



João Miguel Rodrigues da Costa Veiga

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Modelos de previsão de deformação
permanente de pavimentos rodoviários**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar
Micaelo, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e
Tecnologia

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Valter José da Guia Lúcio

Arguente: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma

Vogal: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo



[Janeiro 2013]

RESUMO

As rodeiras são o resultado das deformações permanentes nas diversas camadas do pavimento por acção do tráfego. Esta degradação afeta a qualidade e a segurança de circulação.

Uma das degradações que mais afetam o bom desempenho dos pavimentos é a formação de rodeiras que resultam da deformação permanente das camadas constituintes dos pavimentos. Este estudo faz uma análise dos modelos de previsão de deformação permanente, conclui sobre os seus resultados e afere sobre a sua aplicabilidade no território nacional.

Pretende-se com este estudo analisar o estado de arte dos modelos de previsão da evolução da deformação permanente em pavimentos rodoviários.

Neste estudo implementaram-se vários modelos de previsão de rodeiras (Paterson, HDM-III, HDM-4, Pavenet, Rilem, Austroads e AASHTO) a 6 estruturas de pavimento do manual de pré-dimensionamento de pavimentos para a rede rodoviária nacional.

Para os tipos de estrutura de pavimento considerados verifica-se que o modelo HDM-4 é o que prevê valores mais elevados de profundidade de rodeiras. Além disto, verifica-se que os modelos Rilem, Pavenet, HDM III, AASHTO e AUSTROADS apresentam um perfil de distribuição e valores de profundidade semelhantes em todos os tipos de estrutura de pavimento considerados. O modelo Paterson é o que prevê valores de profundidade de rodeira mais baixos de todos os modelos estudados.

Palavras-chave: Pavimentos rodoviários, Patologias, Deformação permanente, Modelos de previsão, Gestão de Pavimentos.

ABSTRACT

Rutting is the result of deformations on the pavement layers, caused by traffic. This distress affects seriously the quality and safety of the traffic circulation.

The aim of this study was to analyze the state of the art of rutting evolution prediction models to road pavements.

In this study, several prediction rutting models were implemented (Paterson, HDM-III, HDM-4, Pavenet, Rilem, AASHTO and Austroads) to six pavement structures of MACOPAV.

The HDM-4 model predicts the highest rut depth values for the analyzed pavement structures. The Rilem, Pavenet, HDM-III, AASHTO and Austroads models give similar distribution profiles and rut depth values for all pavement structures. Differently, the Paterson model predicts the lowest rut depth values among all studied models.

KEY WORDS: Road Pavements, Pathologies, Permanent Deformation, Prediction Models, Pavement Management

DEDICATÓRIA

À memória de minha Avó pela grande participação na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado sob orientação do Doutor Rui Micaelo, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A ele quero agradecer o interesse constante, o acompanhamento permanente, a disponibilidade e paciência despendidas e todos os conhecimentos transmitidos. Sem todo o seu apoio, a realização deste trabalho não teria sido possível.

Ao Eng.º Luís Quaresma, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pelo esclarecimento de algumas dúvidas.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio e incentivo que sempre me facultaram para a concretização dos meus objetivos, não só nesta fase final da minha formação superior, mas também ao longo de toda a minha vida académica e pessoal.

À Cátia por todos os conselhos, sabedoria, incentivos e por todo o carinho e serenidade que me transmitiu.

SÍMBOLOS

a - Constante

ano - Idade da construção definida como o tempo desde a última intervenção, reconstrução ou atividade de construção nova

ACAa - Área total de fendilhamento no início do ano em análise

ACWa - Área total de fendilhamento de maior largura no início do ano em análise

ACXa - Área total de fendilhamento associado no início do ano em análise

b - Constante

B - Deflexão máxima da viga Benkelman para o pavimento existente

C^e - Coeficiente estrutural da camada

C^d - Coeficiente de drenagem da camada

CBR - *California Bearing Ratio*

CDS - Indicador de defeitos de construção

COMP - Compactação relativa média

D - Profundidade de metade da subcamada abaixo da fronteira entre subcamadas

DL – tempo de vida considerado em projeto para o pavimento

E - Módulo de deformabilidade

E_r - Módulo resiliente

E^* - Módulo de deformabilidade dinâmico

ESAL - Número máximo de ciclos do eixo padrão de 80kN

GWT - Altura do nível freático

H - Espessura da subcamada betuminosa

h^i - Profundidade da subcamada i

H_{HMA} - Profundidade total das camadas betuminosas e granulares

HS - Espessura das camadas betuminosas

IRI - *International Roughness Index* (Índice de Irregularidade Internacional)

k_{rst} - Fator de calibração

k_{rid} - Fator de calibração

k_{rpd} - Fator de calibração

k_z - Fator de confinamento de profundidade

me - Despesa anual de manutenção do pavimento

N_{80t} - Número equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t

Precip - Precipitação média mensal

Sh - Velocidade dos veículos pesados

SN - Número estrutural do pavimento

SNC - Número estrutural modificado do pavimento

SNC_0 - Número estrutural modificado do pavimento para a idade age=0

SNSG - Coeficiente de contribuição da fundação para o número estrutural do pavimento

T - Temperatura a metade da profundidade da subcamada

Tl_i - Índice de mistura Thornthwaite, no tempo *i*

TT_c - Número de veículos pesados

W_C - Percentagem de água do material

β - Propriedade dos materiais

β_1 - Fator de calibração para materiais granulares e fundação

δ_a - Deformação permanente da camada

Δ_p - Deformação permanente acumulada em cada subcamada

ΔCX_d - Incremento de área de fendilhamento associado devido à deterioração do pavimento

ΔR_{crk} - Incremento da profundidade da rodeira devido à deformação estrutural sem fendilhamento

