especial aos meus pais e às minhas irmãs, pelos ensinamentos, valores, educação e oportunidades que sempre me proporcionaram ao longo a minha vida.

Resumo

Os modelos de previsão da degradação dos pavimentos são um elemento-chave para os sistemas de gestão dos pavimentos sendo utilizados para prever a evolução das suas condições de circulação.

O presente trabalho tem como objetivo estabelecer um modelo de previsão da evolução do índice de irregularidade longitudinal (IRI), principal indicador da qualidade funcional de um pavimento. Para tal, foram utilizados dados da base de dados da empresa Infraestruturas de Portugal (IP). Esta mantém um programa de monitorização da rede com o objetivo de controlar a qualidade de serviço e gerir de forma consciente os recursos disponíveis.

O modelo HDM-4 foi implementado em código do programa Matlab com o objetivo de apoiar este estudo. Primeiro, procedeu-se à avaliação da forma com que os parâmetros do modelo HDM-4 atuam sobre o valor do IRI no modelo HDM-4. Posteriormente, procurou-se ajustar os resultados obtidos efetuando calibrações, com o intuito de minimizar o erro entre os valores calculados e os valores medidos pela IP.

Concluiu-se que é possível estabelecer modelos com base no modelo HDM-4, em pavimentos flexíveis, ajustados à rede rodoviária nacional. No entanto, para serem incluídos fatores que deveriam ser contabilizados no modelo, deverão ser realizadas algumas alterações na base de dados a utilizar.

Palavras-Chave: Pavimentos Rodoviários, Índice de Irregularidade Longitudinal, Modelos de Previsão, Modelo HDM-4.

Abstract

Distress prediction models are a key element in pavement management systems, being used to predict the evolution of the pavement's serviceability.

This dissertation intends to establish models for International Roughness Index (IRI) which is the most commonly used index to quantify longitudinal unevenness on the pavement's surface, and is the main quality indicator of pavements serviceability. To assist the present work the company Infraestruturas de Portugal (IP) provided some data present in their database. IP has a network monitoring program intended to control the service's quality and simultaneously manage efficiently all resources available.

The HDM-4 model was implemented in a routine programmed in Matlab to assist the analysis and to establish prediction models for IRI. Afterwards, the results were adjusted to the national road network, performing calibrations in order to minimize the error between the calculated values and the measured values.

It is concluded that it is possible to establish, for the national road network, models based on HDM-4 for flexible pavements using pavement database. However, to include parameters that should be considered on the model, due to the significant influence on IRI value, some changes have to be made to the IP's database.

Keywords: Road Pavements, International Roughness Index, Prediction Models, HDM-4 Model.

Índice

Capítulo 1.....	1
1 Considerações iniciais	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivo e metodologia	4
1.3 Estrutura da dissertação	5
Capítulo 2.....	7
2 Irregularidade longitudinal	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Evolução dos métodos de avaliação de irregularidade longitudinal	7
2.3 Utilização do parâmetro IRI	10
2.4 Modelos de previsão de IRI.....	15
2.4.1 Tipos de modelos	15
2.4.2 Modelo HDM-4.....	17
2.4.3 Modelos do projeto PARIS	23
2.5 Conclusões.....	25
Capítulo 3.....	27
3 Fenomenologia do IRI.....	27
3.1 Metodologia adotada	27
3.2 Base de dados do sistema de gestão de pavimentos da IP	27
3.3 Análise estatística do valor do IRI na rede rodoviária nacional.....	29
3.4 Tipos de distribuição	33
3.5 Programa de apoio ao modelo HDM-4.....	35
3.6 Análise paramétrica	40
3.6.1 Capacidade estrutural	40

3.6.2	Condições climáticas.....	42
3.6.3	Compactação relativa	47
3.6.4	Componentes do IRI.....	48
Capítulo 4.....		51
4	Calibração do modelo HDM-4 para a rede rodoviária nacional	51
4.1	Dados fornecidos pela IP	51
4.2	Critérios de seleção das secções	51
4.3	Análise das secções	52
4.4	Aplicação dos dados no modelo HDM-4.....	56
4.5	Calibração realizada	58
Capítulo 5.....		63
5	Considerações finais.....	63
5.1	Principais conclusões.....	63
5.2	Desenvolvimentos futuros	65
Referências bibliográficas		67
Anexo A.....		71
A – Cálculo da profundidade média das rodeiras no modelo HDM-4		71
Anexo B		73
B – Cálculo do fendilhamento no modelo HDM-4		73
Anexo C		79
C – Número estrutural modificado do pavimento (SNC).....		79
Anexo D.....		81
D – Componentes do IRI obtidas pelo HDM-4.....		81
Anexo E		83
E – Valores médios de IRI medidos pela IP.....		83
Anexo F.....		85
F – Calibração realizada.....		85
Anexo G		87
G – Fendilhamento medido pela IP.....		87
Anexo H.....		89
H – Rodeiras médias medidas pela IP		89

Índice de Figuras

Figura 1.1 Variação da condição do pavimento consoante as ações de conservação/reabilitação (adaptado de [4])	1
Figura 1.2 Avaliação das degradações presentes nos países convidados [9]	3
Figura 2.1 Evolução da irregularidade em pavimentos flexíveis [14].....	8
Figura 2.2 <i>Bump Integrator</i> [18].....	9
Figura 2.3 Equipamento de inspeção mecânica- perfilómetro laser [2].....	10
Figura 2.4 Sistema de controlo em inspeções mecânicas [2]	11
Figura 2.5 Modelo do IRI - <i>Golden Car</i> (adaptado de [23]).....	12
Figura 2.6 Escala de IRI (adaptado de [16])	13
Figura 2.7 Comparação entre o IRI e outros índices de irregularidade (adaptado de [25]).....	13
Figura 2.8 Desenvolvimento do modelo HDM [23]	18
Figura 2.9 Fluxograma do modelo HDM-4 (adaptado de [23])	19
Figura 2.10 Fluxograma para a irregularidade longitudinal do modelo HDM-4 (adaptado de [10])	23
Figura 2.11 Distribuição da variação anual do IRI em diferentes países para pavimentos flexíveis (adaptado de [11])	25
Figura 3.1 IRI médio das secções da IP em 2014	29
Figura 3.2 Relação entre os valores máximos e médios de IRI das secções em análise	31
Figura 3.3 Relação entre os valores mínimos e médios de IRI das secções em análise	31
Figura 3.4 IRI, fendilhamento e rodeiras existente nos trechos de 100 m com gravidade maior	32
Figura 3.5 IRI, fendilhamento e rodeiras existente nos trechos de 100 m com gravidade intermédia	32
Figura 3.6 IRI, fendilhamento e rodeiras existente nos trechos de 100 m com gravidade menor	32
Figura 3.7 Q-Q com os valores de IRI das secções com gravidade maior	33
Figura 3.8 Q-Q com os valores de IRI das secções com gravidade intermédia	33
Figura 3.9 Q-Q com os valores de IRI das secções com gravidade menor	34
Figura 3.10 Alguns desvios da linha de normalidade (adaptado de [34])	34
Figura 3.11 Q-Q com logaritmo neperiano (ln) do IRI de gravidade intermédia	35
Figura 3.12 Q-Q com logaritmo neperiano (ln) do IRI de gravidade menor	35
Figura 3.13 Fluxograma do programa HDM_4_IRI	38
Figura 3.14 Ficheiro de dados	38
Figura 3.15 Programa HDM_4_IRI	39
Figura 3.16 Influência da variação da capacidade estrutural do pavimento no IRI.....	42

Figura 3.17 Temperaturas médias anuais [36]	43
Figura 3.18 Temperatura de serviço das camadas betuminosas (adaptado de [37]).....	43
Figura 3.19 Influência da temperatura do pavimento (PT) no IRI	44
Figura 3.20 Precipitação acumulada anual [36]	45
Figura 3.21 Influência da variação da precipitação (MMP) no IRI em função do coeficiente de drenagem (d)...	47
Figura 3.22 Influência da variação da compactação no valor do IRI	48
Figura 3.23 Contribuição das diferentes componentes do IRI, considerando que não ocorre manutenção	49
Figura 3.24 Contribuição das diferentes componentes do IRI, considerando que ocorre manutenção	49
Figura 4.1 Mapa de Portugal Continental com a localização das secções escolhidas [40]	52
Figura 4.2 Representação gráfica do IRI para a Amostra 1	53
Figura 4.3 Representação gráfica do IRI da Amostra 2	53
Figura 4.4 Representação gráfica do fendilhamento existente na Amostra 1.....	54
Figura 4.5 Representação gráfica do fendilhamento existente na Amostra 2.....	54
Figura 4.6 Representação gráfica das rodeiras médias existentes na Amostra 1	55
Figura 4.7 Representação gráfica das rodeiras médias existentes na Amostra 2.....	55
Figura 4.8 Comparação entre os valores do IRI medidos pela IP e as componentes do IRI pertencentes ao modelo HDM-4.....	57
Figura 4.9 Comparação entre os valores médios de IRI medidos pela IP com os obtidos pelo modelo HDM-4..	57
Figura 4.10 Comparação dos valores médios de IRI medidos pela IP com os obtidos pelo modelo HDM-4 calibrado nos trechos pertencentes ao Grupo 1.....	58
Figura 4.11 Comparação dos valores médios de IRI medidos pela IP com os obtidos pelo modelo HDM-4 calibrado nos trechos pertencentes ao Grupo 2.....	59
Figura 4.12 Comparação entre os valores médios de IRI e de fendilhamento medidos pela IP.....	60
Figura 4.13 Comparação entre os valores médios de IRI a rodeira média medidos pela IP	60

Índice de Quadros

Quadro 1.1 Lista de operações de manutenção e reabilitação em diferentes países europeus (adaptado de [5])	2
Quadro 2.1 Classificação dos modelos de comportamento [1]	15
Quadro 2.2 Classificação do modelo HDM	17
Quadro 2.3 Valores recomendados para o coeficiente ambiental (m) aplicável ao modelo HDM-4 (adaptado de [10])	20
Quadro 2.4 Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (adaptado de [32]).....	22
Quadro 2.5 Valores estatísticos do parâmetro B de PARIS para pavimentos flexíveis (adaptado de [11])	24
Quadro 3.1 Dados para a descrição do estado do pavimento [2]	28
Quadro 3.2 Limites dos níveis de gravidade para os trechos de 100 m.....	30
Quadro 3.3 Relação entre os limites das secções avaliadas e o IRI médio correspondente	30
Quadro 3.4 Secções para análise	33
Tabela 3.5 Subrotinas e variáveis de entrada do Programa HDM_4_IRI	36
Quadro 3.6 Classes de tráfego e fatores de agressividade no MACOPAV [35]	41
Quadro 3.7 Parâmetros utilizados para avaliar a variação do SNC e do TMDAp [9].....	41
Quadro 3.8 Parâmetros utilizados para avaliar a variação da temperatura.....	44
Quadro 3.9 Valores recomendados para o coeficiente de drenagem (d) para as camadas de base e sub-base não tratadas em pavimentos flexíveis (adaptado de [38]).....	46
Quadro 3.10 Descrição das seis situações consideradas	46
Quadro 3.11 Parâmetros utilizados para avaliar a variação da precipitação	46
Quadro 3.12 Parâmetros utilizados para avaliar a influência da compactação relativa no valor do IRI	48
Quadro 4.1 Coeficientes de calibração obtidos por regressão múltipla pertencentes ao Grupo 1	58
Quadro 4.2 Coeficientes de calibração obtidos por regressão múltipla pertencentes ao Grupo 2	59

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*

ADB – *The Asian Development Bank*

AM – Mistura betuminosa

AMGB – Mistura Betuminosa sobre base granular

APL – Analisador do Perfil Longitudinal

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BD – Betão betuminoso em camada de desgaste

BPR – *Bureau of Public Roads*

CBR – Índice Californiano de capacidade de carga

CHLOE – *Carrey, Hutckins, Lathers and Other Engineers*

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DEF – Deflexão média anual da viga de Benkelman

GB – Base Granular

HDM – *Highway Design and Maintenance Standards Model*

IBRD – *The World Bank*

IP – Infraestruturas de Portugal

IRI – Índice de Irregularidade Internacional

IRRE – *International Road Roughness Experiment*

ISOHDM – *International Study of Highway Development and Management Tools*

JAE – Junta Autónoma de Estradas

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

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

MB – Macadame betuminoso em camada de base
MESALs – Milhão de passagens de um eixo-padrão
MMP – Precipitação média mensal
ODA – *The Overseas Development Administration*
PARIS – *Performance Analysis of Road Infrastructure*
PSI – Índice de Aptidão de Serviço
RTRRMS – *Response-Type Road Roughness Measuring Systems*
SbG – Material britado de granulometria extensa em camada de sub-base
SGP – Sistema de Gestão de Pavimentos
SGPav – Sistema de Gestão de Conservação de Pavimentos da Infraestruturas de Portugal
SNRA – *The Swedish National Roads Administration*
TRRL – *Transport and Road Research Laboratory*

Símbolos

AADT – Tráfego médio diário anual, por sentido na via mais solicitada
ACX – Área de fendilhamento prevista pelos modelos HDM
ACXa – Área de fendilhamento prevista no início do ano em análise
AGE_i – Tempo que decorreu desde a construção ou última reabilitação do pavimento
AGE2 – Tempo que decorreu desde a colocação de uma nova camada de desgaste
AGE3 – Tempo que decorreu desde a última reabilitação
AGE4 – Tempo que decorreu desde a última reconstrução ou construção nova
a_i – Coeficiente estrutural da camada i
a₀, a₁, a₂, a₃ e a₄ – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4
BIr – Índice de irregularidade obtido com o equipamento Bump Integrator
C – Fator de crescimento do tráfego
CAPL₂₅ – Coeficiente de APL25, obtido com o perfilómetro APL25
CDS – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento
COMP – Índice de compactação relativa do pavimento
CP_{2,5} – Índice de Irregularidade obtido pelo perfilómetro APL72 num comprimento de 2,5 m
CRT – Tempo que levou o atraso do fendilhamento devido à execução de reparações
CS – Área de pele de crocodilo ou desagregação superficial
CW – Largura da faixa de rodagem
C3t – Coeficiente de área com pele de crocodilo
d_i – Coeficiente de drenagem da camada i
dSNPK – Redução do número estrutural do pavimento devido ao efeito do fendilhamento
FM – Índice de liberdade de manobrabilidade

Fpat – Ciclo de manutenção

hi – Espessura da camada i

HS – Espessura da camada betuminosa

HSNEW – Espessura da camada mais recente existente em caso de intervenção

HSOLD – Espessura total das camadas betuminosas existentes antes de uma intervenção

ICA – Tempo para o início do fendilhamento total

ICA (0) – Tempo para o início do fendilhamento total para uma estrutura original

ICA (1) – Tempo para o início do fendilhamento total para uma estrutura onde foi realizada uma intervenção com sobreposição de camada betuminosa

ICA (2) – Tempo para o início do fendilhamento total para uma estrutura onde foi realizado um tratamento superficial

ICW – Tempo para o início do fendilhamento aberto

IMr – Índice equivalente ao IRI, obtido pela simulação de referência de um quarto-de-carro

ip – Índice de plasticidade

IQ – Índice de qualidade

IRIa – Irregularidade longitudinal no início do ano t

IRIb – Irregularidade longitudinal no final do ano t

Kcia – Coeficiente de calibração para o tempo para início do fendilhamento

Kgc – Coeficiente de calibração devido ao fendilhamento

Kgm – Coeficiente de calibração devidos aos efeitos ambientais

Kgp – Coeficiente de calibração devido às covas

Kgr – Coeficiente de calibração devido às rodeiras

Kgs – Coeficiente de calibração devido à capacidade estrutural

Ksnpk – Coeficiente de calibração para o SNPK

LP – Comprimento do perfil

m – Coeficiente ambiental

MR – Módulo resiliente efetivo para a fundação

ms – massa suspensa

mu – massa não suspensa

NPTa – Número de covas no início do ano em análise

NPTb – Número de covas no final do ano em análise

NPTbu- Número previsto de covas no final do ano em análise

N80y – Número acumulado de passagens de um eixo-padrão de 80 kN por via, durante um período y

p – Período de dimensionamento

P – Área das zonas reparadas

PACX – Área de fendilhamento existente nas camadas antigas, em percentagem da área total

Ppat- Percentagem de covas remendadas

psi – Libra força polegada quadrada

PT – Temperatura do pavimento a 20 mm de profundidade

QIm – Índice de Irregularidade obtido quarto-de-carro, calibrado com o equipamento *Maysmeter*

Ria – Irregularidade no início do ano em análise

RD – Profundidade média das rodeiras

RD0 – Cavado de rodeira por densificação inicial

S – Velocidade simulada (80 km/h)

Sh – Velocidade dos veículos pesados

SN – Número estrutural

SNC – Número estrutural modificado

SNPa – Número estrutural ajustado no início do ano em análise

SNPKb – Número estrutural do pavimento devido ao fendilhamento no final do ano em análise

SNSG – Contribuição estrutural da fundação

Sp – Temperatura de amolecimento

SV – Média da variância da inclinação do perfil longitudinal medido com o perfilômetro de CHLOE

t – Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado

Tar – Temperatura do ar

TMDA – Tráfego médio de veículos, por sentido e na via mais solicitada

TMDAp – Tráfego médio de veículos pesados, por sentido e na via mais solicitada

Wsw – Energia de pequeno comprimento de onda, obtido com o perfilômetro APL

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

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

\dot{Z}_s – Derivada (no tempo) do deslocamento da massa suspensa

\dot{Z}_u – Derivada (no tempo) do deslocamento da massa não suspensa

Δ ACA – Incremento anual da área fendilhamento total, em percentagem da área total

Δ IRI – Incremento anual de irregularidade

Δ IRIc – Contribuição do fendilhamento para o incremento anual da irregularidade durante o ano em análise

Δ IRIe – Contribuição dos efeitos ambientais para o incremento anual da irregularidade durante o ano em análise

Δ IRIp – Contribuição das covas para o incremento anual da irregularidade durante o ano em análise

Δ IRIr – Contribuição das rodeiras para o incremento anual da irregularidade durante o ano em análise

Δ IRIs – Contribuição estrutural para o incremento anual da irregularidade durante o ano em análise

Δ RDM – Aumento gradual da profundidade média total da rodeira

Δ RDS – Incremento anual no desvio padrão da profundidade das rodeiras

Δ RDPD – Aumento anual da deformação plástica

Δ RDST – Aumento anual da deformação estrutural

Δ VIM – Redução anual do número de vazios na mistura

α – Fator de agressividade do tráfego

δt_A – Fração do ano aplicada na progressão do fendilhamento total

δt_W – Fração do ano aplicada na progressão do fendilhamento aberto

Capítulo 1

1 Considerações iniciais

1.1 Enquadramento

O transporte rodoviário é o modo de transporte que mais contribui para o desenvolvimento global de qualquer país. É o meio mais utilizado para deslocamento de pessoas e bens, devido à sua comodidade e flexibilidade. Com a modernização dos transportes rodoviários, verificou-se um aumento do tráfego, sendo que este incremento das ações provenientes das cargas dos veículos juntamente com as resultantes das condições climáticas levam ao aparecimento de degradações nos pavimentos. Desta forma, foram criados Sistemas de Gestão dos Pavimentos (SGP), que consistem numa ferramenta essencial para uma gestão eficiente dos pavimentos, fazendo com que o aparecimento destas degradações seja evitado ou rapidamente reparado [1], [2].

A gestão do estado de conservação dos pavimentos a nível nacional, assim como o registo das intervenções realizadas na rede, é feita pela Infraestruturas de Portugal (IP) que tem um sistema de gestão e conservação dos pavimentos, próprio, designado SGPav. O estado dos pavimentos é avaliado recorrendo a um índice de qualidade global (IQ), baseado no índice de aptidão de serviço (PSI) desenvolvido no ensaio *AASHO Road Test*, realizado no final dos anos 50 pela *American Association of State Highway Officials* [3] permitindo intervir quando este atinge o valor mínimo admissível.

As condições de circulação vão piorando ao longo do tempo. Para que o IQ se mantenha dentro da gama de valores considerados admissíveis, são realizados trabalhos de conservação ou de reabilitação ao longo da vida útil de um pavimento [2], como é ilustrado na Figura 1.1.

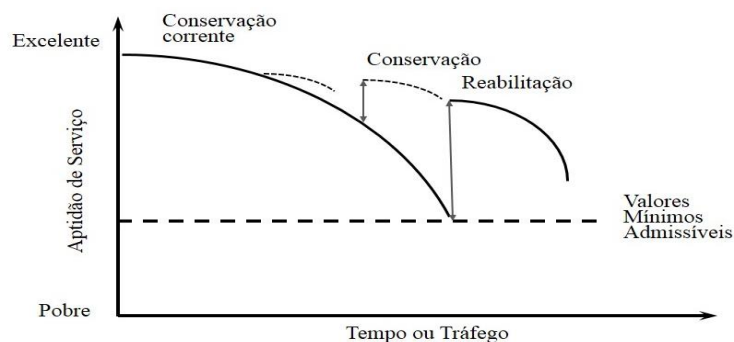


Figura 1.1 Variação da condição do pavimento consoante as ações de conservação/reabilitação (adaptado de [4])

No entanto, a gestão de pavimentos deve visar avaliar não apenas as condições de circulação, mas também o estado de degradação da estrutura de pavimento, pois os custos de conservação e reabilitação de pavimentos estão fortemente associados ao tipo de degradação estrutural do pavimento.

A degradação estrutural do pavimento afeta a irregularidade longitudinal, que é um tipo de deformação que corresponde aos desvios da superfície de um pavimento relativamente a um plano de referência, equivalente a uma superfície plana. Este tipo de irregularidade afeta o comportamento dinâmico dos veículos, aumentando o custo de operação dos mesmos, causando desconforto aos seus utentes e pondo em causa as condições de segurança. Em pavimentos em que esta deformação atinge níveis elevados podem surgir fenómenos de sobrecarga dinâmica que contribuem para a aceleração de processos de fadiga, em particular no caso da circulação de veículos pesados, podendo a carga dinâmica aplicada por eixo, atingir duas ou mais vezes a carga estática. Por este motivo, esta deformação tem vindo, cada vez mais, a ter especial atenção por parte dos SGP [5]–[8].

No Quadro 1.1 são listados por ordem de importância as degradações que conduzem a operações de manutenção e reabilitação em diferentes países europeus obtidos num estudo europeu sobre o comportamento de pavimentos rodoviários [5].

Quadro 1.1 Lista de operações de manutenção e reabilitação em diferentes países europeus (adaptado de [5])

Secção	País	Cat	Long	Trans	Fend	Surf	Atrito	Text	Estru
1	Áustria (AT)	P	2	7	5	3	4	1	6
2	Bélgica (BE)	P	2	7	3	5	4	1	6
3	Suíça (CH)	P	3	7	6	2	4	5	1
4	Dinamarca (DK)	P	1	2	7	6	3	4	5
5	Espanha (ES)	P	2	3	5	4	6	1	7
6	Finlândia (FI)	P	4	7	4	3	1	1	4
7	França (FR)	P	4	7	4	3	1	1	6
8	Inglaterra (UK)	P	1	5	4	3	7	2	6
9	Grécia (GR)	P	2	1	7	6	6	3	6
10	Hungria (HU)	P	1	4	3	7	5	2	6
11	Irlanda (IE)	P	2	4	3	6	7	1	5
12	Holanda (NL)	P	3	4	7	6	2	1	5
13	Portugal (PT)	P	5	4	1	7	2	3	6
14	Suécia (SE)	P	6	7	1	2	5	4	3
15	Eslovénia (SI)	P	2	5	6	3	4	1	7

Legenda:

Cat – Nível de Serviço (P=Nível de hierarquia superior);

Long – Irregularidade no perfil longitudinal (IRI);

Trans – Irregularidade no perfil transversal (rodeiras);

Fend – Fendilhamento;

Surf – Deformações na camada de desgaste (desagregação superficial, covas);

Atrito – Perdas de atrito;

Text – Textura (macro e micro);

Estru – Problemas estruturais (fadiga, deflexão);

1 – Menor frequência e 7 – Maior frequência.

A frequência de manutenção depende do orçamento disponível por parte das administrações rodoviárias, visto que as despesas são diferentes conforme o tipo de degradação presente no pavimento. Em Portugal verifica-se que a irregularidade longitudinal é a terceira deformação que conduz a mais operações de manutenção [5].

Numa fase posterior foram indicadas, no mesmo estudo, as formas mais comuns de degradação presentes nas estradas dos países convidados.



Legenda:

- IT – Itália;
- HR – Croácia;
- UK – Reino Unido;
- NO – Noruega;
- RO – Roménia;
- IS – Islândia;

As restantes abreviaturas são idênticas às mencionadas no Quadro 1.1.

Figura 1.2 Avaliação das degradações presentes nos países convidados [9]

Na Figura 1.2 a avaliação é feita usando uma escala crescente de 0 a 5, cada um dos valores que fazem parte desse intervalo tem o seguinte significado: 0 – não ocorre; 1 – ocorre ocasionalmente; 5 – ocorre com regularidade [5], [9]. Concluiu-se através desta avaliação que a irregularidade longitudinal é o quarto tipo de degradação mais comum nos pavimentos dos países que participaram neste estudo. Assim, é necessário controlar esta anomalia, de forma a garantir as condições necessárias para o bom desempenho de um pavimento.

Com o objetivo de criar métodos que assegurem este bom desempenho do pavimento e que promovam uma melhor gestão dos investimentos feitos ou a fazer, várias instituições têm-se preocupado em desenvolver modelos de evolução de degradações [5]. Destacam-se os seguintes modelos:

- A nível Mundial, dos vários modelos existentes, destaca-se o modelo *Highway Design and Maintenance* (HDM) do Banco Mundial (*World Bank*), que relativamente à irregularidade longitudinal tem em conta cinco componentes: degradação estrutural, fendilhamento, rodeiras, covas e efeitos ambientais, a análise destas componentes é feita individualmente, de modo a verificar a relação destes parâmetros com a capacidade estrutural e funcional dos pavimentos e qual a sua evolução nos pavimentos em estudo [10];

- A nível Europeu, destaca-se o modelo desenvolvido no projeto *Performance Analysis of Road Infrastructure* (PARIS). Este projeto foi iniciado em 1996 e concluído em 1998 e contou com a participação de vários países, incluindo Portugal, representado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) [11].

É importante que as instituições a nível nacional passem a utilizar modelos de evolução das degradações, de modo a melhorar a gestão dos pavimentos que estão encarregues. Para tal podem criar um novo modelo ou adotar um modelo já existente, como por exemplo o modelo HDM-4. No entanto, nesse caso para poder ser aplicado nestes pavimentos, este precisa de ser calibrado, sendo para tal necessário recorrer a uma base de dados que contenha um número elevado de secções. Em trabalho anterior, utilizou-se a base de dados da IP para desenvolver modelos de previsão de fendilhamento [4] e de rodeiras [9]. Desta forma, achou-se importante recorrer à mesma base de dados para estabelecer, no presente trabalho, modelos de previsão de irregularidade longitudinal ajustados à rede rodoviária nacional.

1.2 Objetivo e metodologia

O objetivo principal desta dissertação consiste em estabelecer modelos de previsão de irregularidade longitudinal, em pavimentos rodoviários representativos da rede rodoviária nacional.

A metodologia adotada para esta dissertação teve por base a análise e o estudo dos conteúdos dos modelos de evolução das degradações, HDM-4 e PARIS, de modo a identificar de que forma estes se adaptam aos pavimentos característicos da rede rodoviária nacional. Desta forma, verificou-se que o projeto PARIS apesar de ser bastante interessante, não se adapta aos valores presentes na base de dados da IP, pelo facto de estes não apresentarem grande evolução. Assim, adotou-se o modelo HDM-4 para concretizar o objetivo da presente dissertação e a base de dados referida para realizar as calibrações necessárias para que o modelo seja válido a nível nacional.

Posteriormente, após adoção do modelo HDM-4, analisaram-se quais os fenómenos que levam ao aparecimento de irregularidade longitudinal em pavimentos do tipo flexível. Para tal, avaliou-se a influência de outros parâmetros, utilizados no modelo, nesta deformação.

Em seguida, foi utilizada a informação da base de dados fornecida pela IP para estabelecer modelos de previsão de irregularidade longitudinal, com objetivo de manter os pavimentos em condições de serviço dentro dos níveis admissíveis. Os dados fornecidos consistem em quatro observações do IRI (2011 a 2014). Uma vez que este valor depende de outras degradações, também foram fornecidos para os mesmos anos os dados de fendilhamento e de rodeiras. Em trabalho anterior, foram realizados modelos de previsão de fendilhamento e rodeiras, tendo sido feita uma seleção de um conjunto significativo de secções presentes na base de dados da IP, de modo a interligar estes fenómenos foram adotadas no presente trabalho as mesmas secções [4], [9].