ΔR_{nocrk} - Incremento da profundidade da rodeira devido à deformação estrutural com fendilhamento

ΔR_{pd} - Incremento de profundidade das rodeiras, como resultado da deformação plástica nas camadas betuminosas

ΔR_{st} - Incremento de profundidade das rodeiras, como resultado da degradação estrutural do pavimento

ε_0 - Propriedade dos materiais

ε_p - Deformação plástica acumulada em cada camada

ε_r - Extensão elástica residual

ε_v - Tensão vertical resiliente média

μ - Coeficiente de Poisson

ρ - Propriedade dos materiais

σ_x - Tensão normal na direção x, aplicada no meio da camada

σ_y - Tensão normal na direção y, aplicada no meio da camada

σ_z - Tensão normal na direção z, aplicada no meio da camada

ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

AUSTROADS – Association of Australian and New Zealand road transport and traffic authorities

C-SHRP - *Canadian Strategic Highway Research Program*

EP - Estradas de Portugal

HDM-III– *Highway Design and Maintenance Model III*

HDM-4 – *Highway Design and Maintenance Model 4*

Hips - Highway Investment Programming System

HPMS - Highway Performance Monitoring System

HVS - *Heavy Vehicle Simulator*

JAE - Junta Autónoma de Estradas

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LTPP – Long Term Pavement Performance

LTPPM – Long Term Pavement Performance Maintenance

MACOPAV - Manual de Conceção de Pavimentos

PMS - *Pavement Management System*

RILEM -*Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions*

SIGPAV - Sistema de informação geográfica aplicado na gestão da conservação da rede rodoviária municipal

UKPMS - *United Kingdom Pavement Managent System*

WSPMS - *Washington Pavement Managent System*

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
ÍNDICE DE QUADROS.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Enquadramento.....	15
1.2 Objetivos e metodologia.....	16
1.3 Estrutura do trabalho.....	17
2. DEGRADAÇÕES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	19
2.1 Pavimentos.....	19
2.2 Patologias.....	20
2.2.1 Tipos e famílias.....	21
2.2.2 Processo de degradação.....	23
2.3 Deformações permanentes.....	24
2.3.1 Pressupostos.....	24
2.3.2 Tipos de deformação permanente.....	24
2.3.3 Causas e Consequências.....	25
2.3.4 Observação – Procedimentos de Medida e Quantificação.....	29
2.3.5 Valores limite e níveis de severidade.....	30
3. MODELOS DE PREVISÃO DE RODEIRAS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	31
3.1 Introdução.....	31
3.2 Análise individual dos modelos.....	35
3.2.1 Modelo de Paterson.....	35
3.2.2 Modelo HDM-III.....	37
3.2.3 Modelo HDM-4.....	39
3.2.4 Modelo de RILEM.....	43
3.2.5 Modelo Pavenet.....	44
3.2.6 Modelo Austroads.....	44
3.2.7 Modelo AASHTO.....	46
4. CASO DE ESTUDO E RESULTADOS.....	51
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
APÊNDICES.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Constituição de uma estrutura tipo de um pavimento rodoviário [9].....	19
Figura 2. 2 - Evolução das Rodeiras [36].	23
Figura 2. 3 - Diferentes causas de deformação de rodeiras e suas consequências [6].....	25
Figura 2. 4 - Perfis superficiais transversais de rodeiras devido a diferentes origens de deformação permanente.	28
Figura 2. 5 - Representação esquemática de cavados de rodeira resultante da passagem de rodados [16].	30
Figura 3.1 - Fluxograma do modelo de rodeiras HDM-4.	41
Figura 3.2 - Aproximação da deformação permanente [48].....	49
Figura 4.1 - Resultados para a combinação T5F3P4.....	52
Figura 4.2 - Resultados para a combinação T3F3P9.....	54
Figura 4.3 - Resultados da combinação T1F3P14.....	56
Figura 4.4 - Resultados para a combinação T5F2P7.....	58
Figura 4.5 - Resultados para a combinação T3F2P13.....	60
Figura 4.6 - Resultados para a combinação T1F2P16.....	62
Figura 4.7 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.	64
Figura 4.8 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 9 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.	64
Figura 4.9 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 15 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.	65
Figura 4.10 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 25 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.	65
Figura 4.11 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 13 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.	68

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Famílias e tipos de degradações [3].....	22
Quadro 2.2 - Efeito da variação de alguns fatores no comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas [18].....	26
Quadro 2.3 - Classificação das relações entre as rodeiras e os fatores de degradação (adaptado de [10]).	29
Quadro 3.1 - Classificação dos modelos de comportamento [10].....	32
Quadro 3.2 - Exemplos de modelos de previsão de comportamento [30].....	33
Quadro 3.3 - Exemplos de modelos de previsão de comportamento [30] (continuação).....	33
Quadro 3.4-Valores das variáveis (adaptado de [44]).	46
Quadro 4.1 - Dados dos pavimentos [39].	51
Quadro 4.2- Profundidades previstas a 20 anos - T5F3P4.....	52
Quadro 4.3 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T5F3P4.....	53
Quadro 4.4 - Profundidades previstas a 20 anos – T3F3P9.	54
Quadro 4.5 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T3F3P9.....	55
Quadro 4.6 - Profundidades previstas a 20 anos - T1F3P14.	56
Quadro 4.7 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T1F3P14.....	57
Quadro 4.8 - Profundidades previstas a 20 anos - T5F2P7.	58
Quadro 4.9 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T5F2P7.....	59
Quadro 4.10 - Profundidades previstas a 20 anos - T3F2P13.	60
Quadro 4.11 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T3F2P13.....	61
Quadro 4.12 - Profundidades previstas a 20 anos - T1F2P16.	62
Quadro 4.13 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T1F2P16.....	63

Quadro A.1 - Dados de misturas betuminosas.	79
Quadro A.2 - Dados de camadas granulares.	79
Quadro A.3 - Dados de fundação tipo 3.	80
Quadro A.4 - Dados da fundação tipo 2.	80

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

“Os sistemas de Transportes e as suas infraestruturas, as vias de comunicação e os veículos, constituem hoje uma área estratégica de primordial importância na economia mundial, fortemente marcada por uma progressiva evolução tecnológica sustentada pelos métodos mais avançados de investigação” [1].