Uma vez que esta base de dados não foi construída com o intuito de ser utilizada na elaboração de modelos de previsão de irregularidade longitudinal, foram encontradas algumas limitações na sua utilização. Deste modo, foi necessário proceder ao estudo de cada secção de forma individual e cuidadosa. Após serem introduzidos os dados

no modelo de previsão da evolução de IRI do HDM-4 e de serem analisados os resultados obtidos, procurou-se verificar se existia um bom ajustamento com os valores medidos pela IP.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos. No Capítulo 2 é feito enquadramento histórico da evolução dos equipamentos e das medidas utilizadas para medir a irregularidade longitudinal de um pavimento e descreve-se o parâmetro IRI. Posteriormente, faz-se a caracterização dos tipos de modelos existentes e descrevem-se de forma detalhada os modelos, HDM-4 e o projeto PARIS.

No Capítulo 3 trata-se do caso de estudo onde é realizada uma análise estatística do valor do IRI e dos níveis de gravidade presentes na rede rodoviária nacional. Faz-se também, uma avaliação dos parâmetros utilizados para o modelo HDM-4 e de que forma estes influenciam o valor do IRI.

No Capítulo 4 é apresentado o sistema de gestão da IP. Posteriormente, foi realizada para o caso de estudo uma análise relativa à distribuição do valor do IRI presentes nos trechos escolhidos para análise, assim como a descrição dos critérios de seleção dos mesmos. Na secção final, são apresentados os ajustes realizados dos valores obtidos pelo modelo HDM-4 para a rede rodoviária nacional.

No Capítulo 5 são desenvolvidas as conclusões finais do trabalho e sugerem-se alguns desenvolvimentos futuros no âmbito do tema da presente dissertação.

No Anexo A é apresentada a metodologia utilizada no modelo HDM-4 para proceder ao cálculo da profundidade média das rodeiras.

No Anexo B demonstra-se o procedimento para o cálculo do fendilhamento total e aberto utilizado no modelo HDM-4.

No Anexo C apresenta-se a metodologia utilizada no modelo HDM-4 para calcular o número estrutural modificado de um pavimento.

No Anexo D encontram-se os valores das componentes do IRI obtidos pelo modelo HDM-4.

No Anexo E encontram-se os valores médios de IRI medidos pela Infraestruturas de Portugal.

No Anexo F encontram-se os valores de IRI obtidos após a calibração do modelo HDM-4.

No Anexo G encontram-se os valores de fendilhamento medidos pela Infraestruturas de Portugal.

No Anexo H encontram-se os valores de rodeiras médias medidas pela Infraestruturas de Portugal.

Capítulo 2

2 Irregularidade longitudinal

2.1 Introdução

Este capítulo começa por apresentar a irregularidade longitudinal como principal indicador do desempenho funcional do pavimento de uma estrada.

Em seguida são referidas algumas das primeiras formas de medição de irregularidade longitudinal até à utilizada atualmente, assim como o aparecimento da necessidade de existência de um índice de irregularidade internacional capaz de comparar medições a nível mundial entre diferentes entidades rodoviárias.

Posteriormente, o IRI é apresentado assim como os fatores que foram considerados para a criação deste índice, sendo também analisados modelos de previsão já existentes importantes para o desenvolvimento do objetivo deste trabalho.

2.2 Evolução dos métodos de avaliação de irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal é a característica do perfil longitudinal que, ao longo do caminho percorrido pelas rodas de um veículo, melhor define o impacto causado tanto a nível do desempenho funcional como estrutural de uma estrada [12]. Esta deformação resulta do desvio existente entre a superfície do pavimento e um plano de referência. Este desvio influencia o deslocamento dos veículos e apresenta valores dentro da gama de comprimentos de onda de 0,5 a 50 m e amplitude de 1 a 200 mm [13].

A irregularidade longitudinal deriva de várias causas que afetam as condições de circulação do pavimento, sendo assim considerada o principal indicador do desempenho do pavimento.

A Figura 2.1 mostra alguns parâmetros que influenciam este fenómeno e de que forma ocorre a sua evolução num pavimento flexível.

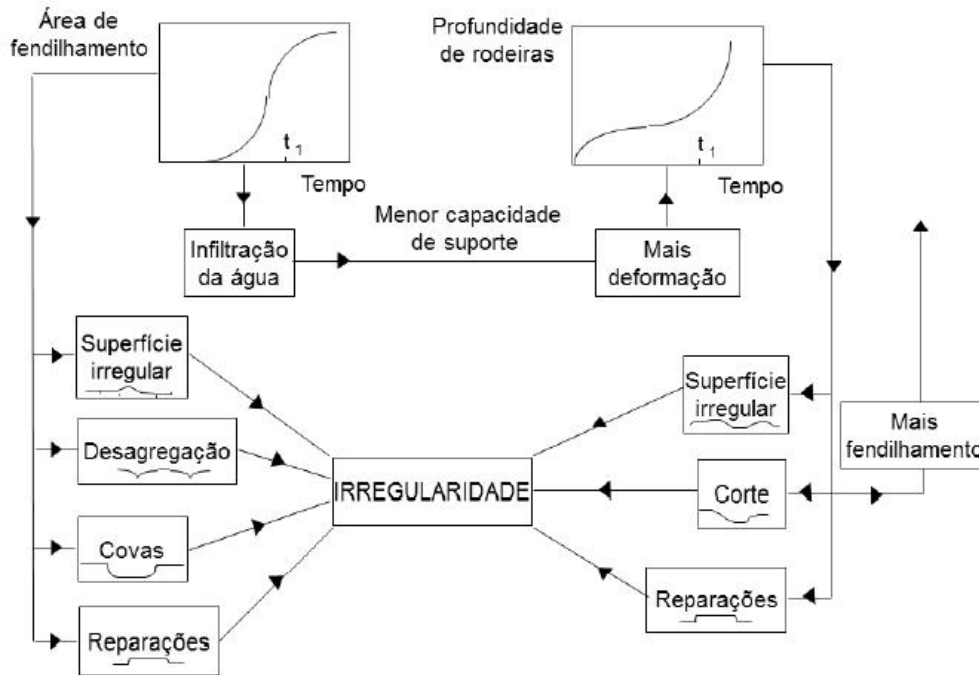


Figura 2.1 Evolução da irregularidade em pavimentos flexíveis [14]

Esta anomalia é a principal responsável por ocorrerem forças indesejáveis, que influenciam o conforto e a segurança dos utentes de uma estrada, tendo merecido especial atenção quer por parte das administrações rodoviárias, quer por parte dos utentes da estrada que são os intervenientes mais diretos e principais avaliadores das condições de circulação de uma estrada. Se para essa estrada em particular, as velocidades de circulação forem semelhantes, então a sensação de qualidade de condução está diretamente relacionada com os comprimentos de onda exibidos pela superfície do pavimento [15].

Assim, a medição de irregularidade está a ganhar cada vez mais importância na avaliação da condição de um pavimento, em termos de desempenho e como principal indicador dos custos de utilização do mesmo [16], [17].

As primeiras formas de medição de irregularidade longitudinal utilizavam diferentes tipos de equipamentos, sendo de referir os seguintes [1]:

- Equipamentos de referência geométrica simples;
- Equipamentos baseados na resposta dinâmica de um veículo;
- Equipamento baseado na obtenção de uma “imagem” do perfil da superfície do pavimento (perfilómetro estático e dinâmico).

Os equipamentos de referência geométrica simples, como por exemplo a régua de três metros, têm vindo a ser cada vez menos utilizados devido ao seu baixo rendimento [1].

Os equipamentos baseados na resposta dinâmica de um veículo, conhecidos como “equipamentos do tipo resposta” (“*Response-Type Road Roughness Measuring System*”, RTRRMS), medem os deslocamentos relativos a massas suspensas e a massas não suspensas de um veículo, isto é medem o deslocamento vertical de uma roda, em relação

à estrutura de atrelado onde é montada, com um mecanismo que acumula movimentos ascendentes da suspensão, a 80 km/h. Todos os equipamentos deste tipo seguem o conceito de “*Roughmeter*” do “*Bureau of Public Roads*” (BPR). Entre os vários modelos existentes referem-se: o *Bumper Integrator* (ver Figura 2.2) e o *Maysmeter* [15], [16].



Figura 2.2 *Bump Integrator* [18]

Os RTRRMS têm a vantagem de ter um custo acessível e de terem uma operação simples, no entanto dependem do estado do veículo de ensaio, para além de apresentarem limitações quanto à velocidade de operação e à medição de certas gamas de comprimentos de onda. Assim, para que os seus resultados destes equipamentos sejam válidos, devem ser calibrados regularmente e por esse motivo foram substituídos por equipamentos mais recentes, como os perfilómetros, os quais apresentam resultados independentes do tipo de veículo utilizado [1], [15].

Com o aparecimento dos perfilómetros, foi possível passar a fazer-se uma representação detalhada de um pseudo-perfil da superfície do pavimento. Este tipo de equipamento divide-se em duas categorias: perfilómetros estáticos (equipamentos de mira e nível ou a viga *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL)) e perfilómetros dinâmicos (como o Analisador do Perfil Longitudinal (APL), desenvolvido pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées em França e que determina a irregularidade longitudinal de forma contínua e utilizando um pêndulo inercial) [19].

O aumento da importância da medição da irregularidade longitudinal, pelo facto de ser o principal indicador da avaliação do desempenho de um pavimento, levou à criação de vários métodos de medição, tal como foi referido. No entanto, a partir de um certo ponto os diferentes métodos de medição utilizavam diferentes tecnologias e critérios analíticos, o que impediu durante algum tempo a comunicação e comparação dos conhecimentos entre diferentes entidades, devido às dificuldades em transferir as unidades de medida dos equipamentos para uma escala padrão. Esta situação deveu-se a vários fatores que causavam variações entre as leituras de equipamentos semelhantes ou até do mesmo equipamento [12], [16].

Esta necessidade de encontrar uma escala padrão, reconhecida internacionalmente, levou a que no âmbito da *Internacional Road Roughness Experiment* (IRRE), realizada no Brasil em 1982, com a participação de seis países

e do Banco Mundial, através de diferentes tipos de equipamentos de medição e unidades de irregularidade aplicados às mesmas secções de teste, experimentalmente, se desenvolvesse um Índice de Irregularidade Internacional, IRI [16].

2.3 Utilização do parâmetro IRI

Como foi anteriormente referido, a partir da experiência realizada no Brasil em 1982, o IRI foi aceite como medida internacional do estado funcional de um pavimento, por representar as irregularidades e as propriedades superficiais deste e por estar relacionado com a segurança e conforto de um trajeto rodoviário. As condições de serviço de uma estrada são o indicador principal do seu desempenho [20], [21].

Os fatores que foram considerados para a seleção desta escala foram [12], [22]:

- O índice tinha de estar relacionado com a resposta da vibração de veículos a motor, assim como com os índices de irregularidade que estivessem direta ou indiretamente ligados aos veículos motorizados;
- A escala escolhida tinha de estar ligada a uma transformação matemática estável no tempo e relacionada com o perfil da estrada;
- O cálculo tinha de ser feito utilizando um elevado número de diferentes equipamentos;
- Os procedimentos e requisitos deste cálculo tinham de ser facilmente elaborados em todo o mundo.

Atualmente o cálculo do IRI é feito por intermédio de um único perfil longitudinal obtido por equipamento mais sofisticados denominado perfilómetro a laser de alta precisão recorrendo à informação proveniente de vários sensores laser, dispostos ao longo da barra horizontal situada no pára-choques dianteiro da viatura de medição (ver Figura 2.3 e Figura 2.4) [2].



Figura 2.3 Equipamento de inspeção mecânica- perfilómetro laser [2]



Figura 2.4 Sistema de controlo em inspeções mecânicas [2]

Este tipo de equipamento de medição permite a obtenção de rendimentos mais elevados que os referidos anteriormente, nunca apresentando rendimentos inferiores a 200 km de estrada inspecionada por dia. As inspeções mecânicas têm como outra vantagem permitirem a integração no tráfego, minimizando desta forma a perturbação provocada aos utentes. Os resultados obtidos são mostrados em tempo real através do sistema de controlo representado na Figura 2.4, o que facilita a verificação informação recolhida e para além disso permite ao utilizador introduzir manualmente informação adicional, caso seja necessário [2].

A utilização dos perfilómetros para o cálculo do IRI, profundidade das rodeiras, macrotextura e dados geométricos da estrada apresenta grandes vantagens; contudo não é possível caracterizar outros indicadores do estado superficial, necessários para a avaliação da qualidade do pavimento (como o fendilhamento, peladas, desagregações, etc.), tendo que, para estes casos, de se recorrer a outro tipo de equipamento [19].

O perfil longitudinal obtido para o cálculo do IRI é filtrado em intervalos de 250 mm em que, para se obterem resultados mais precisos, o valor da amostra em estudo não deve ser maior que 300 mm. Neste perfil, considera-se que o declive é constante em todos os pontos da distância percorrida. O valor deste índice é expresso em m/km, resultando da diferença entre o perfil real da amostra (medido pelo perfilómetro) e o perfil teórico conseguido através da simulação do quarto-de-carro, com parâmetros específicos (*Golden Car*), a uma velocidade de 80 km/h, em que os deslocamentos de suspensão são acumulados linearmente e divididos pelo comprimento da amostra [23], [24].

O parâmetro IRI resulta de uma série de equações diferenciais que relacionam os movimentos simulados pelo quarto-de-carro e o perfil real da estrada. A Figura 2.5 ilustra o modelo do quarto-de-carro e os parâmetros adotados.

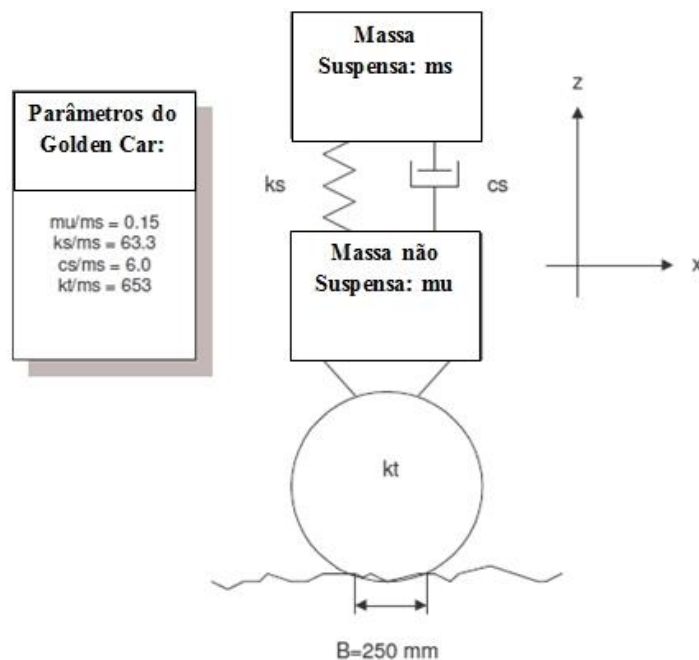


Figura 2.5 Modelo do IRI - *Golden Car* (adaptado de [23])

Em cada posição da roda do *Golden Car* (representado na Figura 2.5), este comporta-se como uma massa suspensa apoiada numa suspensão com determinada rigidez e amortecimento, que por sua vez está ligada a uma massa não suspensa composta pela roda, travões e componentes da suspensão. O contato da roda com a estrada é feito através dos pneus que funcionam como mola [22].

A transformação matemática que permite o cálculo do IRI, relacionando a massa suspensa (m_s) e a massa não suspensa (m_u) do modelo do *Golden Car* (ver Figura 2.5), com o perfil longitudinal medido é expressa através de [23]:

$$IRI = \frac{1}{LP} \int_0^{LP} |\dot{Z}_s - \dot{Z}_u| dt \quad (2.1)$$

em que:

IRI – Índice de Irregularidade Internacional (m/km);

LP – Comprimento do perfil (km);

S – Velocidade simulada (80 km/h);

\dot{Z}_s – Derivada (no tempo) do deslocamento da massa suspensa;

\dot{Z}_u – Derivada (no tempo) do deslocamento da massa não suspensa.

Por intermédio da Equação (2.1) podemos verificar que o IRI é quantificado através dos desvios verticais ao longo do troço da estrada, a uma velocidade específica para esta simulação.

Através do IRI é possível que os valores apresentados nesta escala, possam ser comparados diretamente entre diferentes administrações rodoviárias e que estes tenham o mesmo significado em todo o tipo de pavimento, utilizado por veículos pesados e de passageiros, independentemente do seu material [16].

A Figura 2.6 mostra o intervalo aproximado de IRI em estradas com diferentes níveis de serviço.

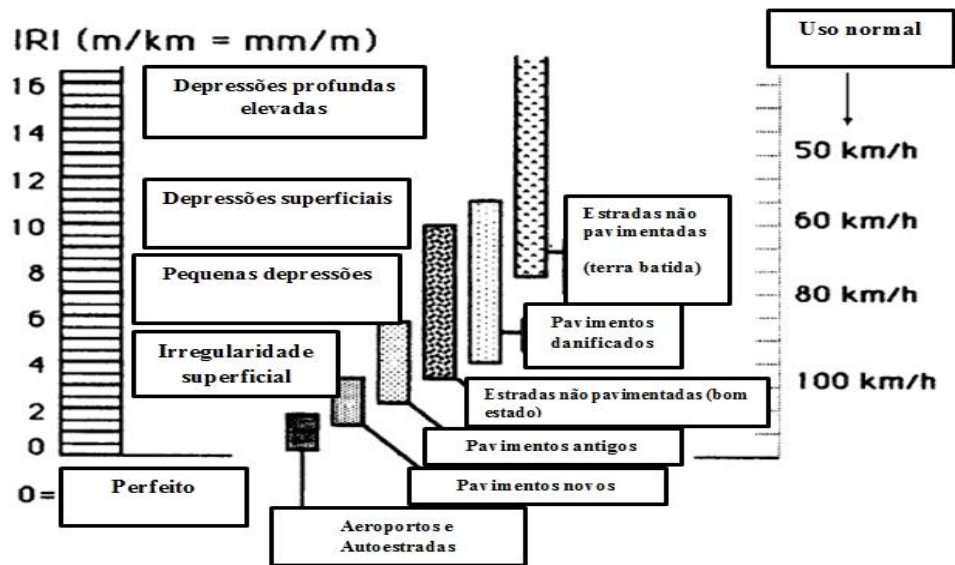


Figura 2.6 Escala de IRI (adaptado de [16])

De acordo com os dados recolhidos pela IRRE, fez-se uma comparação entre as diferentes escalas utilizadas para quantificar a irregularidade longitudinal presente num pavimento e o IRI (ver Figura 2.7).

IRI (m/km IRI)	QIm (count/km)	BIr (mm/km)	CP _{2,5} (0.01 mm)	Wsw	CAPL ₂₅	SI (PSI)	IMr (in/mile)	IRI m/km
0	0	0	0	0	0	5.0	0	0
2	20	1.000	20	4	4	4.0	100	2
4	40	2.000	40	8	8	3.0	200	4
6	60	3.000	60	12	12	2.0	300	6
8	80	4.000	80	16	16	1.5	400	8
10	100	5.000	100	20	20	1.0	500	10
12	120	6.000	120	24	24	0.5	600	12
14	140	7.000	140	28	28		700	14
16	160	8.000	160	32	32		800	16
18	180	9.000	180	36	36		900	18
20	200	10.000	200	40	40		1.000	20

Legenda:

QIm – Índice de Irregularidade obtido pelo quarto-de-carro, calibrado com o equipamento *Maysmeter* (contagens/km);

BIr – Índice de Irregularidade obtido pelo *Bump Integrator* (mm/km);

CP_{2,5} – Índice de Irregularidade obtido pelo perfilómetro APL72, num comprimento de 2,5 m;

Wsw – Energia de Pequeno comprimento de onda obtida pelo perfilómetro APL72;

CAPL₂₅ – Índice de Irregularidade obtido pelo perfilómetro APL25;

PSI – Índice de Aptidão de Serviço;

IMr – Índice equivalente ao IRI, obtido por simulação de referência de um quarto-de-carro (polegada/milha).

Figura 2.7 Comparação entre o IRI e outros índices de irregularidade (adaptado de [25])

Podem ser encontradas equações matemáticas para estabelecer a equivalência entre os índices indicados na Figura 2.7 [25].

As variações das cargas dinâmicas, causadas pela alteração das condições superficiais de um pavimento, levam à redução da aderência à estrada por parte dos pneus e o aumento dos danos causados pelos veículos pesados. Desta forma, estes fatores podem pôr em causa a comodidade e segurança dos utentes de uma estrada. O uso da escala do IRI é apropriada quando se pretende relacionar: o custo operacional dos veículos, a qualidade do pavimento, assim como as suas condições superficiais [16]. Para avaliar a aptidão de serviço de uma estrada é utilizado o PSI através de uma equação que correlaciona vários parâmetros do pavimento, como as variações de declive, o fendilhamento, as rodeiras e zonas reparadas [13].

Este índice resultou da aplicação da técnica de regressão linear dos resultados do ensaio rodoviário AASHO, tendo sido desenvolvidos dois modelos, um para pavimentos flexíveis e outro para pavimentos rígidos, que não será apresentado no presente trabalho devido ao peso pouco significativo a nível da rede rodoviária nacional. É avaliado numa escala de 0 a 5 (em que – 5 corresponde a uma excelente condição de serviço) [13].

Este foi o primeiro método de avaliação da qualidade funcional de um pavimento, sendo expresso através da Equação (2.2) para pavimentos flexíveis:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \times \log(1 + SV) - 0,01\sqrt{CS + P} - 1,38 RD^2 \quad (2.2)$$

em que:

PSI – Índice de Aptidão de Serviço;

SV – Média da variância da inclinação do perfil longitudinal;

CS – Área de pele de crocodilo ou desagregação superficial ($m^2/1000 m^2$);

P – Área das zonas reparadas ($m^2/1000 m^2$);

RD – Profundidade média das rodeiras (polegadas) [13].

Nesta expressão o parâmetro SV, que traduz a irregularidade longitudinal, é o que tem a maior contribuição (cerca de 95%) para o cálculo do PSI. Este índice representa o estado do pavimento através de uma avaliação global, resultante de vários “parâmetros de estado”, sendo que o seu peso está relacionado com vários fatores, como a política de conservação e o estado de desenvolvimento da rede rodoviária [1].

A partir dos dados recolhidos na IRRE foi estabelecida a seguinte correlação aproximada entre o PSI e o IRI expressa na Equação (2.3) [25]:

$$IRI = \ln\left(\frac{50}{PSI}\right) \quad (2.3)$$

em que:

IRI – Índice de Irregularidade Internacional (m/km);

PSI – Índice de Aptidão de Serviço.

Em Portugal exprime-se o efeito do IRI na aptidão de serviço através da Equação (2.4) usada pelo SGPav, Sistema de Gestão de Pavimentos da Infraestruturas de Portugal, para pavimentos flexíveis.

O valor do IQ é obtido através da seguinte expressão [2]:

$$IQ = 5 \times e^{-0,0002030 \times IRI} - 0,002139 \times RD^2 - 0,03 \times (C_3)^{0,5} \quad (2.4)$$

em que:

IRI – Irregularidade longitudinal do pavimento (mm/km);

RD – Profundidade média das rodeiras (mm);

C₃ – Coeficiente de área com pele de crocodilo (m²/100 m²).

A distribuição de valores varia no intervalo entre 0 a 5 (em que 0 – muito mau estado; 5 – muito bom estado; 2,5 – indicador da necessidade de intervenção). Através desta avaliação localizam-se as secções em piores condições para que sejam ações de intervenção. Assim, conforme o orçamento disponível são feitos trabalhos de manutenção, de modo a manter o maior número de troços dentro das condições consideradas admissíveis [26].

2.4 Modelos de previsão de IRI

2.4.1 Tipos de modelos

O desenvolvimento dos modelos de previsão da evolução do comportamento (abreviadamente designados por modelos de comportamento) de cada tipo de estrutura de pavimento depende da sua componente estrutural, associada à capacidade de carga e da sua componente funcional, relacionada com o conforto e segurança de circulação, sendo esta mais dependente das características e das propriedades da camada de desgaste [1].

Os modelos de comportamento classificam-se de acordo com o nível de aplicação, o tipo de variáveis dependentes e independentes, o formato conceptual e o tipo de formulação, como está representado no Quadro 2.1 [1].

Quadro 2.1 Classificação dos modelos de comportamento [1]

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

➤ Nível de aplicação

A nível da rede, os modelos são aplicados com o intuito de prever as condições futuras do pavimento, definindo as necessidades de conservação e reabilitação ao longo da sua vida. A nível de projeto identificam-se as secções que precisam de intervenção e providenciam-se alternativas de conservação para cada caso específico, fazendo uma análise técnica e económica [1], [18], [27].

➤ Tipos de variáveis dependentes

Os modelos globais expressam o estado do pavimento em termos globais, através de índices de degradação e de índices de condição de serviço (por exemplo: PSI). Os modelos paramétricos representam o estado do pavimento através de índices que representam diferentes parâmetros de estado do pavimento (por exemplo: área de fendilhamento, profundidade da rodeira, IRI) [1], [18].

➤ Tipos de variáveis independentes

Os modelos absolutos utilizam variáveis independentes distintas para explicar a evolução do comportamento das características do pavimento (espessura das camadas, módulos de deformabilidade, características das misturas, clima e tráfego). São modelos mais complexos, de difícil desenvolvimento, particularmente para pavimentos em serviço, devido à dificuldade em conhecer os valores das variáveis consideradas. Os modelos relativos permitem prever o estado futuro dos pavimentos considerando diferentes parâmetros de estado (degradações, irregularidade longitudinal, aderência), medidos ao longo dos anos de serviço, utilizando apenas uma variável independente, a qual pode ser o tempo (anos de serviço) ou o tráfego suportado (número acumulado equivalente de eixos padrão) [1], [18].

➤ Formato conceptual

Os modelos mecanicistas baseiam-se em fundamentos teóricos e nas propriedades dos materiais que constituem as camadas dos pavimentos obtidas através de ensaios de comportamento em laboratório ou “in situ”. Tratam-se de modelos que estão dependentes da precisão dessas propriedades, as quais variam ao longo da vida do pavimento [28].

Os modelos empíricos apoiam-se em dados baseados em experiências e investigações, com o intuito de conseguir uma relação entre a evolução do comportamento das características do pavimento e as diferentes variáveis que descrevam as cargas e outras ações a que este está sujeito [19].

Ambos apresentam desvantagens que limitam a sua aplicação. Estas desvantagens são [1], [19]:

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

Assim, foram criados os modelos empírico-mecanicista, que combinam as bases teóricas dos modelos mecanicistas, ponderadas com análise de dados experimentais ou observados dos modelos empíricos. Desta forma, são modelos mais flexíveis [9], [18], [23].

➤ Tipo de formulação

De acordo com a sua formulação, genericamente, os modelos de comportamento são regularmente classificados como modelos determinísticos ou modelos probabilísticos e podem aplicar-se tanto ao nível da rede, como a nível do projeto [1].

Os modelos determinísticos, modelos reativos, prevêem um único valor para o parâmetro de estado do pavimento correspondente a um conjunto de variáveis independentes. Estes modelos lidam principalmente com respostas primárias, estruturais, funcionais e de deterioração do pavimento e utilizam técnicas empíricas, como por exemplo análises de regressão, e técnicas empírico-mecanicistas, fazendo avaliação da resposta estrutural ponderada com o conhecimento empírico da evolução do comportamento dos pavimentos. Nos últimos anos foram realizados vários estudos com objetivo de desenvolver este tipo de modelo. Desta forma, este é o método de previsão de comportamento mais vulgarmente utilizado nos SGP [18], [19].

Os modelos probabilísticos, modelos proactivos, não só indicam um valor esperado, que pode ser comparado com o valor previsto através de um modelo determinístico, como também indicam as probabilidades de cada estado do pavimento, definido após um ou mais anos de deterioração. Neste tipo de modelos, utilizam-se técnicas probabilísticas como por exemplo funções de distribuição [9], [19].

No presente capítulo, os modelos referidos de seguida dizem apenas respeito a modelos de previsão de irregularidade, não sendo referidos os modelos concebidos para outros parâmetros de estado que são tidos em consideração.

2.4.2 Modelo HDM-4

O modelo HDM resultou de um estudo do Banco Mundial que teve como objetivo quantificar os custos: de construção de pavimentos, das ações de manutenção e da operação dos veículos, através da simulação do custo do ciclo de vida do pavimento [4], [29]. No Quadro 2.2 é feita a classificação do modelo HDM com base nas definições referidas anteriormente.

Quadro 2.2 Classificação do modelo HDM

Nível de aplicação	Tipos de variáveis dependentes	Tipos de variáveis independentes	Formato conceptual	Tipo de formulação
Projeto Rede	Paramétrico	Absoluto	Empírico- Mecanicista	Determinístico

Com o intuito de reconhecer projetos adequados a este modelo, foi feito um estudo internacional designado *International Study of Highway Development and Management Tools* (ISOHDM), no qual os principais colaboradores foram:

- *The Asian Development Bank* (ADB), nas Filipinas;
- *The Overseas Development Administration* (ODA), no Reino Unido;
- *The Swedish National Roads Administration* (SNRA), na Suécia;
- *The World Bank*, (IBRD), nos Estados Unidos da América [23], [30].

Este estudo, iniciado em 1993 e concluído em 1995, teve como objetivo atualizar o modelo HDM, melhorando os processos de planeamento, programação, orçamento e análise de projetos [23], [30].

No modelo HDM-III para pavimentos flexíveis, foram consideradas a iniciação e progressão das seguintes deformações [23]:

- Fendilhamento;
- Desagregação superficial;
- Rodeiras;
- Irregularidade longitudinal.

Os modelos de irregularidade anteriores ao HDM-4 estão representados por ordem cronológica na Figura 2.8.

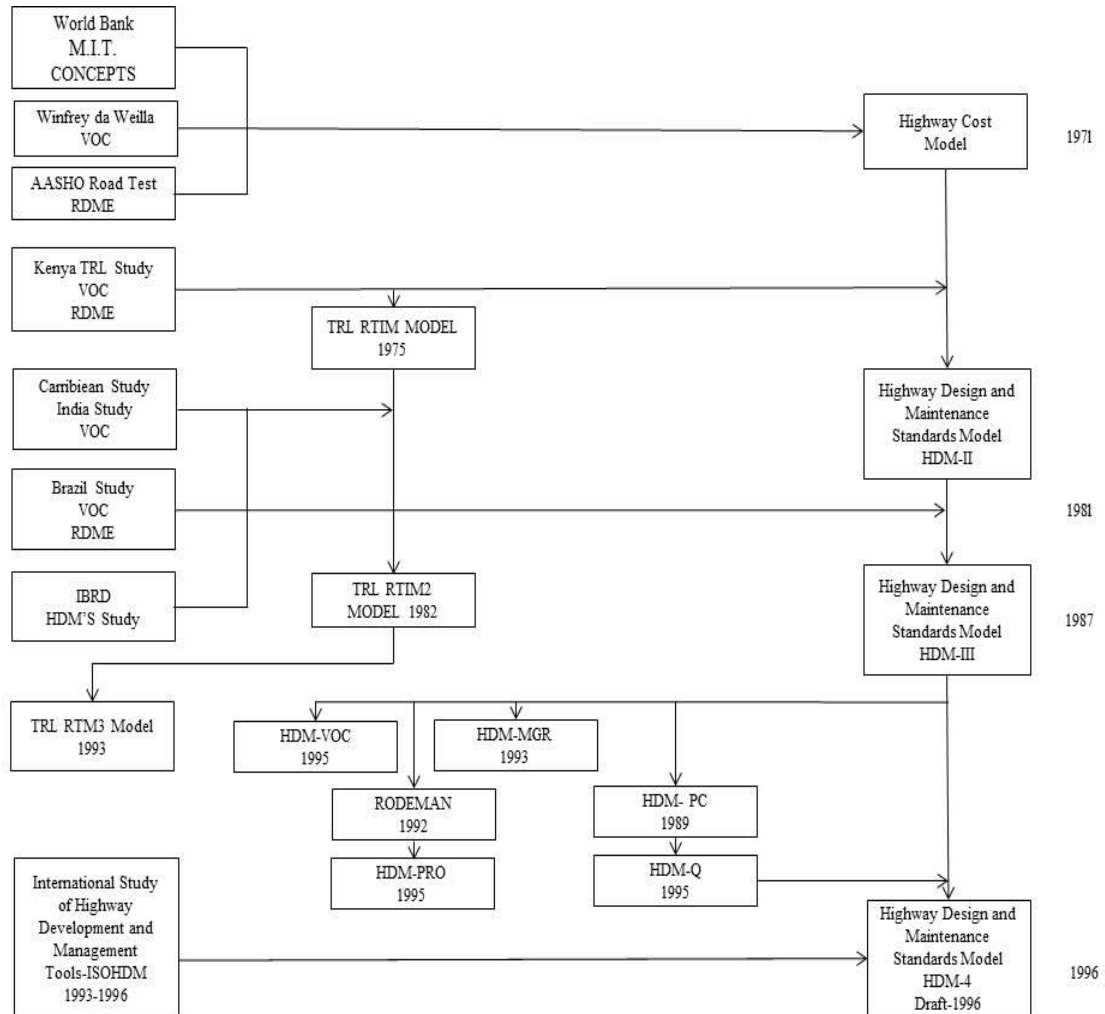


Figura 2.8 Desenvolvimento do modelo HDM [23]

Posteriormente, no modelo HDM-4, versão mais recente do Banco Mundial, foram adicionados novos parâmetros, como [23]:

- Peladas;
- Deterioração da berma;
- Rotura do bordo.

No presente trabalho foram tidos em consideração os modelos de previsão de degradação do pavimento, relativamente ao parâmetro de irregularidade. No entanto, o modelo HDM-4 também contém relações que prevêm a influência das características da estrada, no custo de operação do veículo, sendo possível estudar as implicações económicas de diferentes opções e estabelecer estratégias mais sustentáveis, de forma a minimizar o custo total de transporte [23], [31].

Estas estratégias têm como objetivo, prever a evolução do aparecimento das degradações num pavimento e intervir através de ações de manutenção para que as condições de serviço se mantenham sempre dentro da gama de valores admissíveis. Existem relações entre os vários modelos de previsão de degradação para pavimentos flexíveis, presente no modelo HDM-4. A Figura 2.9 mostra como é que essas degradações estão interligadas.

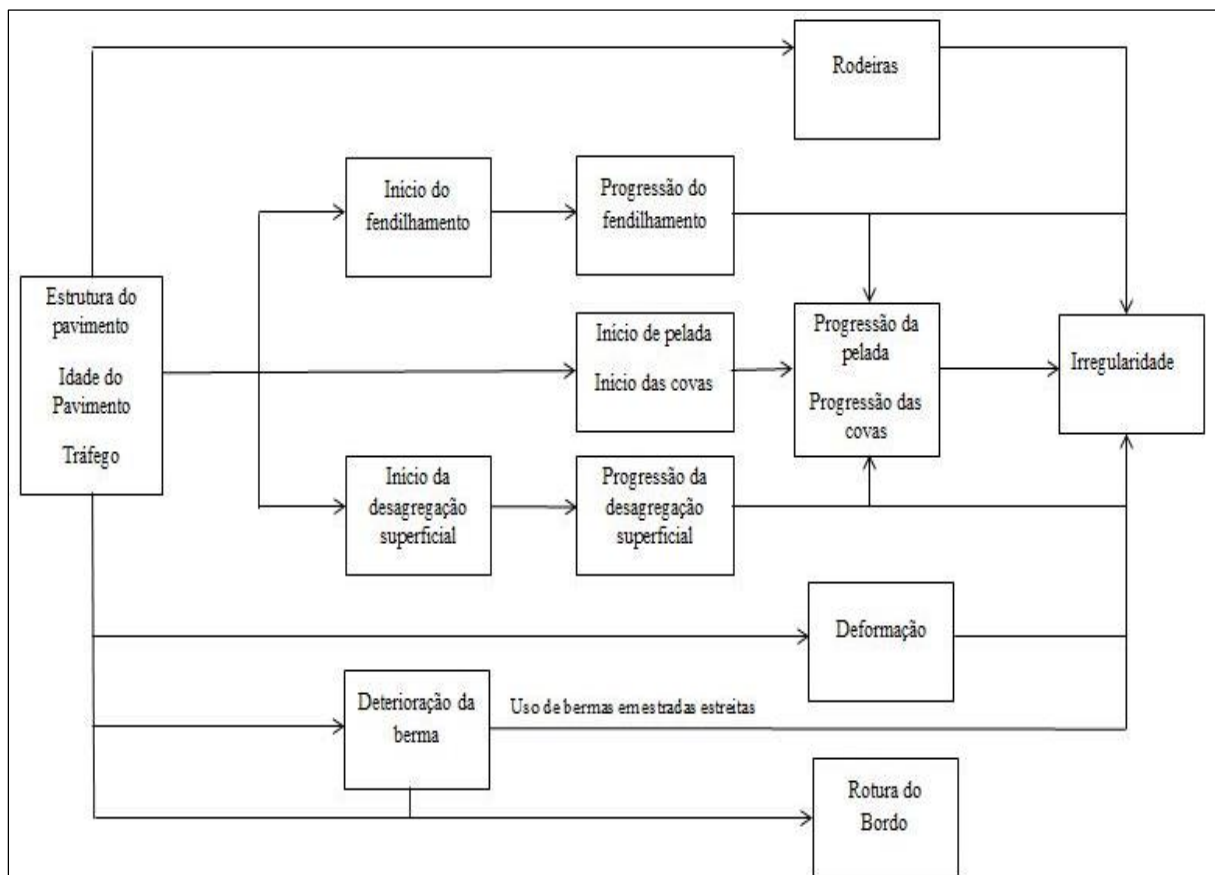


Figura 2.9 Fluxograma do modelo HDM-4 (adaptado de [23])

No modelo HDM-4 não existe um cálculo para o valor de IRI inicial logo após a construção de um pavimento, apenas a avaliação deste fenómeno após a entrada em serviço. A irregularidade longitudinal resulta da soma das cinco componentes seguintes [10]:

- Deformação estrutural;
- Fendilhamento;
- Rodeiras;
- Covas;
- Efeitos ambientais.

A deformação estrutural resulta das ações cargas acumuladas que o pavimento está exposto [32]. Para calcular esta deformação utilizam-se as seguintes expressões [10]:

$$\Delta IRI_s = Kgs \times a_0 \times e^{[Kgm \times (m) \times AGE^3]} \times (1 + SNPKb)^{-5} \times YE4 \quad (2.5)$$

onde

$$SNPKb = \max[(SNPa - dSNPK), 1.5] \quad (2.6)$$

onde

$$dSNPK = Ksnpk \times a_0 \times [\min(a1, ACXa) HSNEW + \max(\min(ACXa - PACX, a2), 0) HSOLD] \quad (2.7)$$

em que:

ΔIRI_s – Contribuição estrutural para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km);

dSNPK – Redução do número estrutural do pavimento devido ao efeito do fendilhamento;

SNPKb – Número estrutural do pavimento devido ao fendilhamento no final do ano em análise;

SNPa – Número estrutural ajustado no início do ano em análise;

ACXa – Área de fendilhamento prevista no início do ano em análise (%);

PACX – Área de fendilhamento existente nas camadas antigas, em percentagem da área total (%);

HSNEW – Espessura da camada mais recente existente, em caso de intervenção (mm);

HSOLD – Espessura total das camadas betuminosas existentes, antes de uma intervenção (mm);

AGE3 – Tempo decorrido desde a última reabilitação (anos);

m – Coeficiente ambiental, ver Quadro 2.3;

Kgm – Coeficiente de calibração para efeitos ambientais;

Ksnpk – Coeficiente de calibração para o SNPK;

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

a0, a1 e a2 – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4, ver Quadro 2.4.

Quadro 2.3 Valores recomendados para o coeficiente ambiental (m) aplicável ao modelo HDM-4 (adaptado de [10])

Classificação da humidade	Classificação da temperatura				
	Tropical	Subtropical quente	Subtropical frio	Temperado frio	Temperado gelo
Árido	0,005	0,010	0,015	0,020	0,030
Semiárido	0,010	0,015	0,020	0,030	0,040
Sub-húmido	0,020	0,020	0,030	0,040	0,050
Húmido	0,025	0,030	0,040	0,050	0,060
Molhado	0,030	0,040	0,050	-	-

➤ Fendilhamento

O incremento da irregularidade devido ao fendilhamento é dado por [10]:

$$\Delta IRI_c = Kgc \times a_0 \times \Delta ACA \quad (2.8)$$

em que:

ΔIRI_c – Contribuição do fendilhamento para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km);

ΔACA – Incremento anual da área fendilhamento total, em percentagem da área total (%);

Kgc – Coeficiente de calibração devido ao fendilhamento;

a0 – Coeficiente utilizado no modelo HDM-4, ver Quadro 2.4.

➤ Rodeiras

O incremento da irregularidade devido à profundidade média das rodeiras é dado por [10]:

$$\Delta IRI_r = Kgr \times a_0 \times \Delta RDS \quad (2.9)$$

em que:

ΔIRI_r – Contribuição da profundidade média das rodeiras para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km);

ΔRDS – Incremento anual no desvio padrão da profundidade das rodeiras (mm);

Kgr – Coeficiente de calibração devido às rodeiras;

a_0 – Coeficiente utilizado no modelo HDM-4, ver Quadro 2.4.

➤ Covas

Este parâmetro depende do tráfego e do espaço existente para a realização de manobras. Esta dependência é expressa através da seguinte equação[10] :

$$FM = (\max[\min(0,25 \times (CW - 3), 1), 0]) \max\left(1 - \frac{AADT}{5000}, 0\right) \quad (2.10)$$

em que:

FM – Índice de liberdade de manobrabilidade;

CW – Largura da faixa de rodagem (m);

$AADT$ – Tráfego médio diário anual, por sentido na via mais solicitada.

O incremento da irregularidade devido à formação de covas é dado por [10]:

$$\Delta IRI_p = Kgp \times a_0 \times (a_1 - FM) \times [(NPTbu)^{a_2} - (NPTa)^{a_2}] \quad (2.11)$$

em que:

ΔIRI_p – Contribuição da formação de covas para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km);

FM – Índice de liberdade de manobrabilidade;

$NPTa$ – Número de covas no início do ano em análise (número/km);

$NPTbu$ – Número previsto de covas no final do ano em análise (número/km), dado pela equação (2.12);

Kgp – Coeficiente de calibração da irregularidade;

a_0, a_1 e a_2 – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4, ver Quadro 2.4.

Número previsto de covas no final do ano em análise (número/km), dado pela seguinte expressão [10]:

$$NPTbu = NPTb \times \left(1 - \left(\frac{Ppat}{100}\right) \left(1 - \frac{Fpat}{365}\right)\right) \quad (2.12)$$

em que:

$NPTb$ – Número de covas no final do ano em análise (número/km);

$Ppat$ – Percentagem de covas remendadas (%);

$Fpat$ – Ciclo de manutenção (dias).

➤ Efeitos ambientais

Este parâmetro depende de fatores como a temperatura e a classificação da mistura de acordo com o coeficiente ambiental, m (ver Quadro 2.3).

O incremento da irregularidade devido aos efeitos ambientais é dado por [10]:

$$\Delta IRI_e = K_{gm} \times m \times RI_a \quad (2.13)$$

em que:

ΔIRI_e – Contribuição dos efeitos ambientais para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km);

RI_a – Irregularidade no início do ano em análise;

m – Coeficiente ambiental, ver Quadro 2.3;

K_{gm} – Coeficiente de calibração para efeitos ambientais.

O incremento anual da irregularidade total dado por [10]:

$$\Delta IRI = \Delta IRI_s + \Delta IRI_c + \Delta IRI_r + \Delta IRI_p + \Delta IRI_e \quad (2.14)$$

em que:

ΔIRI – Incremento anual da irregularidade total;

ΔIRI_s – Contribuição estrutural para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.5);

ΔIRI_c – Contribuição do fendilhamento para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.8);

ΔIRI_r – Contribuição da profundidade média das rodeiras para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.9);

ΔIRI_p – Contribuição da formação de covas para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.11);

ΔIRI_e – Contribuição dos efeitos ambientais para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.13).

Quadro 2.4 Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (adaptado de [32])

Coeficientes utilizados no modelo HDM-4					
Tipo de pavimento	Componente de irregularidade	Equação	a0	a1	a2
Flexível	Estrutural	(2.5)	134	-	-
	dSNPK	(2.7)	0,0000758	63	40
	Fendilhamento	(2.8)	0,066	-	-
	Rodeiras	(2.9)	0,088	-	-
	Covas	(2.11)	0,0019	2	1,5

As cinco componentes do IRI anteriormente apresentadas encontram-se interligadas na Figura 2.10 através do fluxograma para a irregularidade longitudinal do modelo HDM-4.

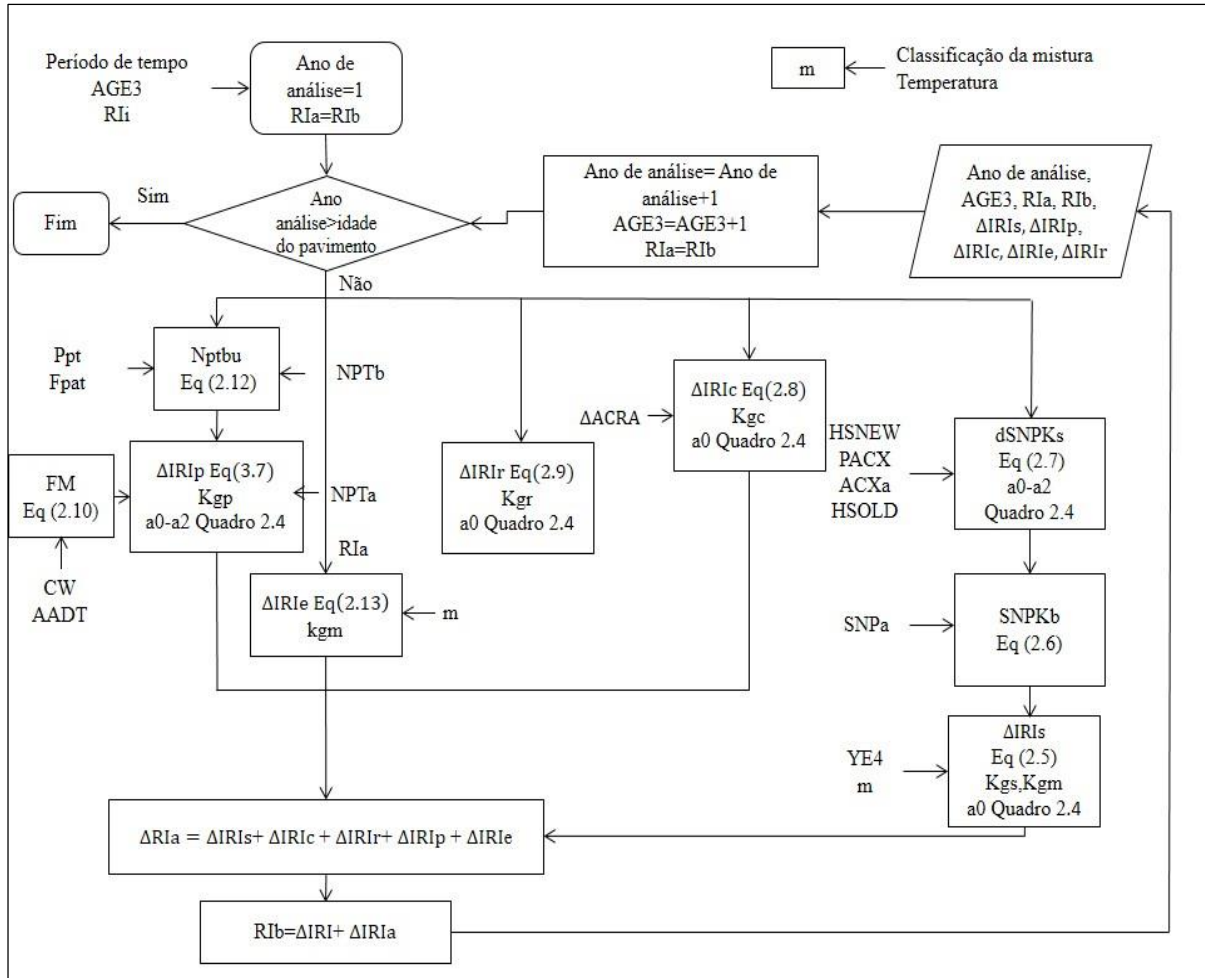


Figura 2.10 Fluxograma para a irregularidade longitudinal do modelo HDM-4 (adaptado de [10])

O significado da simbologia apresentada na Figura 2.10, encontra-se na legenda das equações (2.5) a (2.13) e /ou na lista de abreviaturas, siglas e símbolos.

2.4.3 Modelos do projeto PARIS

O projeto PARIS resultou de um estudo que teve início em 1996 e teve duração de dois anos. Este estudo pretendeu criar um modelo matemático de deterioração aplicável aos pavimentos de acordo com o tráfego, clima e materiais de pavimentos Europeus, contando com a participação de quinze países Europeus, incluindo Portugal, através de estudos feitos no LNEC. Os dados recolhidos dos diversos países participantes tiveram como objetivo o desenvolvimento de um modelo Europeu para o uso dos SGP [11].

Este modelo é classificado, de acordo com as definições anteriormente referidas, como determinísticos e empírico e é importante referir que é um método incremental, partindo de um valor inicial de IRI e dependendo das variações anual deste parâmetro.

Neste projeto foi feita análise dos seguintes parâmetros [11]:

- A iniciação do fendilhamento para pavimentos flexíveis e semi-rígidos;
- A progressão do fendilhamento para pavimentos flexíveis;
- A progressão de rodeiras para pavimentos flexíveis e semi-rígidos;
- A progressão de irregularidade longitudinal para pavimentos flexíveis e semi-rígidos;
- A progressão de arranque de materiais para pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

As medições nas secções teste foram analisadas através de uma regressão linear, que relaciona o IRI com o tempo. Esta função foi escolhida de forma demonstrar a mudança de IRI por ano, nos pavimentos em estudo [11]:

$$y = A + B \times x \quad (2.15)$$

em que:

y – Índice de irregularidade longitudinal (mm/m);

x – Tempo que decorreu desde a última reconstrução ou nova construção, equivalente ao AGE4 do modelo HDM (anos);

A – Parâmetro do modelo correspondente ao IRI inicial;

B – Parâmetro do modelo correspondente à variação anual de IRI.

Os parâmetros do modelo variam conforme o país em estudo, sendo que os valores estatísticos do parâmetro A, correspondentes aos valores iniciais de IRI, não são especificados.

O Quadro 2.5 mostra os valores estatísticos presentes nos países participantes neste estudo para o parâmetro B.

Quadro 2.5 Valores estatísticos do parâmetro B de PARIS para pavimentos flexíveis (adaptado de [11])

País	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Percentil 10 %	Percentil 90%
Finlândia	33	0,025	0,021	0,060	-0,114	0,135	-0,053	0,097
Suécia	296	0,044	0,031	0,056	-0,078	0,374	-0,007	0,114
Dinamarca	7	0,033	0,011	0,065	-0,071	0,125	-0,025	0,106
Holanda	165	0,030	0,027	0,033	-0,166	0,246	0,009	0,060
Inglaterra	15	-0,057	-0,050	0,100	-0,190	0,131	-0,190	0,126
França	7	0,050	0,056	0,047	0,016	0,135	-0,001	0,090
Áustria	10	0,023	0,033	0,040	-0,077	0,073	-0,069	0,071
Hungria	24	-0,006	0,006	0,164	-0,519	0,465	-0,180	0,127
Grécia	9	0,356	0,417	0,141	0,129	0,504	0,188	0,491
Total	566	0,039	0,028	0,077	-0,519	0,504	-0,010	0,106

Através do Quadro 2.5 verifica-se que os valores da variação de IRI são muito diferentes de país para país, o que traduz as diferentes estratégias de conservação por estes adotadas. Observa-se também que no caso da Hungria e da Inglaterra o valor do IRI decresce, pelo que se pode concluir que nestes existem mais ações de manutenção comparativamente com os outros.

A Figura 2.11 mostra a variação de IRI por ano em cada um dos países participantes deste estudo.

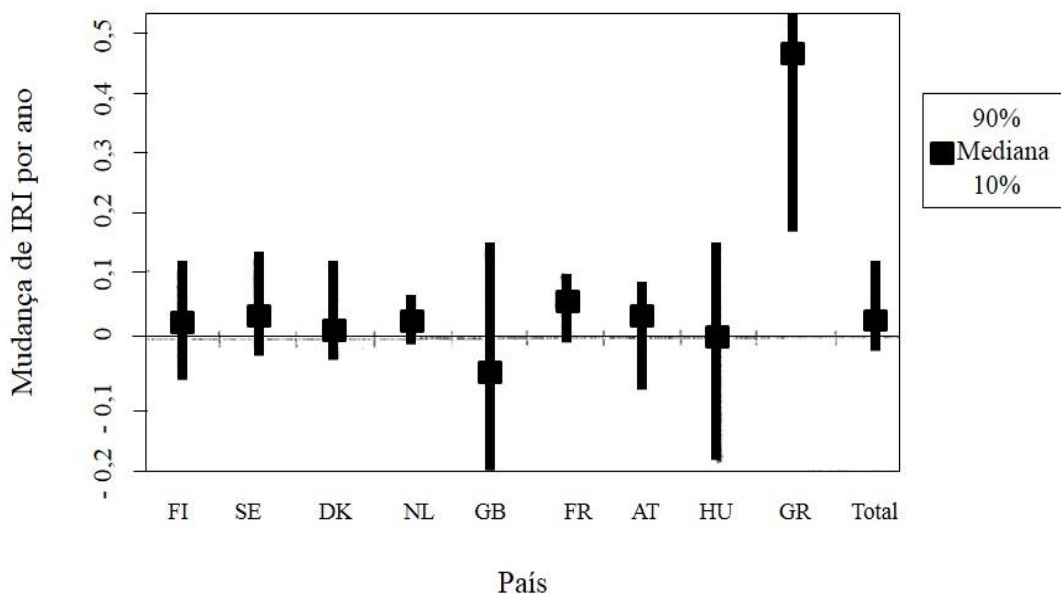


Figura 2.11 Distribuição da variação anual do IRI em diferentes países para pavimentos flexíveis (adaptado de [11])

De acordo com a Figura 2.11, conclui-se que na maioria dos casos, a mudança do IRI por ano é muito pequena, nas secções teste dos diferentes países participantes neste estudo. Verifica-se que em 90% dos casos de estudo, só ocorre uma mudança de cerca de 0,1 mm/m por ano, o que corresponde a uma mudança de 1 mm/m a cada dez anos aproximadamente.

Neste estudo foi também avaliado de que forma diferentes os parâmetros influenciam o valor IRI, sendo que através da análise da propagação da irregularidade longitudinal foi possível concluir [11]:

- Um modelo linear é apropriado para descrever a propagação da irregularidade longitudinal em função do tempo;
- A mudança do valor de IRI em função do tempo foi muito limitada nas secções examinadas;
- Para pavimentos flexíveis, pode haver algumas discrepâncias no valor dados recolhidos e isto pode estar relacionado com os equipamentos adotados para fazer as medições desta deformação;
- Não existem relações diretas entre a mudança do valor do IRI por ano e variáveis de controlo. Contudo, verifica-se que o volume de tráfego, a espessura das camadas betuminosas e a largura das vias influenciam a mudança de irregularidade longitudinal em níveis de hierarquia superiores.

2.5 Conclusões

Após a descrição da classificação dos modelos de previsão do IRI e da apresentação detalhada do modelo HDM-4 e do projeto PARIS, fizeram-se as seguintes comparações tendo como objetivo quantificar potencialidades de cada um.

Os modelos apresentados têm vantagens e desvantagens na sua concepção e aplicabilidade. Ambos os modelos não especificam um valor de IRI inicial, sendo que apresentam as variações anuais de IRI médio. Estes modelos não apresentam uma distribuição estatística dos valores obtidos.

Os modelos HDM, em particular o modelo HDM-4, têm como variável independente o tempo (anos), sendo que estes fazem a previsão do estado de degradação do pavimento. No entanto para a sua aplicação estes necessitam de um elevado número de fatores que os tornam mais complexos.

O projeto PARIS é aplicado de forma incremental, de acordo com a tendência de evolução dos dados em análise dependentes das características dos países participantes neste estudo. Através de uma certa probabilidade de ocorrência definem-se os parâmetros A e B, não sendo necessários um elevado número de fatores como no modelo HDM.

Ambos os modelos são interessantes para o desenvolvimento de modelos de comportamento, tendo como intuito limitar a ocorrência de irregularidade longitudinal. No entanto, no presente trabalho foram encontradas algumas dificuldades em aplicar o projeto PARIS, pelo facto dos valores presentes na base de dados da IP não apresentarem uma tendência de evolução, assim sendo só se fez a calibração, no caso de estudo, para o modelo HDM-4.