O aumento de volume de tráfego rodoviário que se tem verificado nas redes viárias de todo o mundo está diretamente associado ao aumento das exigências funcionais dos pavimentos rodoviários, nomeadamente a segurança e o conforto de circulação. Essas características sofrem uma degradação ao longo do tempo, devido não só ao fator intensidade do tráfego, que induz esforços na zona de ação dos rodados no pavimento, mas devido também aos agentes atmosféricos (as temperaturas elevadas no caso de Portugal).

Uma das degradações mais influentes nas características funcionais dos pavimentos é a deformação permanente. As deformações permanentes apesar de se manifestarem apenas na parte superficial do pavimento ocorrem nas camadas betuminosas, nas camadas granulares e na fundação do pavimento, e traduzem-se sob a forma de cavados de rodeiras, definidos como deformações transversais que se estendem longitudinalmente na zona de percurso dos pneus dos veículos.

O aumento da profundidade das rodeiras contribui para um decréscimo de segurança e de conforto de circulação, assim como contribui também para um maior desgaste dos veículos. O aparecimento desse tipo de degradação prejudica também a capacidade de drenagem do pavimento, favorecendo a acumulação de água e reduzindo a aderência pneu/pavimento, com repercussões a nível da segurança de circulação. Torna-se assim essencial, que durante a vida útil de um pavimento se consiga controlar as deformações permanentes, nomeadamente no que a profundidade de rodeiras diz respeito, avaliando a suscetibilidade dos pavimentos à deformação permanente, a fim de se conseguir manter as características funcionais e estruturais dos pavimentos.

A gestão das infraestruturas rodoviárias é feita através de Sistemas de Gestão de Pavimentos, que incluem o planeamento e implementação de ações de conservação e reabilitação. Este sistema através de uma ação estratégica, de modo sistemático e organizado mantém e

melhora as condições dos pavimentos rodoviários e retarda a sua futura degradação [2].O desenvolvimento desta estratégia é suportado por informação rodoviária fiável e atualizada permitindo a análise dos dados de caracterização do estado da rede e o desenvolvimento de estratégias de conservação/reabilitação, considerando determinados padrões de qualidade da rede ou os recursos financeiros disponíveis [3].

A primeira geração de Sistemas de Gestão de pavimentos estava essencialmente preocupada com os aspetos técnicos da condição do pavimento. Mais tarde, os modelos de previsão foram incluídos e também os aspetos económicos ganharam importância [4].

Os modelos de previsão são um elemento chave nos Sistemas de Gestão de Pavimentos. Ao nível da rede são utilizados para prever a condição futura das estradas. Ao nível de projeto, são utilizados para a avaliação de alternativas económicas de projeto (reconstrução, reabilitação, manutenção) com o objetivo de encontrar a solução economicamente mais rentável para as mesmas [5].

A deformação permanente é uma degradação frequente dos pavimentos rodoviários flexíveis para a qual não existem metodologias que prevejam o seu aparecimento [6].

Não existem também ainda metodologias implementadas que permitam impedir as deformações permanentes nas camadas granulares ou na fundação [7].Contudo, foram surgindo nos últimos 30 anos alguns modelos de previsão com diferentes considerações, e que dão origem a resultados de previsão diferentes.

Apesar dos dados poderem não ser suficientemente detalhados para o desenvolvimento de modelos, eles podem formar uma excelente fonte para validação dos modelos desenvolvidos por outras metodologias de avaliação de desempenho. A monitorização da rede é desta forma, um elemento essencial na gestão de pavimentos [8].

1.2 Objetivos e metodologia

Com este trabalho pretende-se fazer a análise do estado do conhecimento no que se refere à deformação permanente em pavimentos rodoviários, e servir de base para uma metodologia de avaliação e previsão do comportamento dos pavimentos rodoviários, a fim de minimizar, por um lado, os custos de manutenção geral e as despesas de reabilitação ao longo do período de vida útil de um pavimento e por outro, minimizar os custos para o utilizador da rede

rodoviária. Essa metodologia de avaliação baseia-se nos modelos de previsão, e pretende-se avaliar as suas capacidades, individualmente e comparativamente, através do desenvolvimento dos resultados e concluir sobre a sua aplicabilidade e potencialidade para a rede nacional.

A investigação desta dissertação iniciou-se com o estudo do estado da arte das deformações permanentes, nomeadamente o modo de quantificação, qualificação e caracterização. Posteriormente fez-se uma pesquisa e levantamento de modelos de previsão de deformação permanente em pavimentos rodoviários. Analisou-se cada um dos modelos levantados e avaliou-se à sua aplicabilidade em Portugal. Relativamente aos dados necessários para utilização nos modelos, recorreu-se a diferentes bases de dados tais como a do Instituto Português de Meteorologia e da Estradas de Portugal. As estruturas de pavimento flexíveis do MACOPAV são utilizadas como suporte à metodologia de comparação dos modelos que se pretendeu realizar. Analisaram-se os resultados, singular e comparativamente, e obtiveram-se as respetivas conclusões.

1.3 Estrutura do trabalho

O documento é constituído por cinco capítulos, que ilustram as diferentes fases de elaboração deste estudo.