Capítulo 3

3 Fenomenologia do IRI

3.1 Metodologia adotada

Como referido anteriormente, existem diversos modelos de previsão de IRI e verificou-se que um modelo indicado para pavimentos flexíveis é o modelo HDM-4. Posteriormente, neste capítulo faz-se uma breve apresentação da base de dados da IP, referindo a informação que nesta se encontra disponível.

É importante saber de que forma é que os valores do IRI se distribuem no território nacional. Para tal foi pedido à IP que organizasse os dados presentes nas secções, existentes na sua base de dados, por ordem decrescente e que desta fossem extraídos o IRI médio (retirados do intervalo 1 ao 101, 501 ao 601 e 1001 ao 1101 – sendo 1 o valor de IRI médio mais alto). Com base nestes valores foi realizado um estudo estatístico com objetivo de identificar os diferentes níveis de IRI médio para que, numa fase posterior, fosse feita a análise de que fatores contribuem para a irregularidade que um dado pavimento apresenta.

De seguida, achou-se interessante analisar se os valores do IRI disponibilizados apresentam uma distribuição normal ou se são melhor ajustados a uma distribuição log-normal, visto que, os modelos existentes, referidos anteriormente, não apresentam este tipo de informação.

Com o intuito de criar um modelo ajustado à rede rodoviária nacional, foi elaborado um programa de apoio ao modelo HDM-4, recorrendo ao software *Matlab*, com o objetivo de avaliar de que forma diferentes parâmetros influenciam o valor do IRI, sendo que estes estão divididos nas seguintes categorias: capacidade estrutural, condições climáticas, compactação e cada uma das componentes que entram diretamente no cálculo do IRI.

Para estabelecer modelos de previsão de degradação de pavimentos do parâmetro IRI para a rede rodoviária nacional, foi necessário caracterizar a fenomenologia do IRI em algumas secções da rede rodoviária nacional.

3.2 Base de dados do sistema de gestão de pavimentos da IP

Um Sistema de Gestão de Pavimentos é composto por todo o conjunto de atividades inter-relacionadas envolvidas no processo de dotar redes de estradas de pavimentos adequados. Essas atividades vão desde o planeamento e programação de investimentos, ao projeto, construção, conservação, avaliação e investigação [15], [33].

A base de dados associada ao Sistema de Gestão de Pavimentos da Infraestruturas de Portugal, da qual foram requisitadas as informações para este estudo, contém 2221 secções compreendendo cerca de 14000 km de extensão de estrada, dos quais 99% são constituídos por pavimentos flexíveis e os restantes por pavimentos rígidos [2].

A informação presente na base de dados está relacionada com a componente da auscultação dos pavimentos, que se apoia na definição dos segmentos de gestão da rede, fundamental para a referenciação da rede rodoviária pois, permite a localização de qualquer elemento da rede e a identificação do seu estado de conservação em qualquer instante, durante o período de vida dos pavimentos. Cada secção rodoviária, baseia-se numa estrutura vetorial constituída por arcos e nós ligados entre si e que se encontram devidamente georreferenciados (Modelo de Rede) [2], [9].

As definições adotadas pela IP para o modelo de rede são as seguintes [2], [9]:

- **Nó:** Objeto que permite definir o extremo de secções e segmentos de gestão: intersecções 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 rodoviária, considerado para efeito de recolha e análise de dados. Troços 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.

A base de dados da IP contém para cada secção da rede nacional rodoviária informações sobre [2]:

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

Os dados a considerar para a base de dados da IP estão apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 Dados para a descrição do estado do pavimento [2]

Designação	Tipos de dados
1. Histórico dos Pavimentos	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterização da estrutura do pavimento e respetiva fundação, incluindo, sempre que possível, os dados de projeto e construção, das intervenções de reabilitação, com indicação da idade de cada intervenção (estrutura nova e reabilitação); • Caracterização da geometria do perfil transversal (largura das vias de tráfego e bermas); • Dados relativos às eventuais auscultações efetuadas, incluindo as constantes da caracterização final dos pavimentos nas fases de receção provisória e da receção definitiva; • Se possível, dados sobre a sinistralidade;
2. Tráfego	<ul style="list-style-type: none"> • Tráfego médio diário anual e evolução previsível; • Tráfego médio diário anual de pesados e evolução previsível;
3. Estado Superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Fendilhamento longitudinal e transversal; • Fendilhamento tipo pele de crocodilo • Peladas, desagregações superficiais, exsudação do betume, polimento dos agregados, assentamento localizado; • Covas (ninhos); • Rodeiras; • Reparações; • Irregularidade longitudinal; • Aderência (coeficiente de atrito/textura superficial).

Os parâmetros do estado superficial são registados em inspeções visuais onde são identificados de acordo com diferentes níveis de gravidade, aos quais corresponde uma quantificação englobada no cálculo do IQ [2].

3.3 Análise estatística do valor do IRI na rede rodoviária nacional

Para a realização desta fase do trabalho, foram disponibilizados por parte da IP dados relativos a trezentas secções, extraídas da base de dados por ordem decrescente, as quais estão agrupadas em três classes (maior, intermédio e menor), conforme o IRI médio correspondentes ao ano de 2014. Na Figura 3.1 estão representados os três intervalos em que foram extraídos os dados do IRI (1-101, 501-601 e 1001-1101).

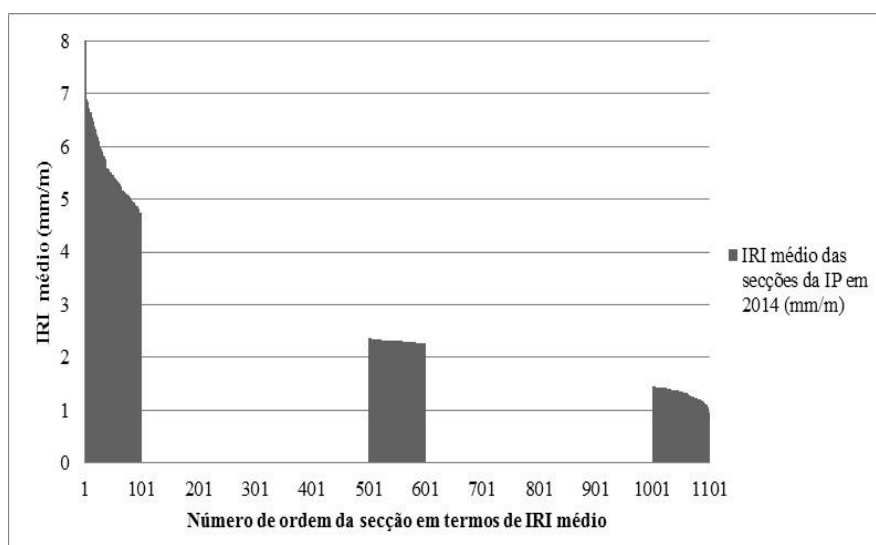


Figura 3.1 IRI médio das secções da IP em 2014

Através da Figura 3.1 observam-se três níveis de IRI médio, sendo estes:

- Nível menor de IRI médio (Número de ordem de secção da 1001 à 1101)

Constata-se que os valores do IRI, dentro de nível de IRI médio menor, apresentam uma variação pouco significativa. Observa-se, também, que os valores são, na maioria dos casos, iguais ou muito próximos da unidade. Este tipo de comportamento é característico de pavimentos recém-construídos, com uma boa manutenção ou de pavimentos de níveis de hierarquia superior que são projetados com especial atenção devido ao tráfego e às velocidades a que estão sujeitos.

- Nível intermédio de IRI médio (Número de ordem de secção da 501 à 601)

No nível intermédio de IRI médio, os valores do IRI apresentam aproximadamente o dobro dos apresentados no nível anterior, o que leva a concluir que os pavimentos, neste caso, apresentam uma idade mais avançada ou que os trabalhos de manutenção não estão a ser eficientes. Embora os valores dupliquem, verifica-se que estes mantêm-se sempre dentro de valores próximos e que as secções com este tipo de comportamento apresentam, normalmente, valores médios inferiores a 3 mm/m.

- Nível maior de IRI médio (Número de ordem de secção da 1 à 101)

De acordo com a Figura 3.1 é compreensível que os valores observados são muito inconstantes, apresentando secções com IRI muito elevado. Os pavimentos com este tipo de comportamento podem encontrar-se no final da sua vida útil, pertencer a níveis de hierárquicos de menor importância ou apresentar níveis elevados de outros fatores que contribuam para o aumento do IRI, os quais não são devidamente reabilitados nos trabalhos de manutenção.

Com base na informação disponibilizada, em termos de IRI, foram recolhidos todos os valores medidos em trechos de 100 m e procedeu-se à análise dos limites (máximo e mínimo), tendo-se obtido os valores descritos no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 Limites dos níveis de gravidade para os trechos de 100 m

Deformação	Nível de Gravidade	IRI Médio (mm/m)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	IRI Máximo (mm/m)	IRI Mínimo (mm/m)	Total de trechos de 100 m
IRI	Maior	5,56	1,57	0,28	12,14	1,06	6626
	Intermédio	2,32	0,63	0,27	7,37	0,86	6567
	Menor	1,32	0,40	0,30	5,55	0,61	7267
						Total	20460

De acordo com o Quadro 3.2 verifica-se que, no conjunto das trezentas secções disponibilizadas, existe um total de 20460 trechos de 100 m e que dentro dos diferentes níveis de IRI médio, o valor mínimo é de 0,61 mm/m e o valor máximo de 12,14 mm/m. Constata-se também que existe uma grande dispersão de valores, sendo que por exemplo no nível menor, o IRI médio apresenta um valor de 1,32 mm/m, no entanto existem trechos que atingem de IRI significativos de 5,55 mm/m, no nível intermédio o valor médio é de 2,32 mm/m, contudo existem trechos com IRI de 7,37 mm/m, o mesmo acontece no nível maior em que o IRI médio apresenta o valor de 5,56 mm/m, no entanto existem trechos com valor muito elevado de IRI de 12,14 mm/m.

De modo a analisar a relação entre os valores limites e os valores médios de IRI, ou seja, o IRI médio obtido de acordo com os valores presentes nos trechos de 100 m de cada secção, escolheram-se três secções de cada nível de IRI médio, de forma a ver se existe alguma correlação entre estes valores (ver Quadro 3.3).

Quadro 3.3 Relação entre os limites das secções avaliadas e o IRI médio correspondente

Secção	Nível de Gravidade	IRI Médio (mm/m)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	IRI Máximo (mm/m)	IRI Mínimo (mm/m)
A202	Maior	5,14	1,05	0,20	7,70	2,18
C393		5,39	0,74	0,14	8,26	3,87
F621		4,75	2,00	0,42	9,78	1,43
A192	Intermédio	2,35	0,88	0,37	4,40	1,18
D696		2,35	0,52	0,22	3,84	1,40
F597		2,33	0,47	0,20	4,14	1,19
A154	Menor	1,37	0,40	0,29	2,94	0,69
C646		1,33	0,27	0,22	2,17	0,74
F558		1,28	0,28	0,22	2,51	0,89

De acordo com o Quadro 3.3 verifica-se que neste caso a dispersão é menor entre os limites das secções representantes de cada nível, visto que é uma análise mais pontual de secção a secção, no entanto continua-se a observar alguma dispersão em relação ao valor médio.

Os gráficos seguintes (ver Figura 3.2 e Figura 3.3) mostram a relação entre o valor máximo e mínimo com o valor médio do IRI nas secções apresentadas no Quadro 3.3.

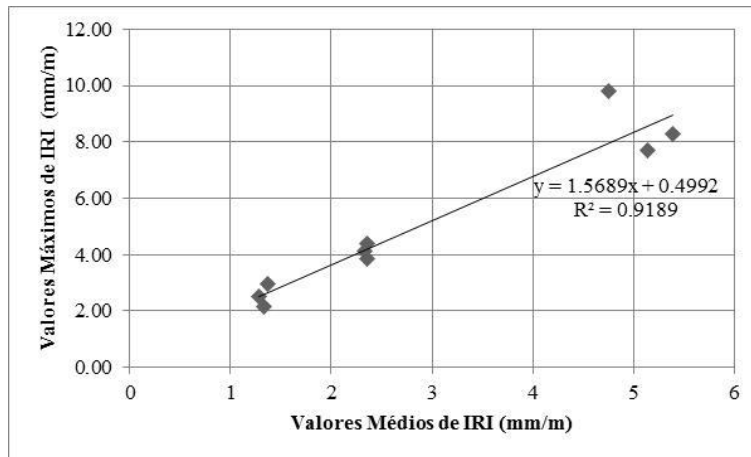


Figura 3.2 Relação entre os valores máximos e médios de IRI das secções em análise

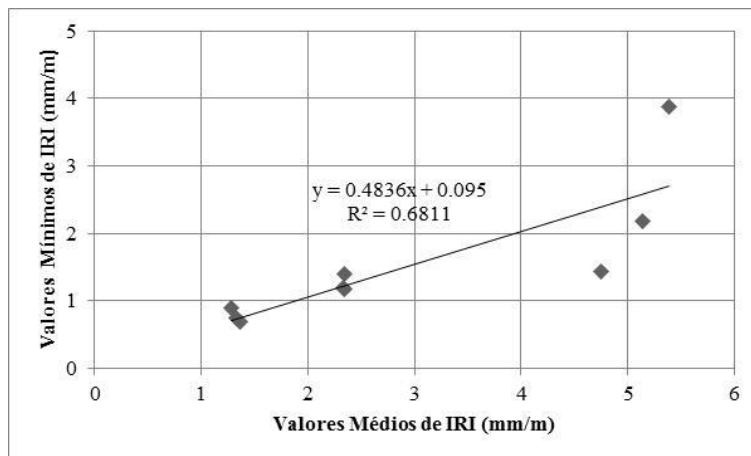


Figura 3.3 Relação entre os valores mínimos e médios de IRI das secções em análise

A correlação presente na Figura 3.2 ($R^2 \approx 0,92$) mostra que existe uma boa correlação entre os valores em análise. É também observável, na mesma figura, que em secções de nível menor e intermédio, o ajuste é melhor, comparativamente com o IRI pertencente à classe de maior gravidade. Assim, conclui-se que, neste último caso, existem fatores que contribuem para um aumento anormal da dispersão do valor do IRI.

Na Figura 3.3 observa-se que existe uma boa correlação entre os valores mínimos e médios de IRI ($R^2 \approx 0,68$). Nesta figura verifica-se também a ocorrência de um melhor ajuste dentro dos níveis de gravidade menor e intermédio, comparativamente com os de nível mais elevado, o que apoia as conclusões tiradas da Figura 3.1, onde se verificou que existe uma maior oscilação de valores de IRI dentro desta classe, sendo assim compreensível esta dispersão maior.

De seguida, analisou-se como é que os valores de IRI são distribuídos dentro das três classes anteriormente referidas e que relações existem entre o IRI, o fendilhamento e as rodeiras.

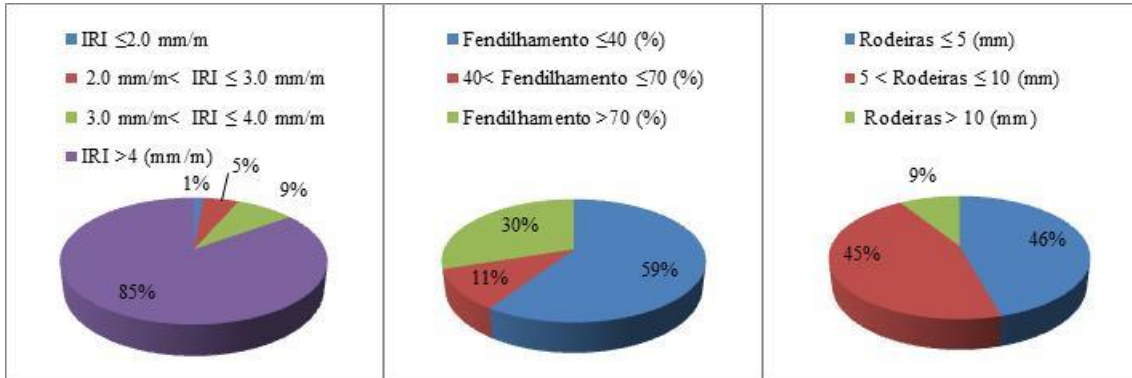


Figura 3.4 IRI, fendilhamento e rodeiras existente nos trechos de 100 m com gravidade maior

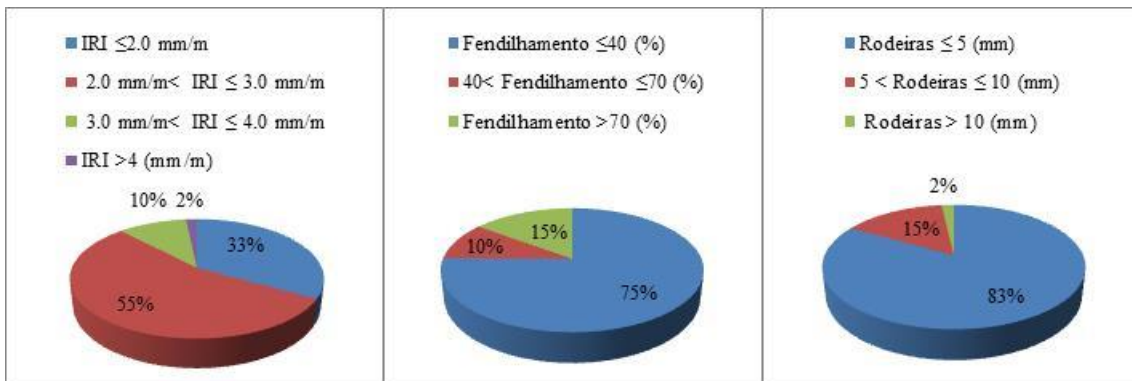


Figura 3.5 IRI, fendilhamento e rodeiras existente nos trechos de 100 m com gravidade intermédia

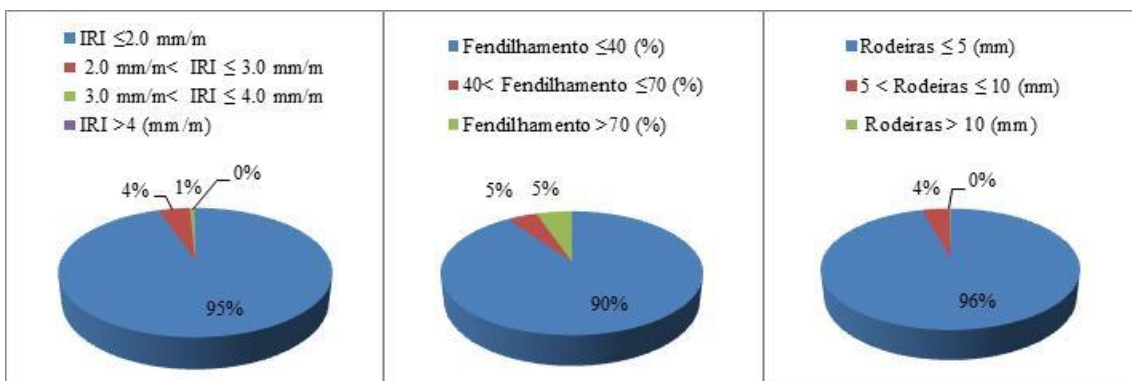


Figura 3.6 IRI, fendilhamento e rodeiras existente nos trechos de 100 m com gravidade menor

Os gráficos anteriores, ilustrados da Figura 3.4 à Figura 3.6, mostram que é possível identificar uma relação entre as degradações em análise, visto que conforme cada classe, existe uma evolução entre o IRI, o fendilhamento e as rodeiras para os intervalos mais gravosos desses fenómenos. Embora se observe esta relação, estes podem não ser os únicos fatores que contribuem para o aumento do IRI, nos trechos em análise pertencentes à rede rodoviária nacional.

3.4 Tipos de distribuição

Esta secção tem como objetivo verificar se os valores do IRI, dentro dos diferentes níveis de gravidade, seguem uma distribuição normal ou log-normal. Para tal, foram utilizados os valores de IRI de trechos de 100 m, pertencentes a seis secções da base de dados da IP, com diferentes níveis gravidade, de modo a realizarem-se gráficos do tipo Quantil-Quantil (Q-Q). As seis secções escolhidas estão apresentadas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 Secções para análise

Secção	Nível de Gravidade	Início (km)	Fim (km)
F403	Maior	107,25	115,14
F438	Maior	0,01	6,49
D497	Médio	80,40	92,06
D510	Médio	209,67	218,70
A240	Menor	122,35	139,78
A154	Menor	0,00	13,90

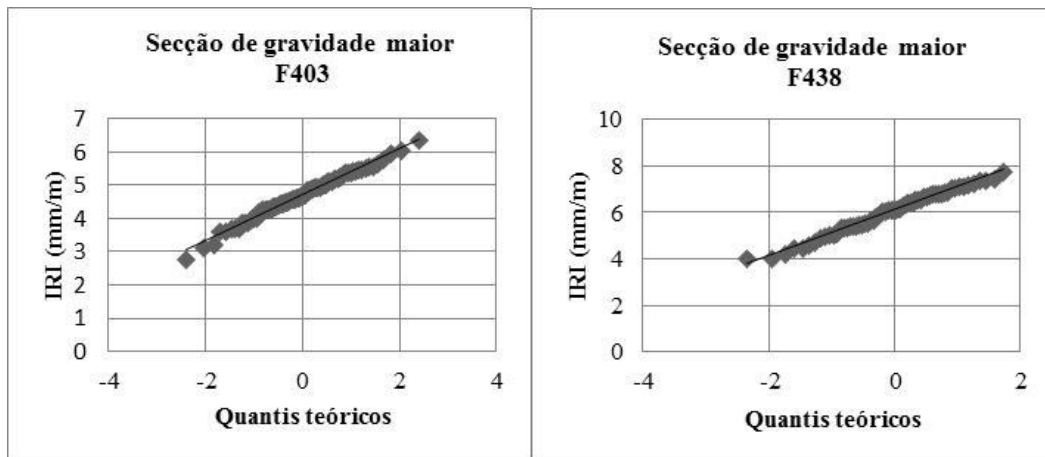


Figura 3.7 Q-Q com os valores de IRI das secções com gravidade maior

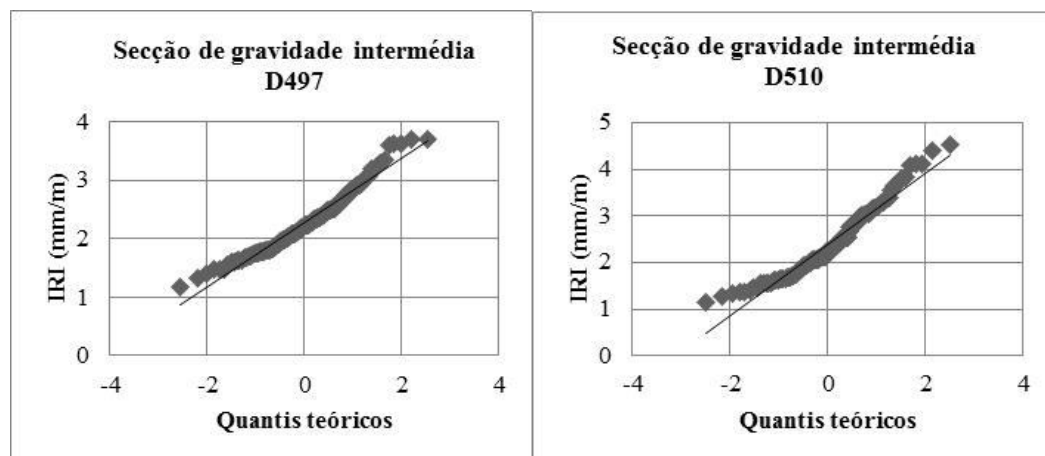


Figura 3.8 Q-Q com os valores de IRI das secções com gravidade intermédia

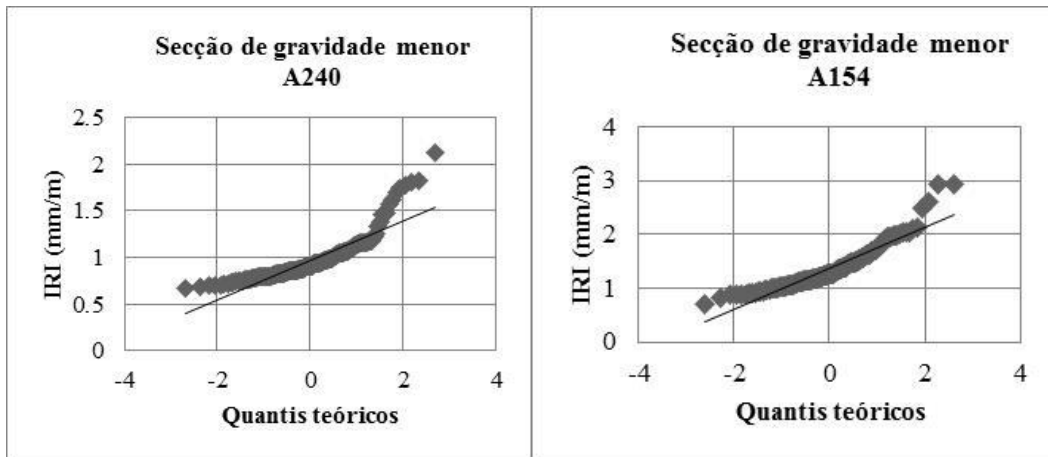


Figura 3.9 Q-Q com os valores de IRI das secções com gravidade menor

As Figura 3.7 à Figura 3.9 ilustram os gráficos Q-Q com os valores de IRI das secções em análise (ver Quadro 3.4). Observa-se na Figura 3.7 que os valores têm uma distribuição normal, pelo facto de estes aproximarem-se da linearidade e que na Figura 3.8 e Figura 3.9 os gráficos nestas ilustrados apresentam uma zona central linear e nas extremidades apresentam um ligeiro desvio no caso na Figura 3.8 e no caso da Figura 3.9 um desvio mais acentuado.

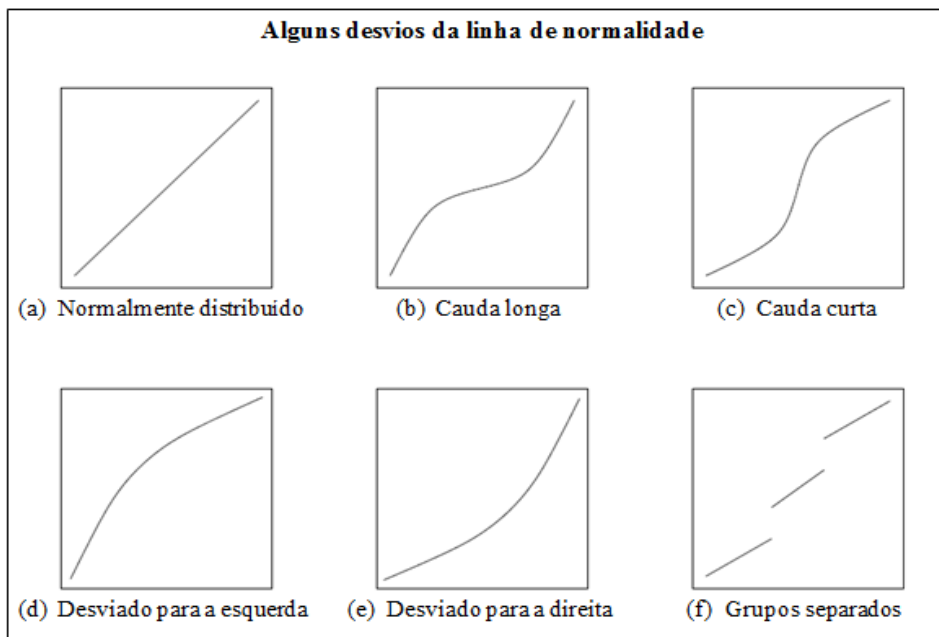


Figura 3.10 Alguns desvios da linha de normalidade (adaptado de [34])

Através desta análise e comparativamente com a Figura 3.10, observa-se que os valores de IRI presentes nas secções D497 e D510 apresentam um ligeiro desvio para a direita representado na Figura 3.10 em (e) e que nas secções A240 e A154 o desvio é mais acentuado.

Posteriormente, procurou-se fazer a mesma análise, mas com base no logaritmo neperiano (\ln) do IRI nas secções que cujos valores de IRI afastam-se da linearidade na zona correspondente às extremidades dos gráficos anteriormente apresentados (ver Figura 3.11 e Figura 3.12).

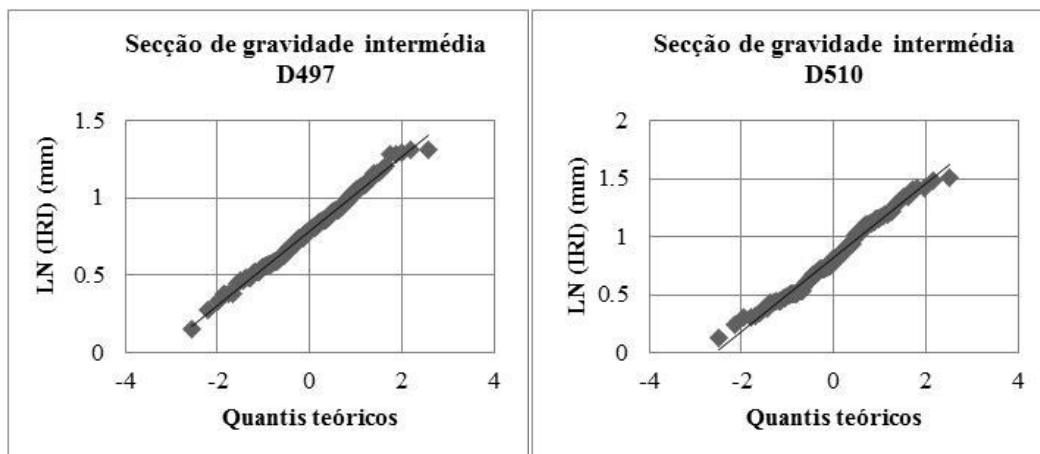


Figura 3.11 Q-Q com logaritmo neperiano (ln) do IRI de gravidade intermédia

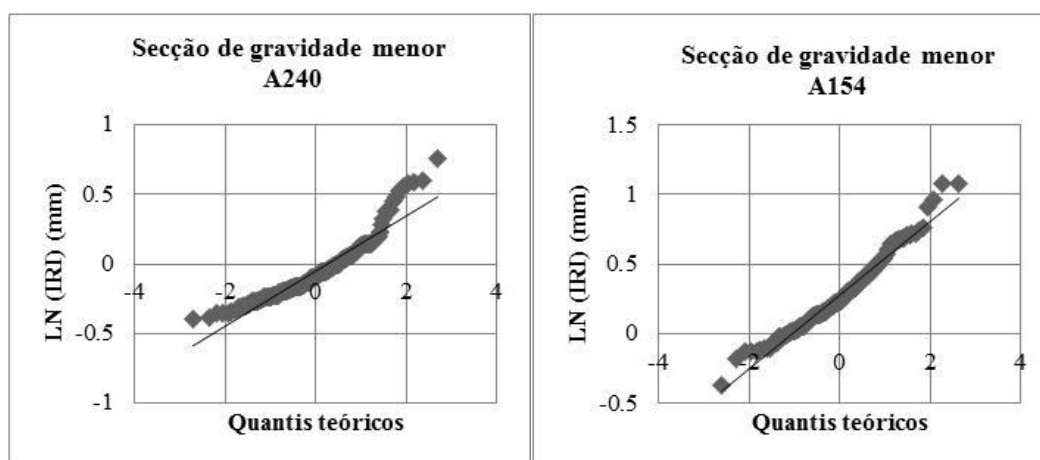


Figura 3.12 Q-Q com logaritmo neperiano (ln) do IRI de gravidade menor

De acordo com a Figura 3.11 verifica-se que neste caso existe uma boa correlação com o logaritmo neperiano do IRI, uma vez que se observa que os valores estão muito próximos da linearidade. Assim, o IRI, neste caso, obedece uma distribuição log-normal. Verifica-se que as secções A240 e A154 apresentam uma zona central próxima da linearidade e que apresentam problemas de desvio nas extremidades.

Através das análises feitas nesta secção concluiu-se que o IRI apresenta três tipos de comportamento de acordo com nível de IRI médio. O IRI não segue sempre o mesmo tipo de distribuição, sendo que para secções de nível de IRI médio maior estes apresentam uma distribuição mais próxima da normalidade ao contrário do que acontece nos níveis de IRI médio inferiores.

3.5 Programa de apoio ao modelo HDM-4

Nesta secção pretende-se dar a conhecer um pouco da estrutura do programa elaborado, que permitiu as análises feitas, relativamente ao valor do IRI e dos outros parâmetros presentes no modelo HDM-4.

O programa, denominado HDM_4_IRI, tem como base o modelo HDM-4, sendo-lhe fornecido as subrotinas necessárias para o cálculo do parâmetro IRI sendo estas:

- FENDILHAMENTO que permite estimar o tempo, em anos, até à iniciação do fendilhamento e a sua progressão;
- REFLEXÃO que estima o número de anos até ocorrer reflexão de fendas, este fenómeno acontece quando uma nova camada betuminosa é colocada sobre uma camada fendilhada e desta forma as fendas presentes na camada antiga propagam-se para a camada mais recente;
- RODEIRAS que prevê a profundidade das rodeiras no período de análise, sendo este parâmetro a soma de três componentes: deformação inicial, deformação estrutural e deformação plástica;
- DESAGREGAÇÃO que estima o número de anos até ao aparecimento de desagregação superficial, assim como a sua propagação;
- COVAS fornece o número de covas que aparecem durante o ano em análise devido ao fendilhamento e/ou à desagregação superficial.

Tabela 3.5 Subrotinas e variáveis de entrada do Programa HDM_4_IRI

Variáveis de entrada	Subrotina				
	Fendilhamento	Reflexão	Rodeiras	Desagregação	Covas
Periodo de análise	×	×	×	×	×
AGE 2	×	×		×	×
AGE 3			×		
AGE 4			×		
CDS	×		×	×	
CRP	×				
ACA					×
PACX		×			
TMDAp		×			
DEF		×	×		
HSNEW		×			
HSOLD			×		×
RD0			×		
RDS			×		
VIM			×		
Tipo de pavimento			×		
Sp			×		
MMP			×		×
Sh			×		
PT			×		
COMP			×		
YE4			×	×	×
RRF				×	
CDB					×
ARV				×	×

Legenda:

AGE 2 – Tempo que decorreu desde a colocação de uma nova camada de desgaste;

AGE 3 – Tempo que decorreu desde a última reabilitação;

AGE 4 – Tempo que decorreu desde a última reconstrução ou nova construção;

CDS – Defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento;

CRP – Atraso da progressão do fendilhamento;

ACA – Área de fendilhamento do ano em análise;

PACX – Área de fendilhamento inicialmente refletida;
 TMDAp – Tráfego médio de veículos pesados, por sentido e na via mais solicitada.
 DEF – Deflexão média anual da viga Benkelman;
 HSNEW – Espessura da camada mais recente existente em caso de intervenção;
 HSOLD – Espessura total das camadas betuminosas existentes antes de uma intervenção;
 RD0 – Cavado da rodeira por densificação inicial;
 RDS – Desvio padrão da profundidade média da rodeira;
 VIM – Vazios da mistura;
 Sp – Temperatura de amolecimento;
 Sh – Velocidade dos veículos pesados;
 PT – Temperatura do pavimento;
 COMP – Índice de compactação relativa dos solos;
 YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelo modelo HDM-4 (YE4)
 RRF – Fator que retarda o aparecimento da desagregação superficial;
 CDB – Defeitos de construção da camada de desgaste;
 ARV – Área de desagregação superficial do ano em análise.

A subrotina FENDILHAMENTO tem como variáveis de saída o valor inicial de fendilhamento, assim como a sua progressão.

Através da subrotina REFLEXÃO é possível calcular a área de fendilhamento, causada pela reflexão de fendas, no final do ano em análise.

Na subrotina RODEIRAS tem-se como variáveis de saída: o desvio padrão médio no final do ano em análise e a profundidade média da rodeira. O cálculo desta degradação encontra-se descrito de forma mais detalhada no ANEXO A.

Na subrotina DESAGREGAÇÃO calcula-se a área afetada pela desagregação superficial no final do ano em análise, assim como a sua progressão.

A subrotina COVAS permite calcular o número previsto de covas no final do ano em análise.

Após os cálculos realizados por estas subrotinas, na subrotina IRI é possível calcular o valor do IRI no final do ano em análise, sendo este valor conseguido de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 2.10.

A Figura 3.13 ilustra esquematicamente o programa HDM_4_IRI.

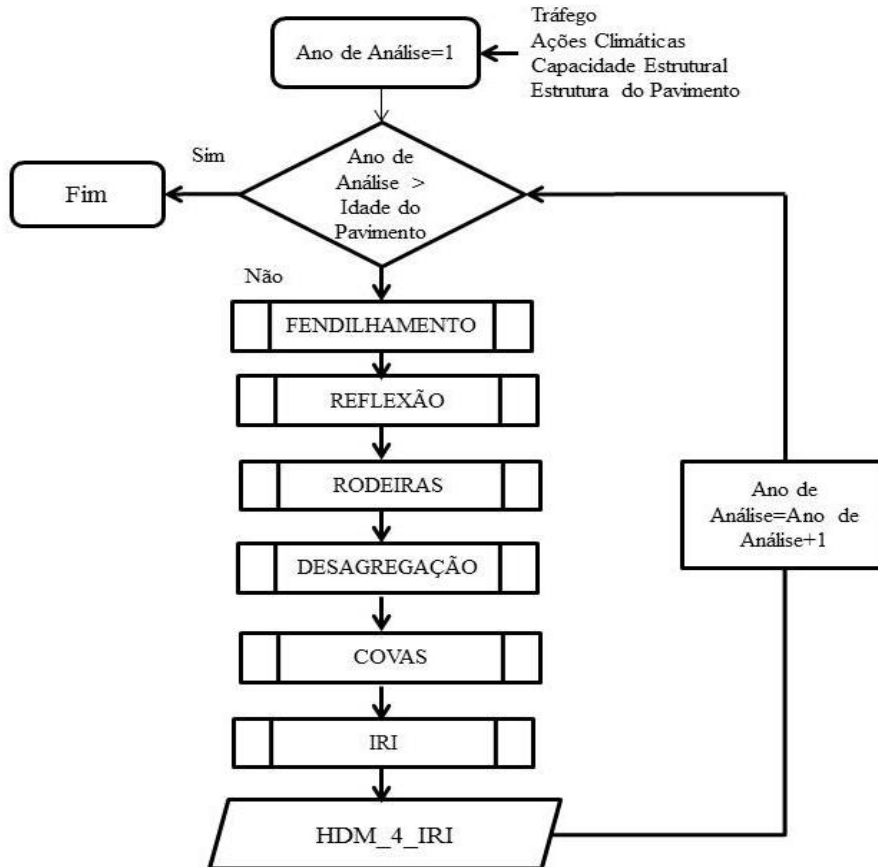


Figura 3.13 Fluxograma do programa HDM_4_IRI

A leitura das variáveis de entrada é feita através de um ficheiro denominado “dados”. A Figura 3.14 mostra um exemplo desse ficheiro.

SNC	CBR	TMDA	TMDAP	TXCRES	F.Agre	HSOLD	HSNEW	ano1	ano2	ano3	ano4	anof	anor	sec	ICA	rep	F1	R1	I1
6.06	6	6000	1150	4	5	0.23	0	2000	2000	2000	2000	2014	0	1	0	0	63	7.42	1.69

Figura 3.14 Ficheiro de dados

No ficheiro “dados” encontram-se várias colunas com diferentes funções, sendo que as primeiras seis correspondem ao histórico da secção em estudo, onde é preciso completar os valores do número estrutural modificado (SNC), do índice de capacidade de carga (CBR), do tráfego médio diário anual (TMDA), tráfego médio diário anual de veículos pesados (TMDAp), da taxa de crescimento (TXCRES) e do fator de agressividade (F.Agre). As duas colunas seguintes dizem respeito à estrutura do pavimento, sendo o HSOLD a variável que corresponde à espessura das camadas betuminosas e o HSNEW a espessura de uma nova camada, em caso ocorrência de trabalhos de manutenção/reabilitação.

Posteriormente, o ano1, ano2, ano3 e ano4 representam tempo que decorreu desde a construção ou última reabilitação do pavimento, sendo dividido em quatro classes, de acordo com o tipo de intervenção que foi feita.

O ano r é a variável que, em caso de existência de uma intervenção, representa o período de tempo entre o ano da reparação até ao final do ano em análise.

A variável sec representa o número de secções em estudo, tendo neste caso o valor de 1, porque neste exemplo só está a ser feita análise de uma secção.

O ICA representa o intervalo de tempo até ao início do fendilhamento, sendo que este parâmetro pode ser calculado de diferentes formas segundo o modelo HDM-4, neste trabalho consideraram-se três formas distintas para o cálculo do ICA, tal como descrito no Anexo B. Este valor no programa varia de 0 a 2 (em que 0 – corresponde a uma secção original; 1 – uma secção onde foi realizada uma intervenção com sobreposição de camada betuminosa; 2 – secção onde foi feito um tratamento superficial).

A variável rep pode ter o valor de 0 a 2 (em que 0 – não houve reparação na secção em estudo; 1 – houve uma reparação; 2 – houve mais do que uma reparação).

Os dados seguintes são colocados para a comparação dos valores calculados com os valores medidos pela IP, sendo que: F1 corresponde ao fendilhamento medido em 2011; R1 representa a profundidade média das rodeiras em 2011 e I1 é o valor do IRI medido em 2011.

O programa HDM_4_IRI, representado na Figura 3.15, através do ficheiro dados e das subrotinas anteriormente referidas faz a previsão do valor do IRI.

```

1
2   %Programa de Apoio ao Modelo HDM-4
3
4   %Importação do ficheiros "dados"
5   dados= importdata('dados.txt');
6   n=size(dados.data,1);
7
8   %Programa HDM_4_IRI
9
10  for i=1:n
11     ano1=dados.data(i,9); %Tempo que decorreu desde a última construção ou reabilitação do pavimento
12     ano2=dados.data(i,10);
13     ano3=dados.data(i,11);
14     ano4=dados.data(i,12);
15     anoF=dados.data(i,13);
16     fendilhamento % subrotina FENDILHAMENTO
17     if or(dados.data(i,17)==1,dados.data(i,17)==2) %só entra se houver reparação, 0 sem reparação, 1 uma reparação e 2 reparações
18         reflexao % subrotina REFLEXÃO
19     end
20     rodeiras % subrotina RODEIRAS
21     ravelling % subrotina DESAGREGAÇÃO
22     pothole % subrotina COVAS
23     IRI %subrotina IRI
24 end
    
```

Figura 3.15 Programa HDM_4_IRI

A evolução da irregularidade longitudinal depende de várias componentes. Em seguida, vão se analisar estes parâmetros individualmente, de modo a verificar o seu efeito sobre o valor do IRI através de uma análise paramétrica.

3.6 Análise paramétrica

A avaliação dos parâmetros utilizados no modelo HDM-4 foi feita recorrendo ao programa HDM_4_IRI para criar os gráficos apresentados neste subcapítulo. Pelo facto de o modelo não especificar o valor inicial do IRI, para esta análise paramétrica foi admitido um valor inicial igual a um.

Nesta fase do trabalho pretendeu-se avaliar de que forma cada parâmetro utilizado no modelo HDM-4 influencia o valor do IRI, para os pavimentos mais representativos da rede rodoviária nacional. Esses parâmetros são os seguintes:

- Número estrutural modificado do pavimento;
- Tráfego;
- Temperatura;
- Teor em água;
- Compactação relativa;
- Componentes do IRI.

3.6.1 Capacidade estrutural

A capacidade estrutural representa a adequação de uma estrutura a um tráfego, desta forma é natural que o aumento do tráfego corresponda ao aumento do SNC. A expressão que determina o valor do SNC de um pavimento encontra-se no Anexo C.

O tráfego é definido através do conceito de número equivalente de eixo-padrão (ESAL), que para pavimentos flexíveis, o Manual de Conceção de Pavimentos (MACOPAV), da Junta Autónoma de Estradas, adota eixos padrão de 80 kN. Para dimensionamento de pavimentos rodoviários, considera-se apenas o efeito do tráfego de veículos pesados, uma vez que são este tipo de veículos que condicionam o aparecimento de degradações. De acordo com o MACOPAV, um pavimento flexível deve assegurar condições aceitáveis de serviço para um período de 20 anos [9], [35].

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

$$N_{80y} = 365 \times TMDAp \times C \times \alpha \times p \quad (3.1)$$

em que:

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

$TMDAp$ – Tráfego médio diário anual de veículos pesados, por sentido e na via mais solicitada;

α – Fator de agressividade do tráfego;

p – Período de dimensionamento (anos);

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

$$C = \frac{(1 + t)^p - 1}{p \times t} \tag{3.2}$$

em que:

t – Taxa média de crescimento anual de tráfego pesado;

p – Período de dimensionamento (anos).

No Quadro 3.6 indicam-se as classes de tráfego e os respectivos fatores de agressividade, considerados para pavimentos flexíveis, de acordo com o MACOPAV.

Quadro 3.6 Classes de tráfego e fatores de agressividade no MACOPAV [35]

Classe de Tráfego	TMDAp	Fator de agressividade (α)
		Eixo-padrão de 80 kN
T6	50-150	2
T5	150-300	3
T4	300-500	4
T3	500-800	4,5
T2	800-1200	5
T1	1200-2000	5.5

Legenda:

TMDAp – Tráfego médio de veículos pesados, por sentido e na via mais solicitada.

No gráfico apresentado na Figura 3.16 selecionaram-se três valores de diferentes de SNC para dois valores de tráfego diferentes (TMDAp) para determinar a influência que a variação do SNC e do tráfego tem no valor do IRI. O valor do TMDAp é convertido, no programa HDM_4_IRI, em YE4 que corresponde ao tráfego em (MESAL), ou seja, milhões de passagens de um eixo padrão por ano (80kN).

No Quadro 3.7 apresentam-se os parâmetros utilizados que permitiram avaliar a variação do IRI em função do SNC e do tráfego.

Quadro 3.7 Parâmetros utilizados para avaliar a variação do SNC e do TMDAp [9]

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	TMDAp	α	Estrutura	COMP (%)	Consideração de outras deformações
						SNC		
1	17,2	0,16	35/50	150	3	6	100	Sim
2						4		
3						2		
4				300		6		
5						4		
6						2		

Legenda:

PT – Temperatura do pavimento a 20 mm de profundidade;

MMP – Precipitação média mensal;

TMDAp – Tráfego médio de veículos pesados, por sentido e na via mais solicitada;

SNC – Número estrutural modificado;

COMP – Índice de compactação relativa dos solos;

α – Fator de agressividade.

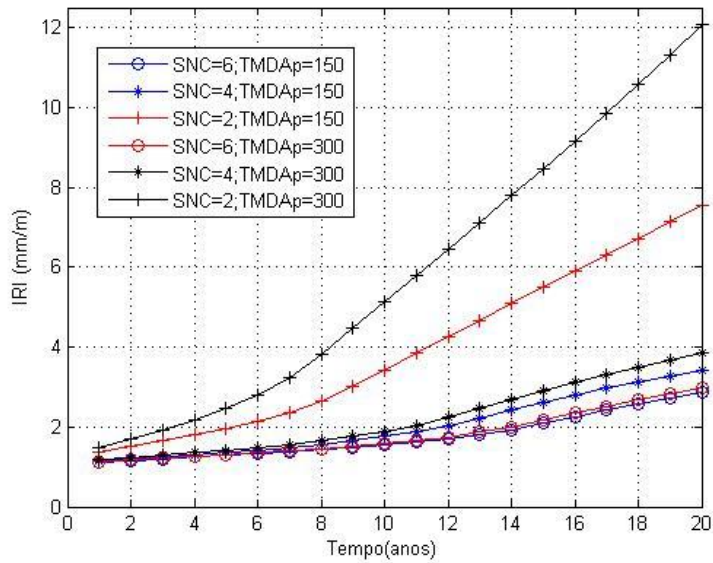


Figura 3.16 Influência da variação da capacidade estrutural do pavimento no IRI

Através da análise do gráfico, ilustrado na Figura 3.16, observa-se que o SNC é um parâmetro importante no modelo HDM-4, não tendo um grande peso no primeiro ano do pavimento, mas tendo grande influência na fase de progressão da deformação (anos seguintes). O SNC representa a capacidade estrutural do pavimento, desta forma faz sentido que menores valores de SNC apresentem maiores deformações, conforme o aumento do tráfego. É também observável que esta relação é mais significativa para valores de SNC inferiores a 4.

As cargas provocadas pelo tráfego geram degradações, como o fendilhamento e rodeiras, que por sua vez contribuem para o aumento da irregularidade [7]. Assim o valor do tráfego é um parâmetro bastante importante na fase de progressão do IRI, sendo assim um parâmetro a considerar no modelo HDM-4.

Deve-se ter em conta os parâmetros referidos neste subcapítulo, visto que influenciam significativamente o bom funcionamento do pavimento e desta forma deve-se fazer o dimensionamento das camadas da estrutura do pavimento, de modo a suportarem as cargas a que o pavimento estará sujeito.

3.6.2 Condições climáticas

Nos pavimentos flexíveis, a temperatura tem como consequência a perda das características fundamentais para o bom desempenho do pavimento para que foram dimensionados [1].

No modelo HDM-4 a temperatura é um dos parâmetros variáveis e deste modo diferentes temperaturas podem corresponder a diferentes valores de irregularidade. De forma a saber o impacto da ação da temperatura neste modelo, é necessário proceder ao cálculo da temperatura do pavimento.

Para este exercício foi determinada, em primeiro lugar, a temperatura do ar, para depois através do ábaco representado na Figura 3.18 chegar-se à temperatura do pavimento tendo-se a espessura da camada de desgaste igual a 40 mm.

Para esta análise foram consideradas duas temperaturas distintas observáveis em Portugal Continental, retirados da Figura 3.17, sendo estas o valor mínimo de temperatura média anual do ar de 5,4°C e o valor máximo de temperatura média anual de 18°C.

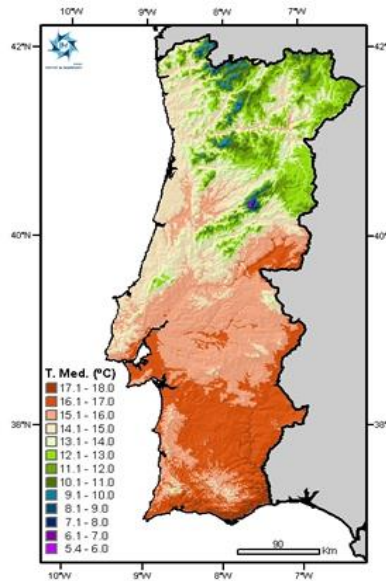


Figura 3.17 Temperaturas médias anuais [36]

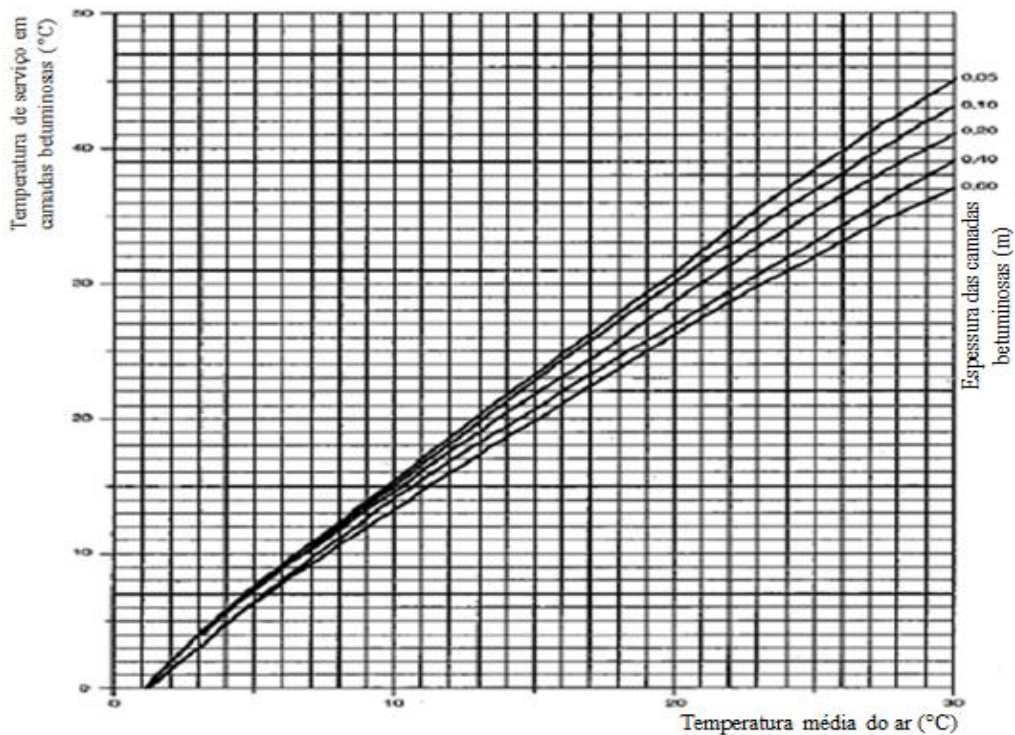


Figura 3.18 Temperatura de serviço das camadas betuminosas (adaptado de [37])

Através do ábaco da Figura 3.18 obtêm-se as seguintes temperaturas do pavimento:

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

No Quadro 3.8 encontram-se os parâmetros que permitiram avaliar a influência da variação da temperatura do pavimento no valor do IRI.

Quadro 3.8 Parâmetros utilizados para avaliar a variação da temperatura

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	TMDAp	Estrutura						COMP (%)	Consideração de outras deformações
					a			d	CBR (%)	SNC		
					BD	MB	SbG	SbG				
1	7,5	0,16	35/50	150	0,44	0,34	0,11	1	20	5,13	100	Sim
2	26,9											
3	45											

Legenda:

- PT – Temperatura do pavimento a 20 mm de profundidade;
- MMP – Precipitação média mensal;
- TMDAp – Tráfego médio de veículos pesados, por sentido e na via mais solicitada;
- a – Coeficiente estrutural;
- d – Coeficiente de drenagem;
- BD – Betão betuminoso em camada de desgaste;
- MB – Macadame betuminoso de ligação e base;
- SbG – Agregado britado de granulometria extensa em camada sub- base;
- CBR – Índice Californiano de capacidade de carga (*California Bearing Ratio*);
- SNC – Número estrutural modificado;
- COMP – Índice de compactação relativa dos solos.

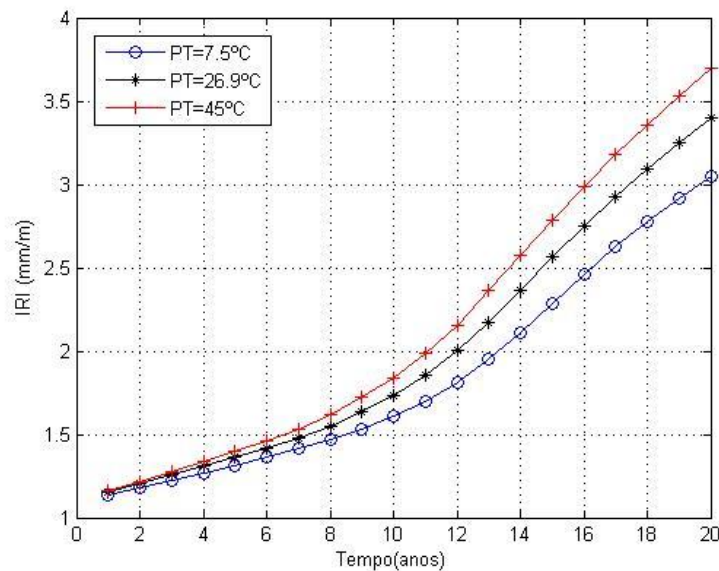


Figura 3.19 Influência da temperatura do pavimento (PT) no IRI

De acordo com o representado na Figura 3.19, observa-se que a temperatura é um parâmetro que influencia o valor do IRI, sendo que quanto maior for a temperatura do pavimento, maior é o valor do IRI.

A nível nacional, os pavimentos não atingem valores de temperaturas na ordem dos 45°C durante longos períodos de tempo, no entanto avaliou-se também o comportamento do pavimento nessa gama de temperaturas, onde se

concluiu que embora ocorra o aumento do valor do IRI, este não é proporcional ao aumento da temperatura. Sendo assim, a temperatura tem um peso menor para a alteração do valor do IRI, comparativamente com os parâmetros abordados anteriormente no subcapítulo relativo à capacidade estrutural do pavimento.

O teor em água corresponde a outro parâmetro variável no modelo HDM-4, desta forma é necessário ver de que modo este influencia o valor do IRI.

No modelo HDM-4, o teor em água é representado através:

- Precipitação;
- Eficiência do sistema de drenagem.

Para avaliar a influência da precipitação no modelo HDM-4, selecionaram-se três valores distintos de precipitação, tendo estes sido escolhidos com base na Figura 3.20.