No capítulo 2 apresenta-se de forma simples a engenharia dos pavimentos rodoviários, nomeadamente algumas definições, funções, tipologia, degradações. Descreve-se em pormenor as deformações permanentes em pavimentos rodoviários. Analisam-se as causas e consequências desta patologia, assim como os fatores que influenciam o seu comportamento e de que forma o fazem.

No capítulo 3 apresentam-se os modelos de previsão de deformação permanente (introdução histórica, finalidade, apresentação de dados e de variáveis incluindo unidades) considerados no estudo.

No capítulo 4 faz-se uma análise dos modelos de previsão das deformações permanentes através da implementação dos modelos a um conjunto de estruturas tipo de pavimentos flexíveis.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e propostas para investigações futuras.

2. DEGRADAÇÕES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

2.1 Pavimentos

Segundo a especificação do LNEC E1 (Vocabulário de estradas e aeródromos) de 1962, [1]“Pavimento é a parte da estrada, rua ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respetivas solicitações à infraestrutura: terreno, obras de arte, etc. Pode ser constituído por uma ou mais camadas tendo, no caso geral, uma camada de desgaste e camadas de fundação. Cada uma destas camadas pode ser compostas e constituídas por camadas elementares.”

A Figura 2.1 esquematiza a estrutura tipo de um pavimento rodoviário.

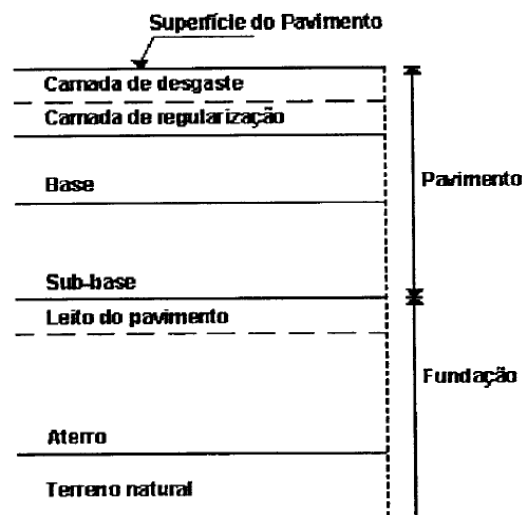


Figura 2. 1 - Constituição de uma estrutura tipo de um pavimento rodoviário [9].

Exige-se de um pavimento rodoviário que constitua uma superfície de rolamento livre e desempenhada, destinada a permitir a circulação de veículos em condições de segurança, conforto e economia. Para garantir essas condições, é necessário que a superfície dos pavimentos possua determinadas características denominadas como funcionais, nomeadamente, regularidade geométrica, aderência e capacidade de drenagem de águas superficiais, entre outras.

A resistência à derrapagem, a visibilidade, a projeção de água e o suporte regular são características necessárias para garantir a segurança de circulação. As características de conforto são: o conforto acústico, ótico e as vibrações do pavimento.

A nível de economia, exige-se se um pavimento que tenha as condições indicadas para que o desgaste do veículo, o consumo de combustível e o tempo de viagem sejam o mínimo possível.

As condições de serviço de uma estrutura de um pavimento devem ser asseguradas aquando da execução do seu projeto. Nessa fase, deve ser garantido que ao longo da vida útil de um pavimento, não se atinjam estados de ruína tais que ponham em causa as condições de serviço.

2.2 Patologias

A degradação de um pavimento inicia-se logo após a sua construção, devido à contribuição dos agentes atmosféricos, que o afetam mesmo sem haver circulação. Assim que o pavimento entra em serviço e os primeiros veículos começam a circular sobre a superfície, as degradações agravam-se.

No decorrer da vida útil de um pavimento, este está sujeito a diversos processos de degradação que têm como consequência a perda da qualidade estrutural ou funcional do pavimento.

As características funcionais de um pavimento são condicionadas essencialmente pela sua superfície. O acabamento da superfície e os materiais que nela são aplicados influenciam significativamente aspetos importantes e preocupantes para os utilizadores, tais como [12]:

- A aderência entre o pneu e o pavimento;
- A projeção de água em tempo de chuva;
- O desgaste dos pneus;
- O ruído no exterior e no interior do veículo;
- A comodidade e a estabilidade durante a circulação;
- As ações dinâmicas do tráfego;
- A resistência ao rolamento (economia de combustíveis);
- O desgaste dos veículos;
- As propriedades óticas.

Quanto às degradações estruturais, estas podem resultar de um mau dimensionamento, excesso de volume de tráfego e cargas, fraca capacidade de drenagem, materiais mal seleccionados ou mal aplicados. Podem também estar associadas a uma má ligação entre a camada superficial e o resto do pavimento, o que pode levar à derrapagem [13].

2.2.1 Tipos e famílias

Um pavimento flexível apresenta ao longo da sua vida uma evolução que, em geral, se traduz no aparecimento de uma vasta diversidade de degradações as quais contribuem para uma contínua redução da qualidade do pavimento [10].

Nos pavimentos flexíveis podem verificar-se o desenvolvimento de uma, de várias ou de todas as seguintes degradações [3]:

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

O Quadro 2.1 indica os tipos de degradações correspondentes aos grupos de famílias. As famílias das degradações dividem-se em deformações, fendilhamento, desagregação da camada de desgaste e movimento de materiais, e englobam cada uma delas vários tipos de degradações. As primeiras compreendem abatimentos longitudinais ou transversais, ondulação, rodeiras de grande ou pequeno raio e deformações localizadas.