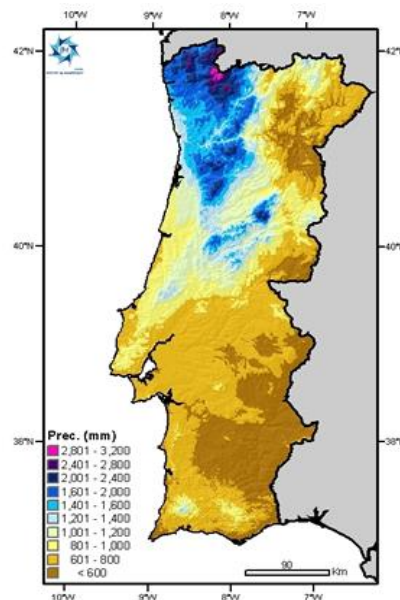


Figura 3.20 Precipitação acumulada anual [36]

Os valores retirados da Figura 3.20 foram:

- Precipitação elevada= 3200mm = 0,27m/mês;
- Precipitação média= 1900mm = 0,16m/mês;
- Precipitação baixa= 600 mm = 0,05m/mês.

A qualidade do sistema de drenagem e o tempo a que o pavimento está exposto à precipitação é refletido no modelo HDM-4 através dos valores dos coeficientes de drenagem das camadas granulares.

Quadro 3.9 Valores recomendados para o coeficiente de drenagem (d) para as camadas de base e sub-base não tratadas em pavimentos flexíveis (adaptado de [38])

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	1,20
Bom	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Médio	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muito Pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Tendo em conta a informação do Quadro 3.9, consideraram-se seis situações, de modo a entender o efeito do sistema de drenagem e do tempo a que o pavimento está exposto à precipitação no valor do IRI. As seis situações selecionadas estão descritas no Quadro 3.10.

Quadro 3.10 Descrição das seis situações consideradas

Sistema de Drenagem			
Situação	Eficiência	Tempo de exposição a teores de humidade próximos ao de saturação (%)	Coefficiente de drenagem (d)
1	Muito Bom	> 25 %	1,20
2	Muito Pobre	> 25%	0,40
3	Muito Bom	5 – 25 %	1,30
4	Muito Pobre	5 – 25%	0,75
5	Muito Bom	1 – 5%	1,35
6	Muito Pobre	1 – 5%	1,00

No Quadro 3.11 encontram-se os parâmetros utilizados em cada uma das situações consideradas e apresentadas no Quadro 3.10 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, no valor do IRI. A influência dessas seis situações diferentes no valor do IRI encontra-se representada na Figura 3.21.

Quadro 3.11 Parâmetros utilizados para avaliar a variação da precipitação

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	TMDAp	Estrutura					COMP (%)	Consideração de outras deformações	
					a			d	CBR (%)			SNC
					BD	MB	SbG	SbG				
1	17,2	0,27	35/50	150	0,44	0,34	0,11	1,20	20	5,31	100	Sim
2		0,27						0,40		4,61		
3		0,16						1,30		5,39		
4		0,16						0,75		4,92		
5		0,05						1,35		5,44		
6		0,05						1,00		5,13		

Nota: Simbologia idêntica ao Quadro 3.7.

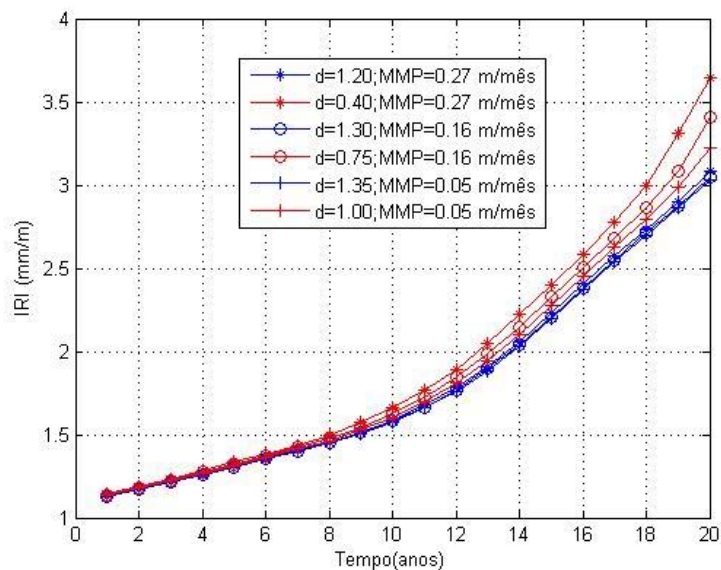


Figura 3.21 Influência da variação da precipitação (MMP) no IRI em função do coeficiente de drenagem (d)

Na Figura 3.21 observa-se que o teor em água não tem grande influência no valor do IRI. Contudo, é importante referir que não existe fendilhamento aberto nos pavimentos em estudo nos primeiros onze anos e que a partir dessa altura o valor do IRI aumenta de forma significativa, pois a água infiltra-se no pavimento através das fendas e esta agrava o valor das rodeiras, que por sua vez, agrava o valor do IRI. Consta-se, através da mesma figura, que o entre o sistema de drenagem e o tempo a que o pavimento está exposto à precipitação, o parâmetro que mais influencia o valor do IRI é o primeiro uma vez que, para sistemas mais eficientes, representados a azul, observam-se valores de IRI mais reduzidos independentemente da precipitação e que para sistemas pouco eficientes ocorrem IRI mais elevados proporcionais ao aumento da precipitação. Assim, é importante referir que é necessário garantir que os pavimentos tenham um bom sistema de drenagem, independentemente do tempo a que estão expostos à precipitação.

3.6.3 Compactação relativa

A compactação relativa de um solo influencia:

- O aumento da coesão e do atrito interno dos solos, de forma a garantir um aumento da resistência ao corte e a uma maior capacidade de suporte;
- A redução das variações volumétricas resultantes da ação de cargas e da ação água;
- A impermeabilização dos solos, garantida pela redução do coeficiente de permeabilidade [39].

No Quadro 3.12 estão indicados os parâmetros utilizados para esta análise, de forma a obter o gráfico da Figura 3.22.

Quadro 3.12 Parâmetros utilizados para avaliar a influência da compactação relativa no valor do IRI

Situação	PT (°C)	MMP (m/mês)	Tipo de betume	TMDAp	Estrutura						COMP (%)	Consideração de outras deformações	
					a			d		CBR (%)			SNC
					BD	MB	SbG	SbG					
1	17,2	0,16	35/50	150	0,44	0,34	0,11	1	20	5,13	100	Sim	
2											95		
3											90		

Nota: Simbologia idêntica ao Quadro 3.7.

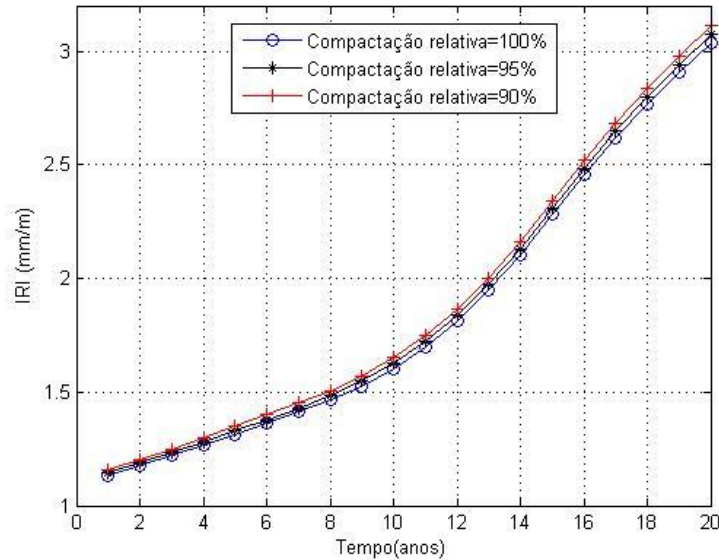


Figura 3.22 Influência da variação da compactação no valor do IRI

A Figura 3.22 mostra que para valores distintos de compactação, não existe grande mudança a nível do valor do IRI. Contudo, observa-se que valores de compactação menores, apresentam valores maiores de IRI, pelo que deve garantir-se, sempre que possível, a compactação relativa máxima.

3.6.4 Componentes do IRI

As degradações surgem nos pavimentos rodoviários de forma iterativa. O IRI resulta da contribuição de cinco componentes, sendo estas:

- Efeitos ambientais;
- Efeitos estruturais;
- Contribuição das rodeiras;
- Contribuição do fendilhamento;
- Contribuição das covas.

A influência das rodeiras, assim como a do fendilhamento no valor do IRI já foi analisada no presente trabalho. Foi referida a existência da possibilidade de haver outros fatores que contribuam o aumento do IRI. Desta forma,

tendo em conta a Equação (2.14), criou-se o gráfico da Figura 3.23, de modo a analisar o peso de cada uma das componentes do IRI, sendo que neste caso considerou-se que não foram realizados quaisquer trabalhos de manutenção.

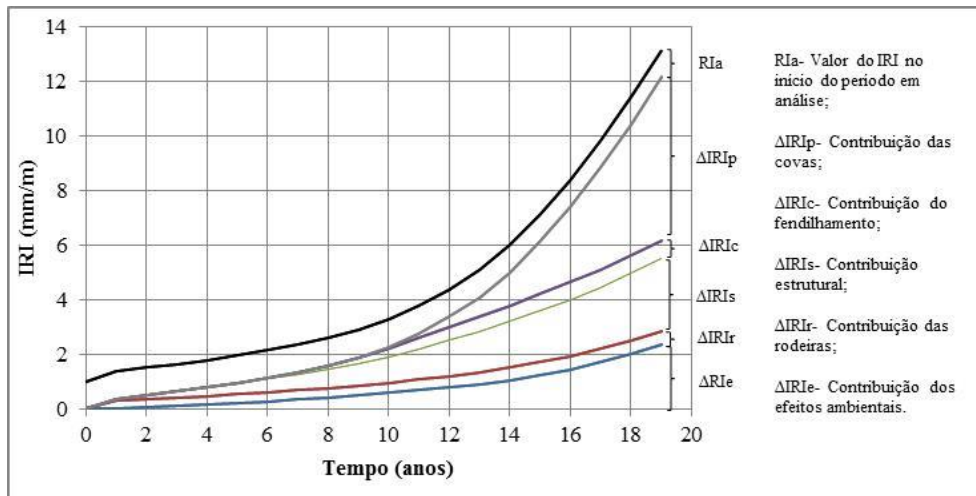


Figura 3.23 Contribuição das diferentes componentes do IRI, considerando que não ocorre manutenção

Através da análise da Figura 3.23 verifica-se que a componente representativa da contribuição das covas ($\Delta IRIp$) tem um peso significativo no valor do IRI quando atinge um elevado estado de degradação. As covas são cavidades localizadas na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores. Esta componente resulta da evolução outras degradações, em particular do fendilhamento, sendo que este aumento significativo da sua contribuição a partir dos onze anos pode ser resultante de um nível de fendilhamento elevado ou de problemas a nível da qualidade dos materiais da camada de desgaste. A presença de covas leva a perda de capacidade suporte, assim este fenómeno tem consequências tanto a nível das condições de circulação, como na capacidade estrutural de um pavimento.

De seguida, fez-se a mesma análise, porém considerando que foram realizados trabalhos de manutenção, de forma a verificar a importância destes nas componentes do IRI.

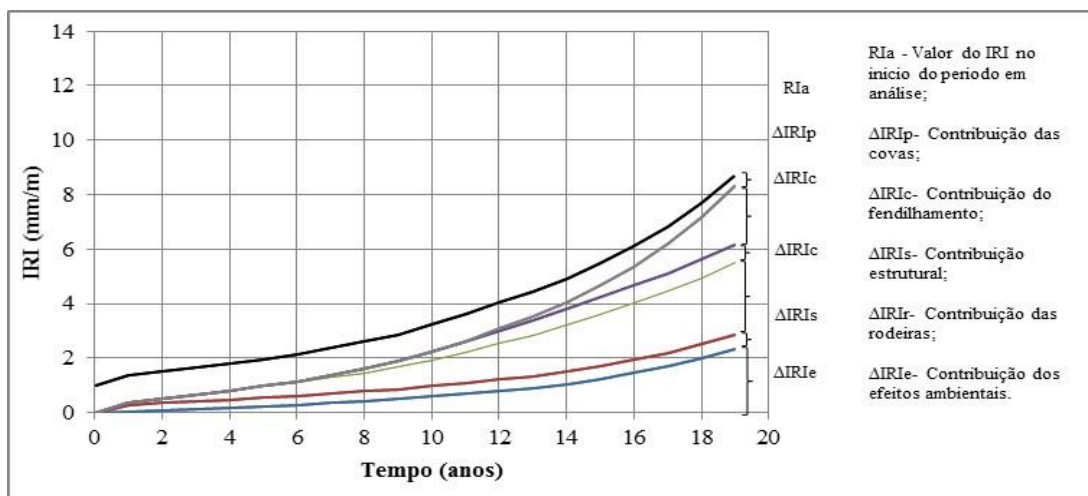


Figura 3.24 Contribuição das diferentes componentes do IRI, considerando que ocorre manutenção

De acordo com o gráfico da Figura 3.24 verifica-se que com a ocorrência de trabalhos de manutenção existe a diminuição do valor do IRI. Observa-se, também, que a contribuição das covas é significativamente reduzida. Assim, concluiu-se que esta parcela tem um grande peso no valor do IRI quando atinge um estado de degradação avançado e que desta forma deve ser devidamente controlada, através de medições precisas, de modo a que sejam mantidos os valores de IRI considerados como admissíveis.

Capítulo 4

4 Calibração do modelo HDM-4 para a rede rodoviária nacional

4.1 Dados fornecidos pela IP

Após a avaliação dos parâmetros utilizados no modelo HDM-4 na análise paramétrica apresentada anteriormente, de modo a criar um modelo de previsão de IRI optou-se nesta fase do trabalho em usar as mesmas secções escolhidas anteriormente por [9], visto que foi feita uma pré-validação dos dados disponibilizados e que estas são representativas de todo o país.

Para cada uma destas secções foram fornecidos pela IP os seguintes dados:

- Localização da secção;
- Caracterização da fundação através do valor do CBR (em %);
- Tráfego médio diário anual (TMDA), tráfego médio diário anual dos veículos pesados (TMDAp);
- 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;
- Fendilhamento, rodeiras, irregularidade longitudinal das campanhas de 2011 a 2014.

4.2 Critérios de seleção das secções

Para o caso de estudo foram utilizadas trinta secções existentes na base de dados da IP, tendo como principal intuito representarem o IRI a nível do território nacional. A Figura 4.1 mostra no mapa de Portugal Continental, de que distritos foram retiradas as secções em estudo, sendo que se tentou fazer uma escolha de forma a englobar o máximo de pontos distintos do território nacional.

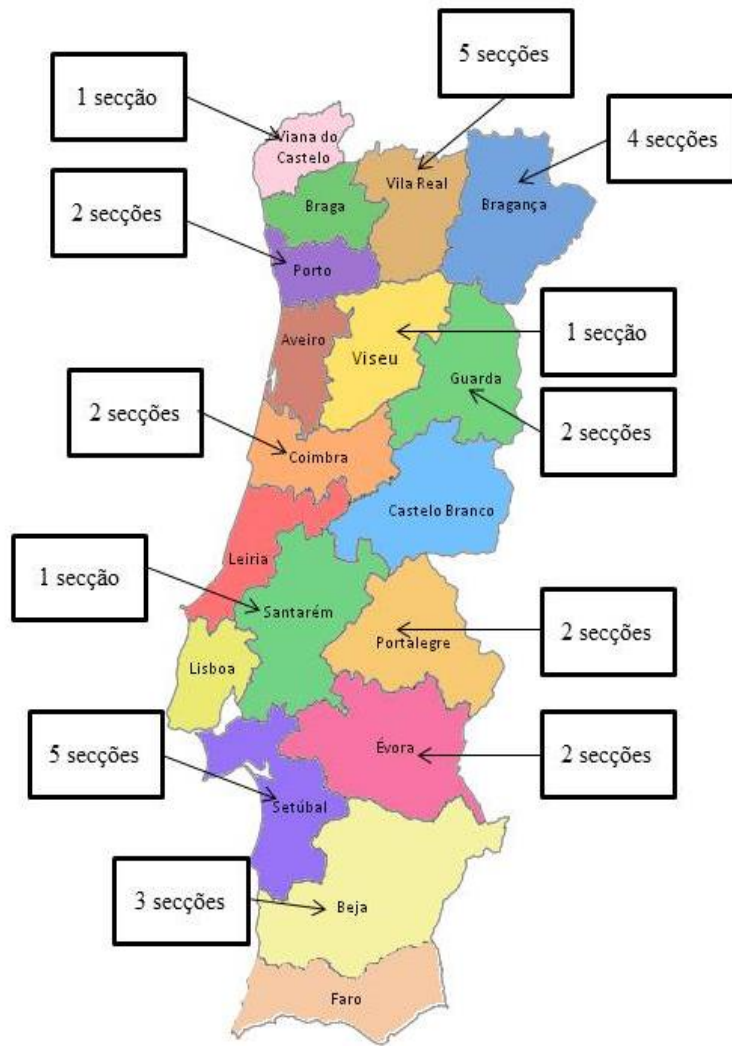


Figura 4.1 Mapa de Portugal Continental com a localização das secções escolhidas [40]

4.3 Análise das secções

Nesta fase do trabalho foi feito um estudo com o objetivo de comparar os valores de IRI presentes nas trintas secções, selecionadas para a aplicação do modelo HDM-4 na previsão do valor do IRI para pavimentos rodoviários da rede nacional, com uma amostra maior de secções representativas do território nacional. Para tal, adotou-se o conjunto de trezentas secções, disponibilizadas anteriormente pela IP, para o estudo da análise estatística do IRI. Ao conjunto de trinta secções foi atribuído o nome de “Amostra 1” e ao conjunto de trezentas secções de “Amostra 2”.

No gráfico ilustrado na Figura 4.2 encontram-se os valores de IRI presentes nos trechos de 100 m da Amostra 1.

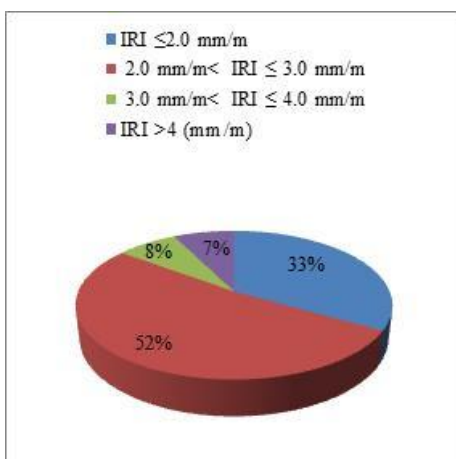


Figura 4.2 Representação gráfica do IRI para a Amostra 1

No gráfico ilustrado na Figura 4.3 estão representados os valores de IRI presentes nos trechos de 100 m da Amostra 2.

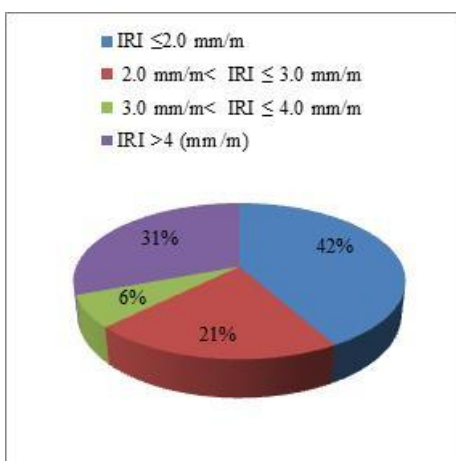


Figura 4.3 Representação gráfica do IRI da Amostra 2

Observa-se que na Figura 4.2 a maioria do IRI da Amostra 1 apresentam valores iguais ou inferiores a 3 mm/m (85% dos valores). De acordo com os intervalos definidos na análise estatística do valor do IRI (subcapítulo 3.3), verifica-se que estes valores encontram-se dentro das classes de IRI definidas como menor e intermédia.

Comparando com a Amostra 2 ilustrada no gráfico da Figura 4.3 verifica-se que 63% dos valores encontram-se nas mesmas classes. Desta forma, concluiu-se que a nível do território nacional existe um conjunto significativo de trechos de 100 m com IRI abaixo de 3 mm/m.

Em relação à classe definida anteriormente com maior gravidade, na Amostra 1 encontram-se 15% dos valores em análise, onde 7% destes apresentam um IRI superior a 4 mm/m, sendo importante referir que o valor máximo presente nesse grupo é de 10,92 mm/m. Relativamente à Amostra 2, nesta classe estão 37% dos valores, onde 31% são superiores a 4 mm/m, o que é uma diferença significativa comparando com o primeiro caso, sendo que é

importante verificar que fatores contribuem para esta diferença tão acentuada. Ao comparar as duas amostras, verifica-se que parte dos valores pertencentes aos intervalos extremos na Amostra 2, passam a ser englobados nos valores médios da Amostra 1.

Com base na área de fendilhamento (em %) existentes em cada amostra em seguida, procurou-se verificar-se existe alguma relação entre o IRI e o fendilhamento.

O gráfico ilustrado na Figura 4.4 representa a área fendilhada presente nos trechos de 100 m da Amostra 1.

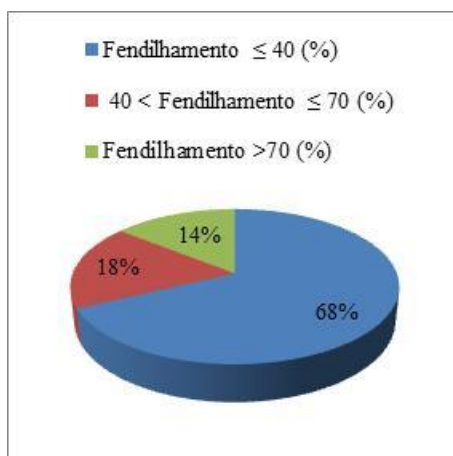


Figura 4.4 Representação gráfica do fendilhamento existente na Amostra 1

O gráfico ilustrado na Figura 4.5 representa a área fendilhada presente nos trechos de 100 m da Amostra 2.

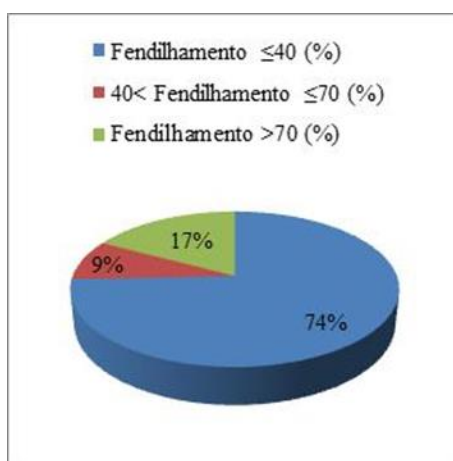


Figura 4.5 Representação gráfica do fendilhamento existente na Amostra 2

Através da observação do gráfico ilustrado na Figura 4.4 verifica-se que 32%, das secções em análise, apresentam uma área fendilhada superior a 40%, sendo que destes valores 14 % apresentam valores superiores a 70% de área fendilhada. Comparativamente com o fendilhamento presente na amostra com maior dimensão, representado no gráfico da Figura 4.5, observa-se que as percentagens de área fendilhada são relativamente próximas às da Amostra 1, sendo que a nível da Amostra 2, a área fendilhada apresenta ligeiramente mais valores dentro da classe menos gravosa. Considera-se que a nível global existe uma percentagem significativa de secções com fendilhamento elevado o que pode fazer com que ocorra a formação e evolução de outras degradações, nomeadamente as covas,

tal como foi referido anteriormente na análise feita em relação ao peso de cada uma das componentes do IRI (subcapítulo 3.6.4).

Posteriormente, fez-se uma análise semelhante, mas desta vez para as rodeiras médias existentes nos dois conjuntos de amostras de secções.

O gráfico ilustrado na Figura 4.6 representa as rodeiras médias presentes nos trechos de 100 m das secções da Amostra 1.

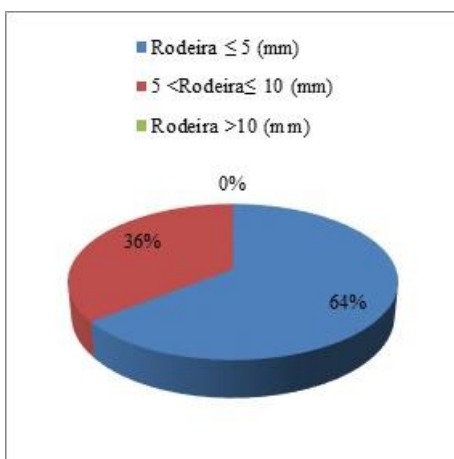


Figura 4.6 Representação gráfica das rodeiras médias existentes na Amostra 1

O gráfico ilustrado na Figura 4.7 representa as rodeiras médias presentes nos trechos de 100 m das secções da Amostra 2.



Figura 4.7 Representação gráfica das rodeiras médias existentes na Amostra 2

Na Figura 4.6 observa-se que na Amostra 1 todas as rodeiras médias apresentam valores inferiores a 10 mm, sendo que o valor máximo encontrado é de 9,41 mm. Embora não existam rodeiras médias pertencentes ao nível mais gravoso, 9,41 mm é um valor significativo para que a irregularidade presente num pavimento seja influenciada por esta deformação. Comparativamente com o gráfico ilustrado na Figura 4.7 representante da Amostra 2 verifica-se

que embora existam ligeiramente mais rodeiras médias iguais ou inferiores a 5 mm, no entanto existem secções com rodeiras superiores a 10 mm, o que não acontece no outro conjunto de secções.

Através da análise dos gráficos anteriores (Figura 4.2 à Figura 4.7) concluiu-se que o fendilhamento e as rodeiras têm influência na variação do valor do IRI, pois a sua presença afeta a capacidade estrutural do pavimento o que faz com que se formem outras degradações que, ao atingirem um elevado estado de degradação, têm um peso significativo no valor do IRI. Como foi referido anteriormente, este fenómeno depende de mais componentes, estando estas relacionadas com as ações agressivas a que o pavimento está sujeito, nomeadamente devido a efeitos ambientais e a nível da capacidade estrutural do pavimento. É também importante referir que a irregularidade longitudinal pode derivar de problemas de construção, pelo que aqueles não são os únicos fatores que contribuem para a irregularidade longitudinal de um pavimento.

4.4 Aplicação dos dados no modelo HDM-4

Os dados dos trechos escolhidos para análise, denominados anteriormente como Amostra 1, foram aplicados no modelo HDM-4. Nesta fase introduziram-se os valores medidos pela IP de fendilhamento e de rodeiras no modelo. Não foi possível introduzir outros parâmetros que contribuem para o IRI (desagregação superficial e covas), pelo facto de não haver dados sobre estes, na base de dados utilizada.

Com base nos valores que ocorrem usualmente e atendendo aos valores medidos pela IP, foi estimado o valor de IRI inicial, visto que a base de dados da IP não dispõe desta informação.

O cálculo do IRI através do modelo HDM-4 foi feito de acordo com as componentes disponíveis, sendo expresso pela seguinte equação:

$$IRI = \Delta IRI_e + \Delta IRI_r + \Delta IRI_s + \Delta IRI_c \quad (4.1)$$

em que:

ΔIRI_e – Contribuição dos efeitos ambientais para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.13);

ΔIRI_r – Contribuição da profundidade média das rodeiras para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.9);

ΔIRI_s – Contribuição estrutural para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.5);

ΔIRI_c – Contribuição do fendilhamento para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km), dado pela Equação (2.8).

Após a determinação das componentes do IRI obtidas pelo modelo HDM-4 criou-se um gráfico com o intuito de comparar os valores médios de IRI medidos pela IP, nas campanhas de 2011 a 2014, com os resultantes do modelo e determinou-se a correlação que existe entre eles. Os valores obtidos pelo modelo HDM-4 encontram-se descritos no ANEXO D.