Na família do fendilhamento existem os tipos pele de crocodilo de malha fina ou de malha larga e as fendas parabólicas, longitudinais, transversais e de fadiga. Já os tipos de degradação desagregação superficial, cabeça de gato, pelada e ninhos pertencem à família de degradação desagregação da camada de desgaste. Existem ainda a exsudação e a subida de finos que pertencem à família de movimento de materiais – Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Famílias e tipos de degradações [3].

Famílias de degradações	Tipos de degradações
Deformações	<p>Abatimento { Longitudinal { Berma Eixo Transversal</p> <p>Deformações localizadas Ondulação Rodeiras { Grande raio (camadas inferiores) Pequeno raio (camadas superiores)</p>
Fendilhamento	<p>Fendas { Fadiga Longitudinais { Eixo Berma Transversais Parabólicas</p> <p>Pele de crocodilo { Malha fina ($\leq 40\text{cm}$) Malha larga ($> 40\text{cm}$)</p>
Desagregação da camada de desgaste	<p>Desagregação superficial</p> <p>Cabeça de gato Pelada Ninhos (covas)</p>
Movimento de materiais	<p>Exsudação Subida de finos</p>

2.2.2 Processo de degradação

A evolução natural de qualquer degradação é no sentido do aumento do tráfego assim como da amplitude das condições atmosféricas. Por isto pode dizer-se que a degradação dos pavimentos aumenta com o tempo.

A Figura 2.2 exemplifica a evolução das rodeiras ao longo do tempo.

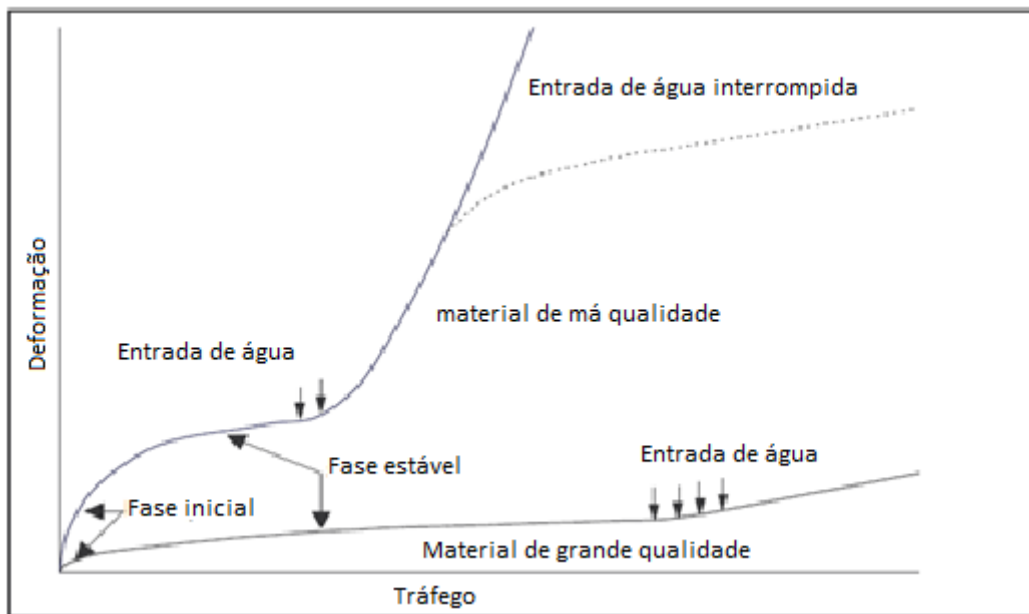


Figura 2. 2 - Evolução das Rodeiras [36].

O processo de evolução das degradações, aparentes ou não, apoia-se no “princípio da cadeia de consequências”, segundo o qual uma degradação não evolui isoladamente no tempo, antes dá origem a novos tipos de degradações, as quais por sua vez, interferem com as características das primeiras. Gera-se deste modo uma atividade em ciclo, onde as diferentes degradações interferem mutuamente [10].

O processo de degradação de um pavimento depende de dois grupos de fatores, os fatores passivos e os ativos. Os primeiros são característicos do pavimento construído, quer sejam a espessura das camadas, os materiais utilizados ou a qualidade da construção.

Os fatores ativos são os principais responsáveis pelo processo de degradação de um pavimento, nomeadamente as ações do tráfego e dos agentes climáticos.

2.3 Deformações permanentes

2.3.1 Pressupostos

Um desses estados de ruína é o aparecimento à superfície de depressões transversais na banda de passagem dos pneus dos veículos. A essa degradação dá-se o nome de rodeiras. As rodeiras são um dos tipos de degradação mais comum, e o mais significativo da família das deformações.

No verão, o desenvolvimento das deformações permanentes deve-se sobretudo ao facto de as altas temperaturas dessa altura do ano diminuírem a viscosidade do ligante betuminoso.

Por outro lado se no inverno a drenagem não for eficiente, a chuva também contribui para o aparecimento das rodeiras, uma vez que dessa forma a água pode atingir as várias camadas do pavimento, nomeadamente nas camadas granulares e fundação.

Tem-se também assistido a um aumento significativo do volume de tráfego de veículos pesados.

2.3.2 Tipos de deformação permanente

Dentro das deformações existem e distinguem-se de acordo com a sua origem, as seguintes [3]:

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

As rodeiras caracterizam-se como deformações transversais que se estendem longitudinalmente na zona de percurso dos pneus dos veículos. As deformações manifestam-se na camada superficial mas podem ter origem nas demais camadas do pavimento.

A rodeira é o resultado da deformação permanente induzida por carga permanente de um pavimento flexível. Dependendo da magnitude da carga e da força relativa das camadas do pavimento, a deformação permanente pode ocorrer na fundação, na base, na mistura betuminosa ou nas camadas granulares [15].

2.3.3 Causas e Consequências

Os diferentes tipos de camadas que constituem um pavimento têm também diferentes fatores causadores de ocorrência de deformação permanente.

Nas camadas ligadas, a deformação pode ocorrer por um lado devido à instabilidade das misturas betuminosas, que advém da utilização de materiais inadequados ou má execução da mistura betuminosa, e por outro devido às condições de serviço, quer sejam temperaturas elevadas, quer sejam as condições do tráfego, cargas excessivas e velocidade reduzida.

O comportamento mecânico das camadas betuminosas, e em particular no que se refere à deformação permanente, é afetado por diversos fatores, sendo de nomear a contribuição dos seguintes elementos [16]:

- i. Das propriedades dos vários constituintes das misturas (agregados, betume e eventuais aditivos);
- ii. Da composição das misturas betuminosas (proporções de betume e de cada fração de agregado), das características de compactidade e dos processos de compactação;
- iii. Das condições de serviço, nomeadamente a temperatura e as ações devidas ao tráfego.

A Figura 2.3 mostra três tipos de rodeiras que dependem do tipo de deformação antecedente.

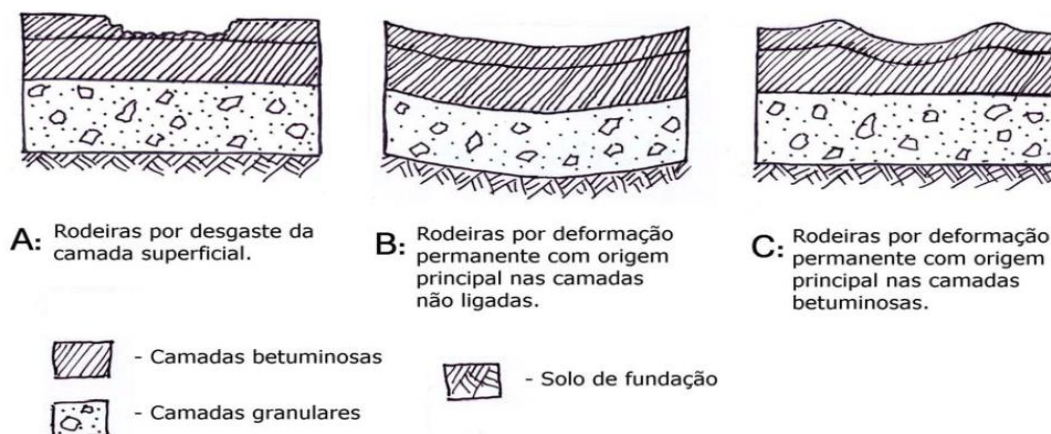


Figura 2. 3 - Diferentes causas de deformação de rodeiras e suas consequências [6].

No primeiro caso, a degradação da camada superficial é a causa da deformação do pavimento. Este desgaste ao longo da zona de passagem é devido a veículos equipados com pneus de

Inverno com pregos ou correntes de neve que são bastante agressivos para o pavimento, pelo que este tipo de deformação só existe em países de clima frio [17]. No segundo caso, é a deformação da fundação que causa as rodeiras. A deformação que se verifica nas outras camadas do pavimento é induzida, isto é, as outras camadas acompanham o movimento de deformação proveniente da fundação. No terceiro caso, as rodeiras são causadas pela deformação da camada betuminosa, em que a camada superficial e a parte superior da camada betuminosa são as que mais influencia a deformação total do pavimento.

O Quadro 2.2 mostra, resumidamente, as características das misturas betuminosas que influenciam o seu comportamento no que à deformação permanente diz respeito.

Quadro 2.2 - Efeito da variação de alguns fatores no comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas [18].

Fator		Varição observada	Efeito na deformação
Agregado	Textura superficial	Lisa a rugosa	Diminui
	Granulometria	Descontínua a contínua	Diminui
	Forma	Rolado a britado	Diminui
		Lamelar a cúbico	Diminui
Dimensão máxima	Aumento	Diminui	
Betume	Rigidez (a)	Aumento	Diminui
Mistura Betuminosa	Teor em betume	Aumento	Aumenta
	Porosidade	Aumento	Aumenta (b)
	VMA	Aumento	Aumenta (c)
	Processos de compactação	(d)	(d)
Condições de serviço	Temperatura	Aumento	Aumenta
	Carga por roda	Aumento	Aumenta
	Pressão dos pneus	Aumento	Aumenta
	Número de aplicações de carga	Aumento	Aumenta
	Teor em água	Seco a húmido	Aumenta (e)
	Velocidade de aplicação da carga	Aumento	Diminui

LEGENDA:

VMA – volume de vazios na mistura de agregados;

(a) Refere-se à rigidez do betume correspondente à temperatura para a qual a aptidão para a formação de cavados de rodeira é determinante. A utilização de betumes modificados aumenta o módulo de rigidez do betume para as temperaturas críticas, diminuindo assim a suscetibilidade à deformação permanente;

(b) Quando a porosidade das misturas é da ordem de 3 a 4%, ou inferior, a uma diminuição da porosidade corresponde um aumento da propensão para deformações permanentes;

(c) Valores de VMA muito baixos, inferiores a 10%, deverão ser evitados;

(d) O processo de compactação, quer em laboratório, quer em obra, influencia a estrutura do esqueleto mineral da mistura betuminosa, pelo que o comportamento à deformação permanente é afetado;

(e) No caso de a mistura betuminosa ser sensível à água.

Nas camadas não ligadas ou granulares, a deformação surge com a ocorrência de tensões de valor superior às expectáveis. Esta diferença de valores pode surgir devido a um mau dimensionamento do pavimento ou a uma má avaliação da resistência dos materiais. A ocorrência dessas tensões faz com que as partículas do agregado sofram um movimento relativo.