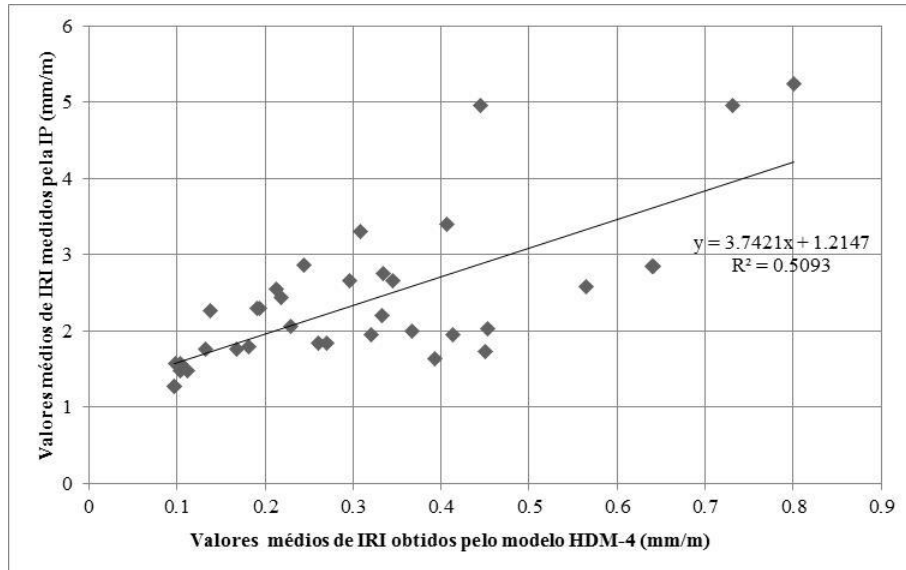


Figura 4.8 Comparação entre os valores do IRI medidos pela IP e as componentes do IRI pertencentes ao modelo HDM-4

O coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0,51$) presente no gráfico da Figura 4.8 mostra que existe correlação entre os valores medidos pela IP e os valores calculados através do modelo HDM-4. Observa-se também, na mesma figura, que o valor inicial de IRI corresponde a 1,21 mm/m, aproximadamente.

Embora na Figura 4.8 se possa observar um bom ajustamento dos valores obtidos através do modelo HDM-4, com os valores medidos pela IP, ainda assim existe uma dispersão significativa. Assim foram identificados dois conjuntos de valores que apresentam diferentes tendências, em que um se aproxima mais do valor do modelo HDM-4 (designado como Grupo 1) e outro apresenta valores mais afastados do modelo (designado como Grupo 2). Na Figura 4.9 estão representados os dois conjuntos de valores referidos.

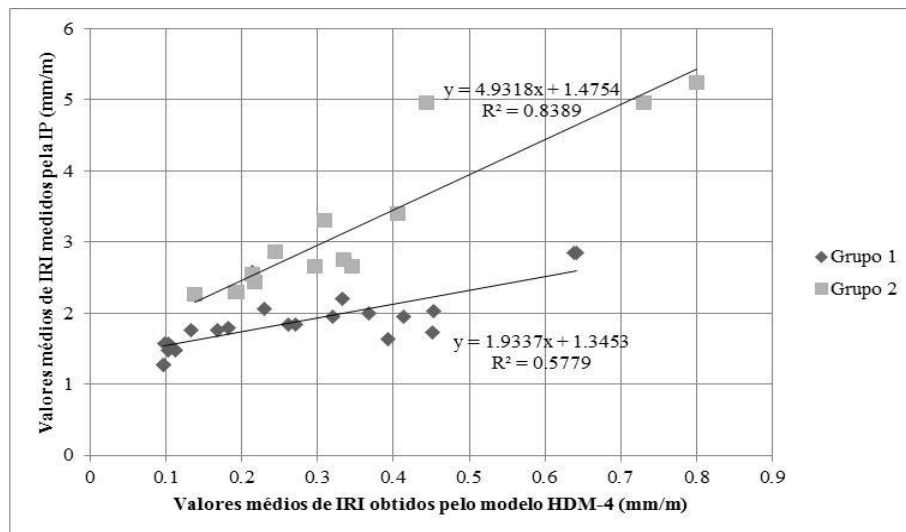


Figura 4.9 Comparação entre os valores médios de IRI medidos pela IP com os obtidos pelo modelo HDM-4

Analisando com detalhe a Figura 4.9, verifica-se que embora o Grupo 2 se afaste mais do modelo HDM-4, existe uma boa correlação, o que mostra que apesar de haver fatores com peso significativo no valor do IRI que não estão a ser considerados ou que não estão a ser devidamente expressos pelo modelo, no entanto essa componente deve

ser proporcional às restantes parcelas calculadas fazendo com que se observe um bom ajuste. É também observável, no mesmo gráfico, que nível do valor inicial de IRI, este é relativamente semelhante. Os valores médios de IRI medidos pela IP dentro de cada grupo encontram-se descritos no ANEXO E.

4.5 Calibração realizada

Para a realização das calibrações nos trechos escolhidos para análise, consideraram-se as componentes presentes na Equação (4.1). Em primeiro lugar, antes de qualquer calibração, fez-se os cálculos do valor do IRI com os coeficientes de calibração, K_{gm} , K_{gs} , K_{gc} , e K_{gr} , com um valor de 1.

De forma a encontrar os coeficientes de calibração que melhor se ajustam à rede rodoviária nacional, foi realizada uma regressão múltipla, através da qual foram obtidos os seguintes coeficientes de calibração, considerando apenas os valores de IRI pertencentes ao Grupo 1 (ver Quadro 4.1).

Quadro 4.1 Coeficientes de calibração obtidos por regressão múltipla pertencentes ao Grupo 1

Coeficientes de Calibração				
RIa	K_{gm}	K_{gc}	K_{gs}	K_{gr}
1,37	2,44	1,50	0,97	1,35

Legenda:

- RIa – Irregularidade no início do ano em análise;
- K_{gm} – Coeficiente de calibração devidos para efeitos ambientais;
- K_{gc} – Coeficiente de calibração devido ao fendilhamento;
- K_{gs} – Coeficiente de calibração devido à capacidade estrutural;
- K_{gr} – Coeficiente de calibração devido às rodeiras.

A regressão múltipla realizada permitiu obter os coeficientes de calibração presentes no Quadro 4.1. Utilizando esses valores na Equação (4.1), obtiveram-se os valores do modelo HDM-4 calibrado, sendo que com esses valores e os valores médios obtidos pela IP, construiu-se o gráfico da Figura 4.10, onde numa primeira análise, só foram contabilizadas as secções com IRI médio pertencentes ao Grupo 1, pelo facto de dentro desta gama de valores ocorrer uma maior constância de IRI.

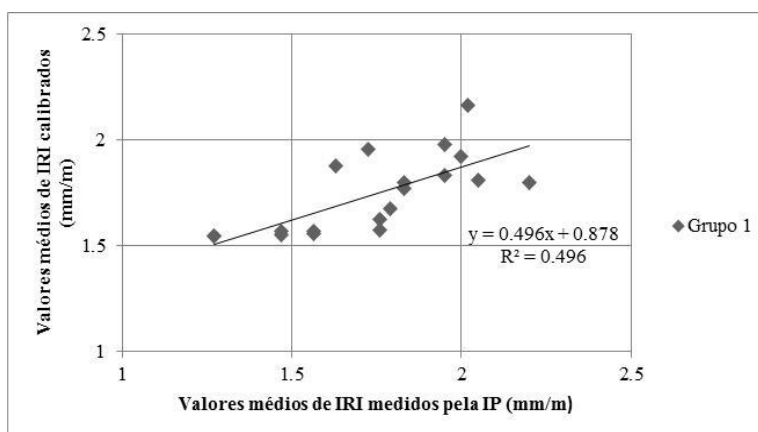


Figura 4.10 Comparação dos valores médios de IRI medidos pela IP com os obtidos pelo modelo HDM-4 calibrado nos trechos pertencentes ao Grupo 1

No gráfico da Figura 4.10, observa-se que existe um bom ajuste, dentro deste conjunto de valores pertencentes ao Grupo 1, entre os valores medidos pela IP e os valores de IRI obtidos pelo modelo HDM-4 após serem calibrados, embora com alguma dispersão, resultante de poderem existir fatores que não estão a ser contabilizados na avaliação realizada pelo modelo. Um desses fatores pode ser resultante de uma menor conservação o que leva à presença de covas de forma significativa.

Posteriormente, foi feita a mesma análise de forma a obter os coeficientes de calibração resultantes dos valores de IRI do Grupo 2. No Quadro 4.2 encontram-se os coeficientes de calibração obtidos para o Grupo 2.

Quadro 4.2 Coeficientes de calibração obtidos por regressão múltipla pertencentes ao Grupo 2

Coeficientes de Calibração				
RIa	Kgm	Kgc	Kgs	Kgr
1,74	4,73	2,71	6,51	2,28

Nota: Simbologia idêntica ao Quadro 4.1.

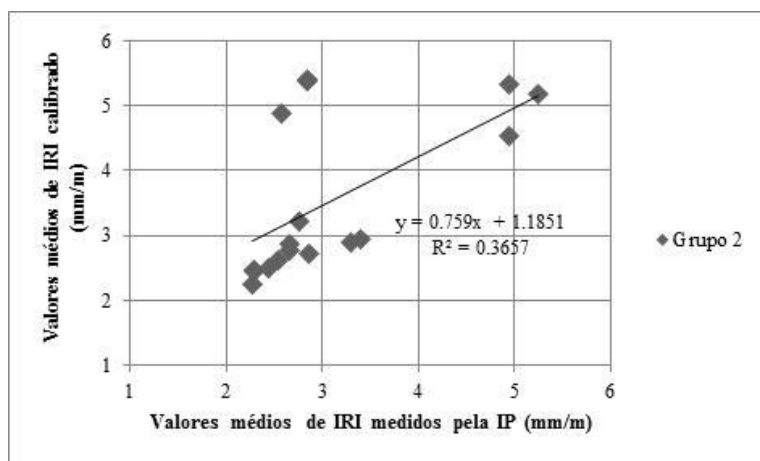


Figura 4.11 Comparação dos valores médios de IRI medidos pela IP com os obtidos pelo modelo HDM-4 calibrado nos trechos pertencentes ao Grupo 2

Através dos coeficientes de calibração obtidos no Grupo 1 e no Grupo 2, verifica-se que no Grupo 2 os valores são muito elevados, o que indica que nestes casos há um afastamento dos valores obtidos pelo modelo HDM-4, dos valores medidos pela IP. Este afastamento é também representado através do gráfico ilustrado na Figura 4.11. É também observável que o coeficiente de calibração que sofre uma alteração mais significativa é o relativo à capacidade estrutural, Kgs. Desta insuficiência de capacidade de estrutural, resulta problemas de fendilhamento que levam ao aparecimento de outras degradações, relativas ao estado superficial do pavimento. Os valores obtidos pela calibração do modelo encontram-se descritos no ANEXO F.

Posteriormente, fez-se um estudo de modo a verificar se os comportamentos apresentados por cada grupo de valores de IRI resultavam de diferentes níveis de fendilhamento.

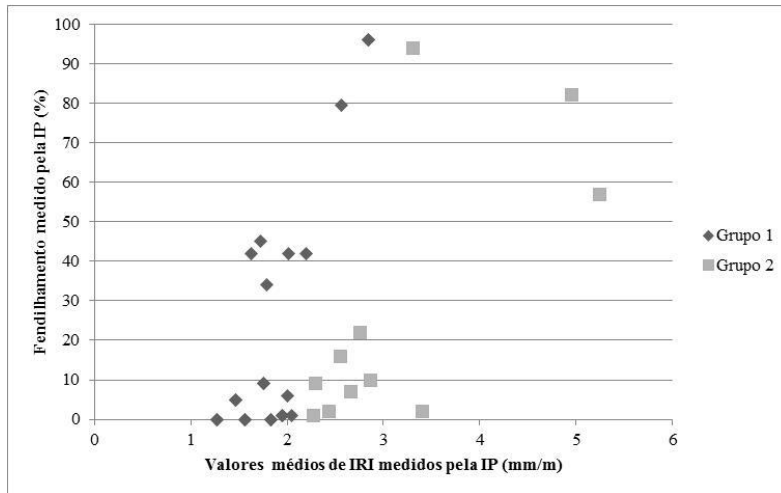


Figura 4.12 Comparação entre os valores médios de IRI e de fendilhamento medidos pela IP

Através do gráfico da Figura 4.12 verifica-se que existe uma relação entre o fendilhamento medido pela IP, na totalidade dos trechos para análise, com os valores médios de IRI. Observa-se também, no mesmo gráfico, que existem valores elevados de fendilhamento tanto num grupo, como noutro. Para fendilhamentos mais altos a dispersão do valor do IRI é maior. Nos casos onde ocorrem níveis elevados de fendilhamento, correspondentes a valores de IRI maiores, pode haver a formação de outros tipos de degradações que contribuam para o aumento significativo do valor do IRI. Os valores de fendilhamento obtidos para esta análise encontram-se descritos no ANEXO G, tendo sido comparados com os valores de IRI medidos pela IP presentes no ANEXO E.

Posteriormente, tendo em conta que o afastamento do Grupo 2 ao modelo HDM-4 não está diretamente relacionando com o nível de fendilhamento apresentado nas secções em análise, fez-se o mesmo estudo, mas relacionando os valores de IRI e as rodeiras médias medidos pela IP (ver Figura 4.13).

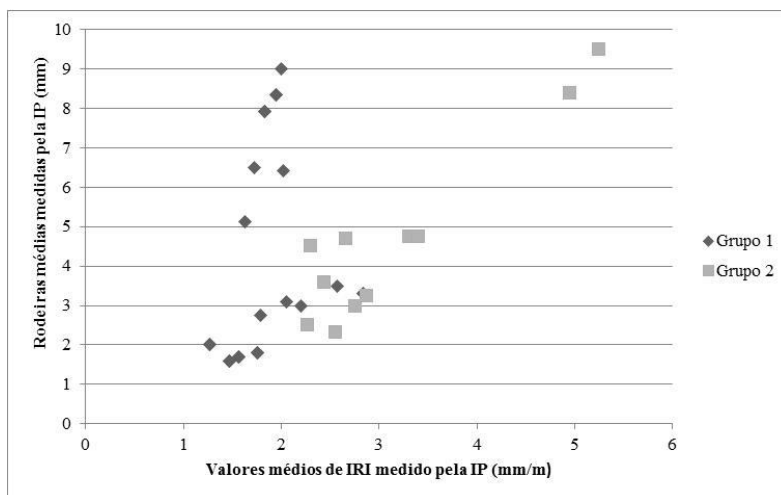


Figura 4.13 Comparação entre os valores médios de IRI a rodeira média medidos pela IP

De acordo com o gráfico ilustrado na Figura 4.13 observa-se que existem nos dois conjuntos de valores, rodeiras médias elevadas, embora no Grupo 2 estas correspondam a valores de IRI mais elevados do que no Grupo 1. Os

valores das rodeiras médias obtidas para esta análise encontram-se descritos no ANEXO H, tendo sido comparados com os valores de IRI medidos pela IP presentes no ANEXO E.

Através deste estudo, concluiu-se que o comportamento distinto dos valores de IRI, presentes nos dois grupos, não depende exclusivamente do fendilhamento e das rodeiras médias das secções em análise, pois existem valores elevados destas degradações em ambos os grupos. Existem outras componentes que têm influência no cálculo do IRI. Uma dessas componentes pode ser a contribuição das covas, que quando não são devidamente reparadas podem ter um peso significativo no valor do IRI, como foi demonstrado na Figura 3.23, onde se verificou que ao fim de 20 anos há uma influência muito grande das covas no valor do IRI, caso não ocorram trabalhos de manutenção, de cerca de 6 mm/m, sendo que 1,28 mm/m desta contribuição foi verificada no último ano. Na Figura 3.24 faz-se a mesma análise, mas considerando que foram realizados trabalhos de manutenção, tendo-se registado um aumento de 2 mm/m ao fim de 20 anos e que deste aumento 0,6 mm/m ocorreu no último ano.

A elevada presença de covas a nível da camada de desgaste faz com que existam várias zonas localizadas com deficiente capacidade de suporte e que ocorra um aumento elevado do IRI que por consequência faz com que ocorra uma diminuição significativa das condições de circulação e de conforto de um pavimento. Desta forma, esta componente é muito importante e requer especial atenção por parte das entidades rodoviárias, pois tem consequências tanto a nível da estrutura, como da funcionalidade de um pavimento.

Capítulo 5

5 Considerações finais

5.1 Principais conclusões

No presente trabalho foi possível reunir informações importantes para a caracterização e compreensão da irregularidade longitudinal existente nos pavimentos da rede rodoviária nacional.

Os valores de IRI médios apresentam diferentes amplitudes a nível do território nacional. A base de dados da IP tem 2221 secções, sendo que em algumas destas secções o IRI médio apresenta valores entre 7 e 4 mm/m, o que correspondem a valores de IRI médio considerados elevados. Contudo, mais de metade das secções apresenta IRI médio igual ou inferior a 1,5 mm/m, sendo que estes valores encontram-se numa classe de IRI médio designada como menor. Outra informação útil que se obteve neste trabalho é que o valor máximo de IRI, nos trechos de 100 m, da rede rodoviária nacional é igual a 12,14 mm/m o que corresponde a um nível de gravidade muito elevado, no entanto existe um número significativo de trechos de 100 m com valores de IRI inferiores a 1 mm/m, sendo que o IRI mínimo encontrado é igual a 0,61 mm/m. Existe alguma dispersão relativamente ao valor médio de IRI. Por exemplo nas secções dentro da classe menor, onde o IRI médio apresenta valores próximos de 1,5 mm/m, é possível encontrar, em trechos de 100 m, um valor de IRI igual a 5,55 mm/m, sendo este valor considerado elevado para este fenómeno.

Através da análise estatística feita em relação às diferentes classes de IRI médio presente na base de dados da IP, verifica-se que nas cem secções mais graves, 85 % dos valores apresentam IRI médio superior a 4 mm/m e que dentro da classe designada com nível de IRI médio menor, 95 % dos valores são inferiores a 2 mm /m.

No que diz respeito aos tipos de distribuição estatística do IRI, verificou-se que quanto maiores são os valores de IRI presentes nos trechos de 100 m das secções em análise mais estes se aproximam de uma distribuição normal. Nas secções classificadas como intermédias ocorre um pequeno desvio dos valores relativamente ao que seria uma distribuição normal, sendo que os valores passam a ajustar-se melhor a uma distribuição log-normal. Nos casos das secções com IRI médio menor, este desvio é mais acentuado.

Em termos dos parâmetros considerados no modelo HDM-4, concluiu-se que os que têm mais influência no valor do IRI, ou seja, os que mais contribuem para o aumento deste fenómeno, são o número estrutural modificado e o tráfego. Embora as condições climáticas não tenham um grande peso na mudança do valor do IRI, estes fatores em conjunto podem alterar a capacidade estrutural do pavimento e desta forma afetar de modo mais significativo

o valor do IRI. Verifica-se que é importante que todos os pavimentos apresentem um sistema de drenagem eficaz para que o valor do IRI não seja agravado.

Dentro das componentes que entram diretamente no cálculo do IRI, concluiu-se que a contribuição das covas apresenta um grande peso neste fenómeno quando atingem um estado avançado, pelo que para que os valores de IRI médio se mantenham dentro do intervalo considerado admissível, as covas tem de ser devidamente controladas através de trabalhos de manutenção, caso contrário esta parcela pode levar ao aumento de 6 mm/m no valor do IRI ao fim de 20 anos.

Na avaliação das secções escolhidas para utilizar no modelo HDM-4 analisou-se a relação do IRI com outras degradações, como o cavado das rodeiras, e verificou-se que o aumento da profundidade média das rodeiras tem alguma influência no aumento da irregularidade presente nas secções em análise, que por sua vez contribui para menores condições de segurança e conforto sentidas por parte dos seus utentes. O mesmo acontece quando se relaciona este fenómeno com o fendilhamento. No entanto, o IRI depende de mais componentes.

A calibração obtida entre os valores calculados através do modelo HDM-4 e os valores medidos pela IP, não é igual para toda a gama de valores de IRI presentes na rede rodoviária nacional. Verificou-se que existem dois comportamentos distintos de IRI médio, sendo que existe um conjunto de valores que apresenta um melhor ajuste ao modelo HDM-4, designado como Grupo 1 e um outro cujos valores se afastam mais do modelo, designado Grupo 2. Os valores do Grupo 2, embora se afastem mais do modelo HDM-4, apresentam uma boa correlação, concluindo-se assim que a componente que contribui para este afastamento é proporcional às outras parcelas que se encontram no cálculo do IRI. Desta forma, procurou-se ver se esta distinção de comportamentos estava relacionada com os níveis de fendilhamento presentes em cada grupo, onde se concluiu que, tanto num caso como noutro, existem valores elevados de fendilhamento. Seguidamente, fez-se a mesma análise em relação às rodeiras dentro dos dois conjuntos de valores de IRI, onde se concluiu que existem valores elevados de rodeiras em ambos os grupos. Assim, através desta análise, verifica-se que não há relação direta entre o IRI, o fendilhamento e as rodeiras. O que leva a concluir que poderá existir outro fator que está a causar um aumento significativo do valor do IRI. Esse fator são as covas, que resultam de problemas provenientes de insuficiência da capacidade estrutural de um pavimento e que quando não são devidamente evitadas ou reparadas podem ter uma grande influência no valor do IRI.

Os modelos de previsão do desempenho de pavimentos podem ser uma ferramenta essencial ao serviço dos sistemas de gestão da rede rodoviária nacional, desde que sejam conhecidas as suas limitações, pois em particular, no caso do modelo HDM-4, são considerados apenas os fatores que influenciam diretamente o valor do IRI.

A informação incluída na base de dados da IP permitiu o desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento do pavimento. O modelo HDM-4 tem potencialidade, a nível do IRI, em ser adotado para a rede rodoviária nacional, pois trata-se de um modelo que foi implementado com sucesso por várias administrações rodoviárias em diferentes partes do mundo. No entanto, é importante referir que a elaboração deste tipo de modelo pode ser melhorada, caso sejam considerados alguns elementos adicionais presentes nos desenvolvimentos futuros.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Ao longo da realização deste trabalho, verificou-se que a base de dados da IP tem potencial para ser utilizada de modo a desenvolverem-se modelos de previsão do IRI ajustados à rede rodoviária nacional. No entanto poder-se-á, para um número limitado de secções melhorar os dados presentes na base para que estes possam ser tratados, organizados e validados. Para tal, sugerem-se as seguintes tarefas:

- Realizar contagens para confirmar os dados relativos ao tráfego;
- Realizar ensaios, destrutivos e não destrutivos, de modo a validar a informação relativa à estrutura do pavimento, número estrutural, espessura das camadas constituintes e CBR;
- Registrar o montante despendido anualmente nas secções, de modo a que seja perceptível a dimensão das intervenções realizadas numa determinada secção;
- Efetuar a calibração dos resultados presentes na base de dados, através do controlo dos equipamentos de medição e do registo preciso do local da secção onde a medição foi feita;
- Inserir na base de dados medições relativas às covas;
- Descrever o processo de avaliação de medição correspondente aos resultados obtidos, nomeadamente em relação ao equipamento utilizado e ao local onde foi feita a medição.

Para futuras investigações deve-se verificar que fatores contribuem para a existência de comportamentos distintos conforme o valor de IRI médio, sendo que pode ser necessário elaborar novos modelos que expressem melhor esses fatores. Devem ser realizadas visitas às secções que apresentem trechos de 100 m com IRI dentro da classe designada com nível maior, para que estes fatores sejam identificados e fazer com que os mesmos possam vir a ser contabilizados.

Referências bibliográficas

- [1] BRANCO, F.; PEREIRA, P. e PICADO-SANTOS, L. 2011. *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Edições Almedina.
- [2] SANTINHO, C.; PEREIRA, F. e MORGADO, J. 2013. *Sistema de Conservação de Gestão de Pavimentos*. 7º Congresso Rodoviário Português do Centro Rodoviário Português, Lisboa.
- [3] American Association of State Highway Officials (AASHO). 1962. *The AASHO Road Test Report 5-Pavement Research. HRB Special Report 61E*. Washington, D.C.: AASHO.
- [4] ILVA, R. 2012. *Contribuição para o Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Fendilhamento de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [5] European Commission (EC). 1997. *Cost 324-Long Term Performance of Road Pavements*. Final Report of the Action. European Cooperation in field of Scientific and Technical Research.
- [6] PICADO-SANTOS, L.; FERREIRA, A. e PEREIRA, P. 2006. *Estruturação de um sistema de Gestão de Pavimentos para uma Rede Rodoviária Nacional*. Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho, nº26, pp.1-12.
- [7] PERERA, R. e KOHN, S. 2002. *NCHRP Report 42: Issues in Pavement Smoothness*. Washington, D.C.: TRB, National Research Council.
- [8] ROBERT, B.; DELAVAL, E. e MARTIN, J.-M. 2009. *Mesure de l'uni Longitudinal des Chaussées Routières et Aéronautiques*. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [9] SÁ, S. 2014. *Modelos de Previsão de Rodeiras em Pavimentos Rodoviários*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [10] THEYSE, H. 2008. *Revision of the South African Flexible Pavement Design Method Project SAPDM-ILP, System Design: HDM4 Deterioration Models-Part 1*. Starkey: Pavement Modelling Corporation.
- [11] European Commission (EC). 1999. *Transport Research Fourth Framework Programme Urban Transport - PARIS*. Bélgica: EC.
- [12] SILVA, M. 2015. *Previsão de Irregularidade Longitudinal em Pavimentos Flexíveis*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, especialização em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- [13] LATIF, A. 2009. *Relationship between International Roughness Index (IRI) and Present Serviceability Index (PSI)*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universiti Teknologi Malaysia, Malásia.
- [14] The World Bank. 2008. *HDM-4 Deterioration of bituminous road*. Presentation for The World Bank.

- [15] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). 1986. *Sistema de Informação Rodoviária com base no curso "A Program of Study in Pavement Management" da Universidade de Texas, Austin*. Lisboa: LNEC.
- [16] SAYERS, M.; GILLESPIE, T. e PATERSON, W. 1986. *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. The World Bank technical paper number 46*. Washington, D.C.: The World Bank.
- [17] AZEVEDO, M. 2012. *Construção e Reabilitação de Pavimentos. Indicadores de estado de conservação dos pavimentos - Disposições Normativas*. Instituto de Infraestruturas Rodoviárias.
- [18] RODRIGUES, C. 2013. *Modelos de Previsão da Degradação de Pavimento: Parâmetro IRI*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [19] LUZ, A. 2011. *Contribuição para a Modelação do Índice de Qualidade na Caracterização da Rede Rodoviária Nacional*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- [20] PRASAD, J.; KANUGANTI, S.; BHANEGAONKAR, P.; SARKAR, A. e ARKATKAR, S. 2013. *Development of Relationship between Roughness (IRI) and Visible Surface Distresses: A Study on PMGSY Roads*. Procedia Social and Behavioral Science, vol. 104, pp. 322-331. Elsevier.
- [21] CALLAO, R. 2004. *Economically Justified Levels of Road Expenditures*. Washington, D.C.: Transport Notes- A World Bank Publication.
- [22] GILLESPIE, T. 1992. *Everything You Wanted to Know about the IRI, but Were Afraid to Ask*. Presented at the Road Profile Users Group Meeting, Nebraska.
- [23] International Study of Highway Development and Management (ISOHDM). 1995. *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4. RETA 5549-REG Highway Development and Management Research*. Final Report. Vancouver: ISOHDM.
- [24] American Concrete Pavement Association (ACPA). 2002. *The International Roughness Index: What is it? How is it measured? What do you need to know about it?* Estados Unidos da América: Concrete Pavement Research & Technology.
- [25] WATANATADA, T. et al. 1987. *The Highway Design and Maintenance Standards Model. Volume 1- Description of the HDM-III Model*. Published for The World Bank. Londres: The Johns Hopkins University Press.
- [26] Estradas de Portugal (EP). 2009. *Sistema de Gestão de Pavimentos: Manual de Utilização*. Almada: EP.
- [27] PARDAL, M. 2013. *Modelos Probabilísticos de Previsão de Fendilhamento em Pavimentos Rodoviários*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [28] PEREIRA, P. e MIRANDA, V. 1999. *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Braga: Universidade do Minho.

-
- [29] HINE, J. 2014. *Good polices and pratices on rural transport in Africa. Planning infrastruture & services*. Working Paper No. 100: African Transport Policy Program.
- [30] SABA, R. 2010. *Performance prediction models for flexible pavements*. NordFou Project.
- [31] GREENE, S. e ULM, F. 2013. *Pavement Roughness and Fuel Consumption*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- [32] HICKSON, I.; HOQUE, Z.; MARTIN, T. e CHOUMMANIVONG, L. 2008 *Austrroads Tecnical Report- Development of HDM-4 Road Deterioration Model Calibrations for Sealed Granular and Asphalt Roads Development of HDM-4 Road Deterioration Model Calibrations for Sealed Granular and Asphalt Roads*. Sydney: Austrroads.
- [33] CALLAO, R. 2008. *Applying the HDM-4 Model to Strategic Planning of Road Works*. Washington, D.C.: Transport Paper- A World Bank Publication.
- [34] GERSTMAN, B. 2008. *Basic Biostatistics - Statistics for Public Health Practice*. Jonas and Bartlett Publishers.
- [35] Junta Autónoma de Estradas (JAE). 1995. *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. Almada: JAE.
- [36] Instituto Português do Mar e da Terra (IPMT). 2015. *Clima de Portugal Continental*. [Online]. Disponível em : <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/index.jsp?page=clima.pt.xml>. [Acedido em : 18-Aug-2015].
- [37] SHELL. 1977. *Asphalt Pavement Design Manual*. Londres: Shell International Petroleum Company (SHELL).
- [38] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: AASHTO.
- [39] QUARESMA, L. 2012. *Apontamentos de Transportes*. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.
- [40] Google. 2015. *Mapa de Portugal* .[Online]. Disponível em: http://www.mapas-portugal.com/Mapa_Distritos_Portugal.htm. [Acedido em: 01-Sep-2015].

Anexo A

A – Cálculo da profundidade média das rodeiras no modelo HDM-4

No modelo HDM-4 a deformação total (profundidade média da rodeira) é, em qualquer momento a soma das quatro componentes seguintes [10]:

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

A Figura A.1 ilustra a progressão da profundidade média da rodeira ao longo do tempo segundo o modelo HDM-4.

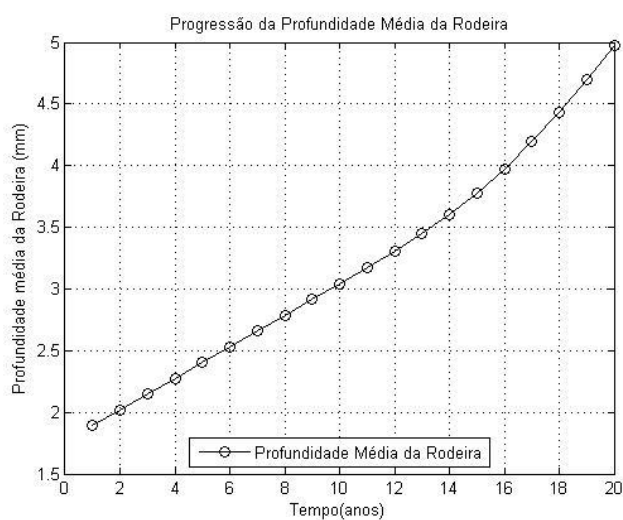
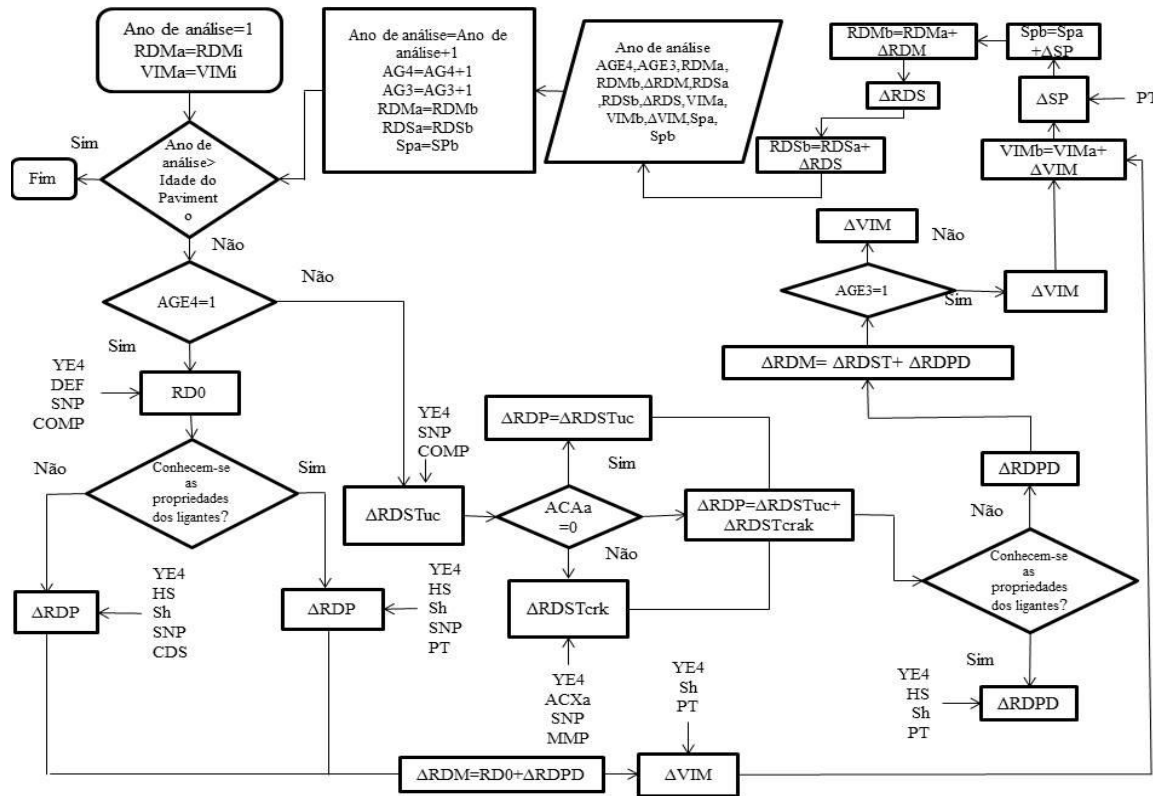


Figura A.1 Progressão da profundidade média da rodeira

➤ Progressão da profundidade média da rodeira

Os modelos de progressão da profundidade média da rodeira, expressa em mm, no total de cada ano é calculado através do fluxograma da Figura A.2.



Legenda:

- RD0 – Cavado de Rodeira por densificação inicial (mm);
- YE4 – Tráfego em MESALs (milhão de passagens de um eixo-padrão) por ano (80 kN) definidos pelos modelos HDM;
- SNP – Número estrutural modificado;
- CDS – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento (ver Quadro B.2);
- COMP – Índice de compactação relativa do pavimento (%);
- DEF – Deflexão média anual da viga de Benkelman;
- MMP – Precipitação média mensal (mm/mês);
- ACX – Área de fendilhamento prevista (%);
- AGE3 – Tempo que decorreu desde a última reabilitação (anos);
- RDM – Profundidade média da rodeira (mm);
- Sh – Velocidade dos veículos pesados (=60km/h);
- HS – Espessura da camada betuminosa (mm);
- ΔRDST – Aumento anual da deformação estrutural (mm);
- ΔRDPD – Aumento anual da deformação plástica (mm);
- ΔRDS – Aumento anual do desvio padrão da profundidade média da rodeira (mm);
- ΔRDM – Aumento gradual da profundidade média total da rodeira (mm);
- Sp – Temperatura de amolecimento (°C);
- PT – Temperatura do pavimento (°C) a 20 mm de profundidade durante o ano em análise;
- VIM – Vazios na mistura (%);
- ΔVIM – Redução anual do número de vazios na mistura (%).

Figura A.2 Fluxograma utilização para calcular a progressão da profundidade média das rodeiras (RDM)[10]

Podem ser encontradas equações matemáticas para estabelecer o fluxograma indicado na Figura A.2 em [10].

Anexo B

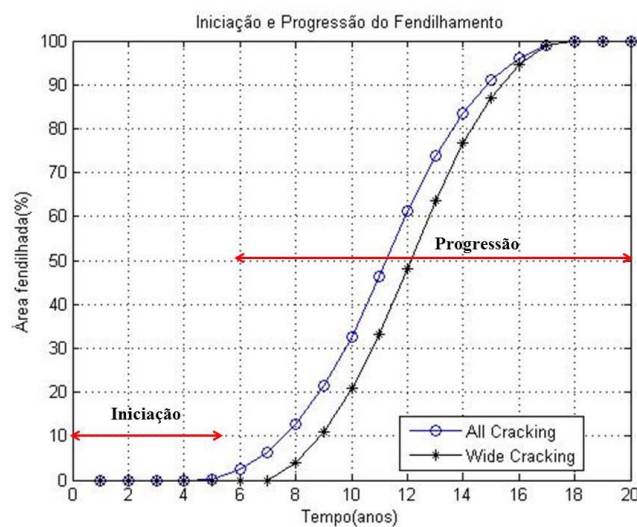
B – Cálculo do fendilhamento no modelo HDM-4

O modelo HDM-4 caracteriza o fendilhamento com base no seu grau de gravidade, segundo o grau de fissuração (baseado na área de fendilhamento) e tipo de fendilhamento [10].

Quadro B.1 Classificação do fendilhamento utilizado no modelo HDM-4 [10], [23]

Fendilhamento	Descrição
Gravidade	Classe 1: Abertura da fenda ≤ 1 mm
	Classe 2: $1\text{mm} < \text{Abertura da fenda} \leq 3\text{mm}$
	Classe 3: Abertura da fenda > 3 mm sem desagregação
	Classe 4: Abertura da fenda > 3 mm m desagregação
Área	Somatório das áreas fendilhadas em m^2 , definida como percentagem da área total da secção. As fendas isoladas foram convertidas em área pela multiplicação de uma largura padrão de 0,5 m

O modelo HDM-4 considera que a área de fendilhamento total (*All cracking*) é a área que correspondem às classes 1, 2, 3 e a área de fendilhamento aberto (*Wide cracking*) é apenas a que corresponde à área de fendilhamento para à classe 4. Os modelos de iniciação e para a progressão de fendilhamento total são diferentes comparativamente com os de fendilhamento aberto, sendo que este último corresponde a uma extensão dos modelos do fendilhamento total [10].



Legenda:

All Cracking – Fendilhamento total;

Wide Cracking – Fendilhamento aberto.

Figura B.1 Iniciação e progressão de fendilhamento

➤ Iniciação do fendilhamento no Modelo HDM-4

Os modelos de iniciação de fendilhamento total dependem do tipo de pavimento. Com os modelos de iniciação de fendilhamento obtidos pelo modelo HDM-4 é possível prever o tempo, em anos, para o início do fendilhamento [10].

➤ Procedimento para o cálculo do fendilhamento

As equações para o cálculo do tempo para o início de fendilhamento variam conforme a estrutura do pavimento e os tratamentos que este apresenta [10].

O cálculo para uma estrutura original é feito através da seguinte expressão:

$$ICA(0) = Kcia = (CDS^2 \times e^{(a1 \times SNP \times (\frac{YE4}{SNP^2}))} + CRT) \quad (B.1)$$

O cálculo para um pavimento onde foi realizada uma intervenção com sobreposição de camada betuminosa dado pela seguinte expressão:

$$ICA(1) = Kcia \times (CDS^2 \max(\max(1 - (\frac{PCRW}{a3}), 0) \times a0 \times e^{a1 \times SNP + a2(\frac{YE4}{SNP^2}), a4}) + CRT) \quad (B.2)$$

O cálculo para um pavimento com tratamento superficial é dado pela seguinte expressão:

$$ICA(2) = Kcia \times (CDS^2 \max(\max(1 - (\frac{PCRW}{a3}), 0) \times a0 \times e^{a1 \times SNP + a2(\frac{YE4}{SNP^2}), a4 \times HSNEW}) + CRT) \quad (B.3)$$

em que:

ICA (0) – Tempo para o início do fendilhamento total para uma estrutura original (anos);

ICA (1) – Tempo para o início do fendilhamento total para uma estrutura onde foi realizada uma intervenção com sobreposição de camada betuminosa (anos);

ICA (2) – Tempo para o início do fendilhamento total para uma estrutura onde foi realizado um tratamento superficial (anos);

Kcia – Coeficiente de calibração para o tempo para início do fendilhamento (=1);

CDS – Indicador de defeitos de construção das camadas betuminosas do pavimento (ver Quadro B.2)

a0, a1, a3 e a4 – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro B.3);

SNC – Número estrutural modificado (ver Anexo A);

YE4 – Tráfego em MESALs por ano (80 kN) definido pelo modelo HDM;

CRT – Tempo que levou o atraso do fendilhamento devido à execução de reparações (anos);

HSNEW – Espessura da camada mais recente existente em caso de intervenção;

PCRW – Área de fendilhamento aberto existente nas camadas antigas, em percentagem da área total.

Quadro B.2 Valores de CDS recomendados [10], [23]

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

Quadro B.3 Coeficientes utilizados para o cálculo do tempo para o início do fendilhamento total [10], [23]

Tipo de Pavimento	Material de Camada de Desgaste	a0	a1	a2	a3	a4
AMGB	Todos exceto CM	4,21	0,14	-17,1	30	0,025

Legenda:AMGB— Mistura Betuminosa sobre base granular (*Asphalt mix & granular base*);CM — Mistura Betuminosa a frio (*Cold mix*).

Após o cálculo para o tempo até ao início do fendilhamento total, calcula-se o tempo para o fendilhamento aberto. Para tal, utiliza-se a seguinte expressão[10]:

$$ICW = Kcia \times (CDS^2 \max[(a3 + a4 \times ICA), a5 \times ICA]) \quad (B.4)$$

em que:

ICW – Tempo para o início do fendilhamento aberto (anos);

Kcia – Coeficiente de Calibração para o tempo para início do fendilhamento (=1);

a3, a4 e a5 – Coeficientes utilizados no modelo HDM-4 (ver Quadro B.4);

ICA – Tempo para o início do fendilhamento total (anos).

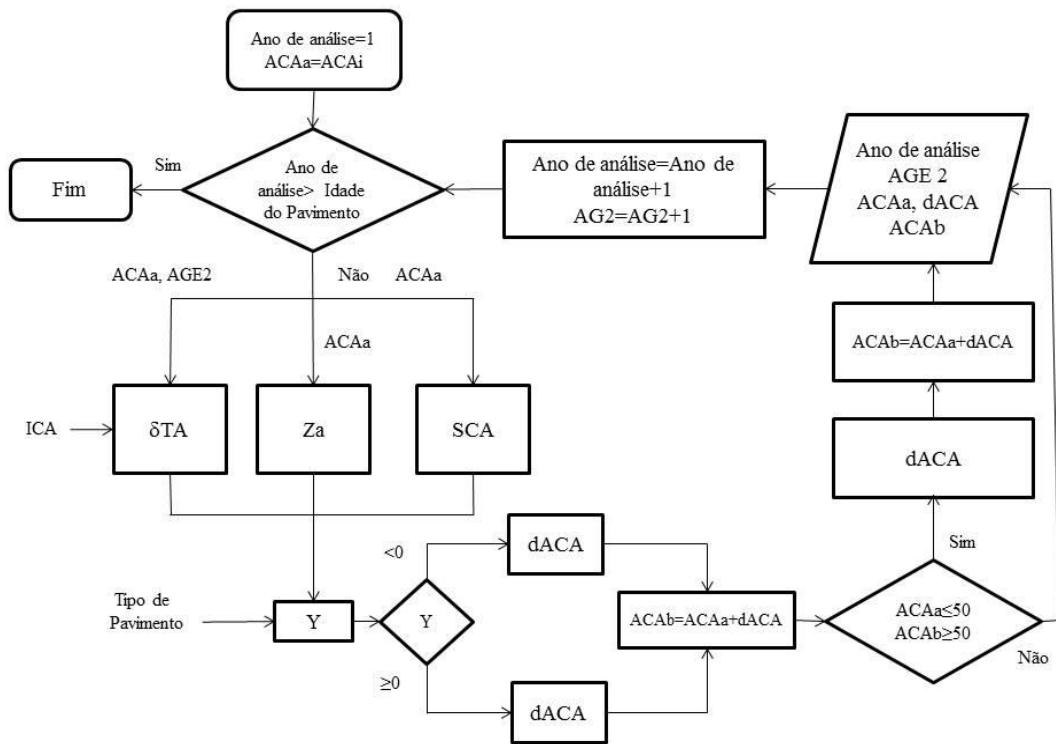
Quadro B.4 Coeficientes utilizados para o cálculo do tempo para o início do fendilhamento total [10], [23]

Tipo de Pavimento	Material da Camada de Desgaste	a3	a4	a5
AMGB	Todos	2,46	0,93	0

Nota: Simbologia idêntica ao Quadro B.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, sendo que para saber a área fendilhada de fendilhamento total e aberto ao fim de cada ano é necessário calcular a progressão destes ao longo dos anos. Para tal, é necessário seguir o fluxograma da Figura B.2 para fendilhamento total e da Figura B.3 para fendilhamento aberto [10].



Legenda:

ACAa – Área de Fendilhamento total no início do ano em análise (%);

ICA – Tempo para o início do fendilhamento total (anos);

δtA – Fração do ano aplicada na progressão do fendilhamento total (anos);

AGE2 – Tempo que decorreu desde a colocação de uma nova camada de desgaste (anos);

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

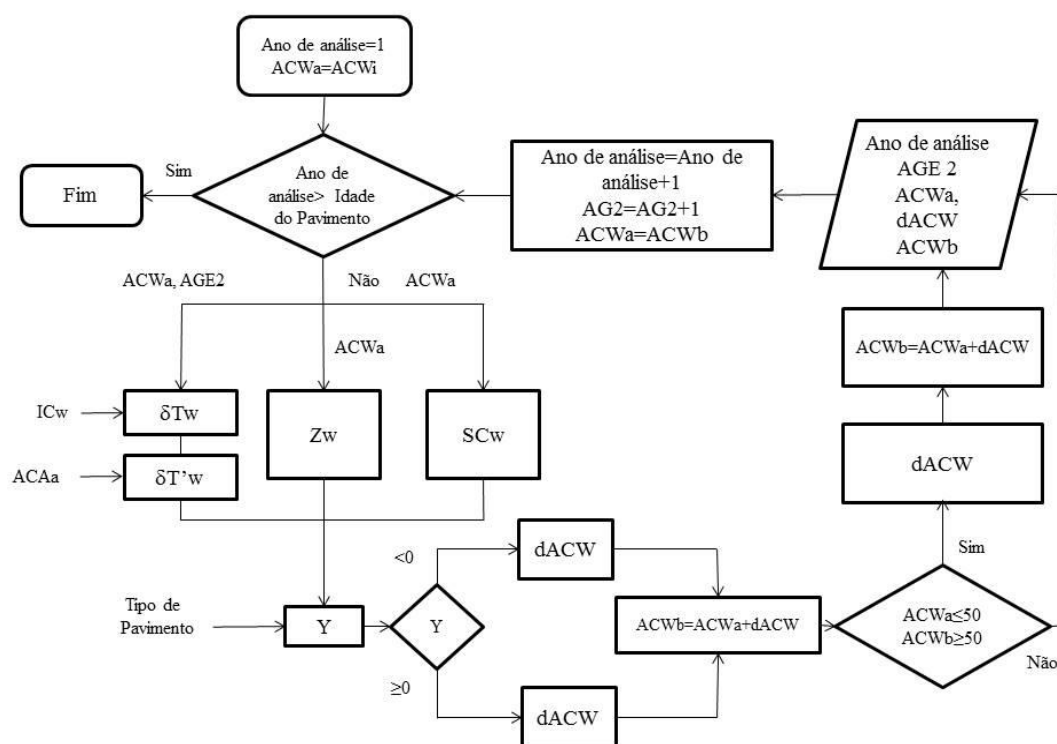
SCA – Parâmetro utilizado para calcular o fendilhamento total no modelo HDM-4;

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

dACA – Incremento anual da área de fendilhamento total (%).

Figura B.2 Fluxograma utilização para calcular a progressão do fendilhamento total (ACA)[10]

Podem ser encontradas equações matemáticas para estabelecer o fluxograma indicado na Figura B.2 [10].



Legenda:

ACWa – Área de Fendilhamento aberto no início do ano em análise (%);

ICW – Tempo para o início do fendilhamento aberto (anos);

δt_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);

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

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

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

dACW – Incremento anual da área de fendilhamento total (%).

Figura B.3 Fluxograma utilização para calcular a progressão do fendilhamento aberto (ACW) [10]

Podem ser encontradas equações matemáticas para estabelecer o fluxograma indicado na Figura B.3 [10].

➤ Área total de fendilhamento no Modelo HDM-4

Para se calcular a área total de fendilhamento usa-se a expressão seguinte [10]:

$$ACX = 0,62 \times ACA + 0,39 \times ACW \quad (B.5)$$

em que:

ACX – Área de fendilhamento;

ACA – Área de fendilhamento total;

ACW – Área de fendilhamento aberta.

Anexo C

C – 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 através da seguinte expressão [38]:

$$SN = a1 \times h1 \times d1 + a2 \times h2 \times d2 + a3 \times h3 \times d3 + ax \times hx \times dx \quad (C.1)$$

em que:

SN – Número estrutural;

ai – Coeficiente estrutural da camada i (ver Quadro C.1);

hi – Espessura da camada i (polegadas);

di – Coeficiente de drenagem;

x – Número de camadas por cima do solo de fundação.

É de referir que a primeira camada, assumida como sendo betuminosa, não é modificada pelo coeficiente de drenagem. Os valores recomendados para os coeficientes de drenagem (di), já foram apresentados no Quadro 3.9 do texto principal da presente dissertação.

No modelo HDM-4 a contribuição da fundação é incorporada no SNC sendo considerada através do cálculo do SN. O SN, torna-se SNC por se considerar o solo de fundação, sendo expresso por:

$$SNC = 0,0394 \sum_i^{n^g} Camadas ai \times hi \times di \times SNSG \quad (C.2)$$

e

$$SNSG = 3,51 \times \log_{10}(CBR) - 0,85 \times (\log_{10}(CBR))^2 - 1,43 \quad (C.3)$$

em que:

SNC – Número estrutural modificado;

ai – Coeficiente estrutural da camada i (ver Quadro C.1);

hi – Espessura da camada i;

di – Coeficiente de drenagem da camada i;

SNSG – Contribuição estrutural da fundação;

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

No Quadro C.1 apresentam-se os valores dos coeficientes estruturais resultantes dos diversos estudos.

Quadro C.1 Coeficientes estruturais (ai) resultantes de diversos estudos [23]

Camada do Pavimento	Coeficientes Estruturais			
	TRL (1975)	AASHTO (1993)	Paterson (1987)	Cenek e Patrick (1994)
Camada de Desgaste				
Tratamento Superficial			0,20-0,40	0,300
Revestimento Superficial	0,100			
Micro-aglomerado				
Mistura Betuminosa a Quente Semi-Aberta, 25mm				
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=100,00 psi (≈700MPa)		0,200		
Betão Betuminoso Mod.Elast. a 20°C, E=200,00 psi (≈700MPa)		0,300		
Betão Betuminoso Mod.Elast. a 20°C, E=300,00 psi (≈2100MPa)		0,350		
Betão Betuminoso Mod.Elast. a 20°C, E=400,00 psi (≈21800MPa)		0,425		
Camada Base				
GB (Base Granular), CBR=30%	0,070	0,095	0-0,07	
GB (Base Granular), CBR=50%	0,100	0,110	0-0,10	
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 (≈890 N)		0,120		
AB (Base Betuminosa), Estabilidade Marshall, 200lb (≈1779N)		0,160		
AB (Base Betuminosa), Estabilidade Marshall, 200lb (≈3559 N)		0,200		
AB (Base Betuminosa), Estabilidade Marshall, 200lb (≈5338 N)		0,240		
Camada Sub-base				
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	

Anexo D

D – Componentes do IRI obtidas pelo HDM-4

As componentes do IRI obtidas pelo modelo HDM-4 para serem usadas para comparação entre os valores do IRI medidos pela IP encontram-se presentes no Quadro D.1.

Quadro D.1 Componentes do IRI obtidas pelo modelo HDM-4

Secção	Δ IRIe	Δ IRIr	Δ IRIc	Δ IRIs
A025	0,044	0,018	0,209	0,018
A571	0,104	0,229	0,389	0,009
A609	0,080	0,090	0,0512	0,024
B028	0,082	0,083	0,111	0,059
B649	0,113	0,087	0,008	0,023
B701	0,068	0,096	0,039	0,007
C137	0,037	0,044	0,022	0,001
C307	0,080	0,098	0,012	0,029
C326	0,030	0,048	0,045	0,010
C336	0,097	0,131	0,046	0,034
C351	0,044	0,046	0,002	0,007
C361	0,061	0,095	0,028	0,068
C399	0,153	0,171	0,018	0,111
C474	0,063	0,089	0,477	0,013
C528	0,144	0,256	0,281	0,120
D280E	0,038	0,216	0,001	0,007
D344	0,020	0,277	0,033	0,162
D365	0,063	0,069	0,005	0,001
E237	0,047	0,246	0,026	0,048
E257	0,042	0,139	0,205	0,007
E287	0,043	0,083	0,204	0,004
E536	0,072	0,236	0,009	0,088
E708	0,050	0,013	0,033	0,136
F513	0,050	0,075	0,017	0,039
F553	0,038	0,055	0,003	0,001
G028	0,007	0,064	0,079	0,064

Legenda:

Δ IRIe – Contribuição dos efeitos ambientais para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km);

Δ IRIr – Contribuição da profundidade média das rodeiras para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km);

Δ IRIs – Contribuição do estrutural para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km);

Δ IRIc – Contribuição do fendilhamento para o incremento da irregularidade durante o ano em análise (IRI m/km).

Anexo E

E – Valores médios de IRI medidos pela IP

Quadro E.1 Valores de IRI médio (2011 a 2014) medidos pela IP do Grupo 1

Secção	Valores Médios de IRI medidos pela IP (mm/m)
A025	1,73
B649	2,05
C137	1,47
C351	1,57
C326	1,76
C399	2,02
D280E	1,83
D344	1,95
E237	2,00
E257	1,63
E287	2,20
F513	1,79
F553	1,27

Quadro E.1 Valores de IRI médio (2011 a 2014) medidos pela IP do Grupo 2

Secção	Valores Médios de IRI medidos pela IP (mm/m)
A609	2,87
A571	4,95
B028	2,76
B701	2,57
C307	2,44
C336	3,31
C474	2,84
C528	5,24
C591	2,30
D365	2,27
E536	3,40
E708	2,66
G032	2,55

Anexo F

F – Valores obtidos na calibração realizada

Quadro F.1 Comparação entre os valores medidos pela IP e obtidos pelo modelo HDM-4 no Grupo 1

Secção	Valores Médios de IRI medidos pela IP (mm/m)	Valores Médios de IRI obtidos pelo HDM-4 (mm/m)
A025	1,73	1,89
B649	2,05	1,80
C137	1,47	1,55
C351	1,57	1,57
C326	1,76	1,97
C399	2,02	2,16
D280E	1,83	1,79
D344	1,95	1,83
E237	2,00	1,97
E257	1,63	1,56
E287	2,20	1,79
F513	1,79	1,68
F553	1,27	1,55

Quadro F.1 Comparação entre os valores medidos pela IP e obtidos pelo modelo HDM-4 no Grupo 1

Secção	Valores Médios de IRI medidos pela IP (mm/m)	Valores Médios de IRI obtidos pelo HDM-4 (mm/m)
A571	4,95	5,32
A609	2,87	2,73
B028	2,76	3,20
B701	2,57	4,80
C307	2,44	2,50
C336	3,31	2,90
C474	2,84	5,38
C528	5,24	5,16
C591	2,30	2,46
D365	2,27	2,24
E536	3,40	2,93
E708	2,66	2,85
G032	2,55	2,61

Anexo G

G – Fendilhamento medido pela IP

Quadro G.1 Valores de Fendilhamento médio (2011 a 2014) medidos pela IP com nível de IRI médio menor a intermédio

Secção	Valores de Fendilhamento medidos pela IP (%)
A025	45
B649	1
C137	5
C326	9
C351	0
C399	42
D280E	0
D344	1
E237	6
E257	42
E287	42
F513	34
F553	0

Quadro E.2 Valores de Fendilhamento médio (2011 a 2014) medidos pela IP com nível de IRI médio maior

Secção	Valores de Fendilhamento medidos pela IP (%)
A571	82
A609	10
B028	22
B701	79
C307	2
C336	94
C474	96
C528	57
C591	9
D365	1
E536	2
E708	7
G032	16

Anexo H

H – Rodeiras médias medidas pela IP

Quadro H.1 Valores de Rodeira média (2011 a 2014) medidos pela IP com nível de IRI médio menor a intermédio

Secção	Valores de Rodeira medidos pela IP (%)
A025	6,50
B649	3,10
C137	1,59
C326	1,80
C351	1,70
C399	6,40
D280E	7,92
D344	8,33
E237	9,00
E257	5,11
E287	3,00
F513	2,76
F553	2,00

Quadro H.2 Valores de Rodeira média (2011 a 2014) medidos pela IP com nível de IRI médio menor a intermédio

Secção	Valores de Rodeira medidos pela IP (%)
A571	8,40
A609	3,26
B028	3,00
B701	3,50
C307	3,60
C336	4,75
C474	3,30
C528	9,49
C591	4,52
D365	2,52
E536	4,75
E708	4,70
G032	2,33