Os perfis superficiais transversais das rodeiras dependem da camada que sofreu deformação permanente. É assim possível determinar quais as camadas que mais contribuíram para a deformação permanente com base no perfil superficial transversal do pavimento. Desta forma, pela análise da Figura 2.4, é possível concluir que no caso a) a deformação teve origem no solo, no caso b) na fundação e no caso c) a deformação deu-se na camada superficial.

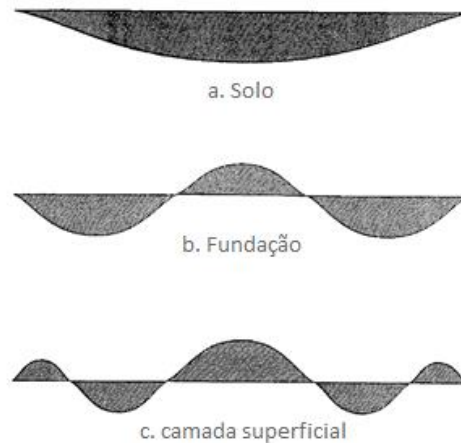


Figura 2. 4 - Perfis superficiais transversais de rodeiras devido a diferentes origens de deformação permanente.

Refira-se no entanto que na realidade dificilmente os perfis das rodeiras coincidem com os representados na Figura 2.4, já que todas as camadas podem contribuir para a formação das rodeiras. A Figura mostra apenas os perfis devidos à deformação de um só tipo de camada, individualmente.

As principais causas de degradação dos pavimentos flexíveis são a intensidade do tráfego, as ações climáticas e a deficiência dos materiais e da qualidade de execução.

A temperatura é um dos fatores mais influentes no comportamento à deformação permanente, muito devido à viscoelasticidade da camada betuminosa. As misturas betuminosas têm um comportamento viscoso quando submetidas a elevadas temperaturas e comportam-se como um sólido elástico a baixas temperaturas e apresentam um comportamento viscoelástico a temperaturas intermédias.

O Quadro 2.3 mostra a importância que os vários tipos de degradação têm na formação de rodeiras. Sendo que o símbolo três asteriscos significa uma relação causa-efeito mais forte, e o símbolo um asterisco representa uma relação menor. Assim, de acordo com o Quadro 2.3 os fatores de degradação que mais influenciam o desenvolvimento da profundidade das rodeiras são as condições de drenagem, a capacidade de suporte da fundação e a reduzida compacidade das camadas estruturais. A estes fatores seguem-se o sub-dimensionamento das camadas inferiores, a qualidade dos materiais, a agressividade do tráfego e as ações climáticas.

Por fim, os fatores que menos influenciam o desenvolvimento das rodeiras são as sub-dimensões da camada de desgaste e as deficiências de fabrico e execução.

Quadro 2.3 - Classificação das relações entre as rodeiras e os fatores de degradação (adaptado de [10]).

Degradação	Condições de drenagem	Sub-dimensões da camada de desgaste	Sub-dimensões das camadas	Capacidade de suporte da fundação	Qualidade dos materiais	Deficiências de fabrico e	Agressividade do tráfego	Ações climáticas	Camadas estruturais de reduzida compacidade
Rodeira	***	*	**	***	**	*	**	**	***

*** - Muito importante; ** - Importante; *- Pouco importante

O fenómeno das rodeiras é um dos principais perigos em termos de segurança rodoviária, no que a pavimentos flexíveis diz respeito. Uma vez formadas as rodeiras, a água da chuva fica retida, formando poças de água, reduzindo a capacidade de drenagem transversal da secção do pavimento, e aumentando o potencial de hidroplanagem. Portanto, sob a mesma condição geométrica da secção de pavimento (tais como a sua inclinação transversal), maiores níveis de profundidade de rodeira podem ser um factor na ocorrência de acidentes à chuva. Além disso, uma distorção excessiva da superfície do pavimento pode causar dificuldade para lidar com veículos ligeiros em altas velocidades[6].

2.3.4 Observação – Procedimentos de Medida e Quantificação

O cavado de rodeira é definido como o valor correspondente ao desvio máximo da superfície do pavimento, relativamente a uma reta definida por uma régua com determinado comprimento, assente sobre o pavimento [16].

A quantificação dos cavados de rodeiras consiste na diferença de cota entre a zona mais alta da sobrelevação lateral e a zona mais profunda da rodeira, expressa em milímetros, na secção de medição.

A medição é feita através de uma régua escalada em mm, tomando como referência outra régua apoiada na sobrelevação lateral da rodeira, ou através de um equipamento, transverso perfilógrafo [21].

A Figura 2.5 mostra a forma de medição da profundidade das rodeiras em dois perfis diferentes de cavados de rodeiras resultante do tipo de rodado que o atravessa: (a) rodado duplo; (b) rodado simples de base larga.

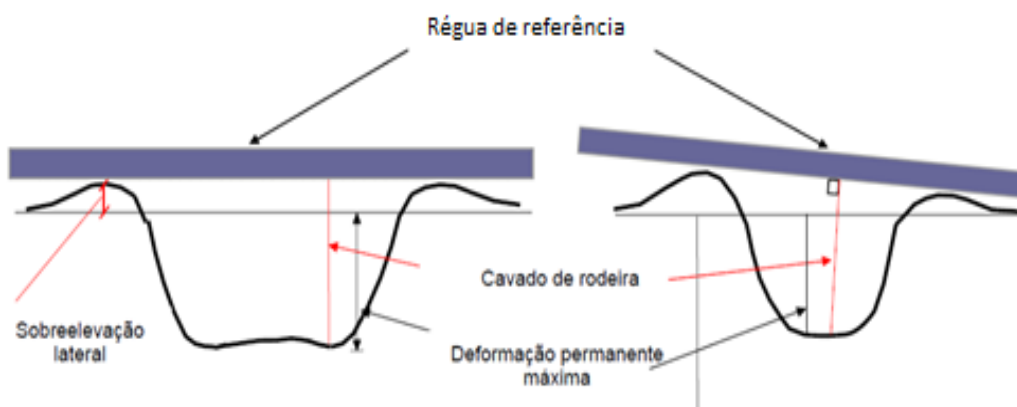


Figura 2. 5 - Representação esquemática de cavados de rodeira resultante da passagem de rodados [16].

2.3.5 Valores limite e níveis de severidade

Existem diferentes considerações quanto a níveis ou classes de severidade e valores limite.

Segundo Christensen e Ragnöy (2006), existem cinco níveis para a caracterização da profundidade das rodeiras: 0-4mm (Nível I); 4-9mm (Nível II); 9-15mm (Nível III); 15-25mm (nívelIV) e > 25mm (Nível V)[23].

Já de acordo com Ferreira, Meneses e Vicente (2009), os níveis de severidade são três: <10 mm; 10 mm a 30 mm e >30 mm, classificando-se como nível 1, 2 e 3 respetivamente [58].

A Estradas de Portugal define no Catálogo de degradações dos pavimentos rodoviários 3 classes de severidade para a profundidade das rodeiras: <10 mm (Classe I); 10 mm-20 mm (Classe II); e >20mm (Classe III). Esta entidade considera 20 mm um valor indicado para se proceder a uma intervenção no pavimento [57].

Para o desenvolvimento deste estudo é importante definir um valor de profundidade de rodeiras a partir do qual se considera necessário intervir.

Segundo Ferreira, Picado-Santos e Antunes, considera-se 20 mm de profundidade de rodeiras um valor de alerta [59]. Já de acordo com o *National Center of Asphalt Technology*, a profundidade das rodeiras não é considerado um grave problema até atingir o valor de 13 mm [22].

3.MODELOS DE PREVISÃO DE RODEIRAS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

3.1 Introdução

Prever o desempenho de um pavimento a longo prazo é, naturalmente, uma tarefa muito difícil devido à grande quantidade de variáveis e à sua natureza, variável ao longo da vida útil do pavimento. Além disso existe interdependência entre os vários tipos de degradações.

Tem-se verificado uma tentativa de criar modelos de previsão de degradações em pavimentos a fim de estimar a evolução dos principais mecanismos de degradação que participam ativamente na deterioração do pavimento, prejudicando as suas condições de serviço. A evolução tecnológica ao serviço do estudo dos pavimentos rodoviários tem facilitado a estimativa de algumas variáveis dos modelos.

Um modelo de previsão do comportamento dos pavimentos é uma representação matemática, que pode ser utilizada para a previsão do comportamento futuro dos pavimentos a partir do estado atual desses pavimentos, dos fatores de degradação e dos efeitos resultantes das ações de conservação [24].

De outra forma, modelos de previsão de desempenho são funções que relacionam as características do pavimento e suas condições atuais (estruturais, funcionais e de degradação superficial) à evolução com o tempo dos defeitos de superfície ou do nível de serventia, sob dadas condições climáticas e de tráfego a que o pavimento está submetido [25].

No que a deformações permanentes diz respeito, tem-se obtido resultados satisfatórios em pavimentos sem camadas granulares. A presença destas camadas leva a previsões sem a eficácia desejada. Isso porque a acumulação de deformações plásticas sob cargas repetidas em materiais granulares é altamente dependente do estado de tensões efetivas e estas são desconhecidas, na medida em que o processo de compactação de cada granular induz elevadas tensões horizontais residuais cuja estimativa é ainda incerta [25].

Os modelos de comportamento dos pavimentos podem classificar-se de acordo com os seguintes critérios: (i) nível de aplicação; (ii) tipo de variáveis dependentes; (iii) tipo de variáveis independentes; (iv) formato conceptual; (v) tipo de formulação [26].

O Quadro 3.1 mostra os critérios referidos e a forma como podem variar.

Quadro 3.1 - Classificação dos modelos de comportamento [10].

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

Verifica-se que quanto à aplicação dos modelos, estes podem classificar-se em modelos ao nível de projeto e modelos ao nível de rede [27]. Os primeiros servem para decidir tecnicamente acerca das ações alternativas de construção para trechos da rede. Quanto aos modelos ao nível de rede, estes servem para prever o estado futuro dos pavimentos, a fim de definir quais as necessidades de intervenção ao longo da vida útil do pavimento. Já ao nível do tipo de variáveis dependentes, verifica-se que se podem qualificar os modelos como modelos globais ou modelos paramétricos. Os primeiros expressam o estado do pavimento em termos globais, através de índices de degradação e de índices de condição ou de serviço, enquanto os segundos representam o estado do pavimento através de índices que representam os diferentes parâmetros de estado do pavimento [10]. Quanto às variáveis independentes, podem-se classificar os modelos como relativos ou absolutos. Os modelos relativos permitem prever o estado futuro do pavimento com base em parâmetros de estado (degradações, deflexão, irregularidade longitudinal, aderência), medidos ao longo da vida útil do pavimento, considerando apenas uma variável independente, o tempo, medido em anos de serviço, ou o tráfego suportado (número acumulado equivalente de eixos padrão). Quanto aos modelos absolutos, estes consideram várias variáveis independentes para estudar a evolução do pavimento, como a espessura das camadas, os módulos de deformabilidade, as características das misturas, o clima e o tráfego [8]. Os modelos de comportamento classificam-se de acordo com o respetivo formato conceptual em métodos mecanicistas ou teóricos, métodos experimentais ou empíricos e métodos empírico-mecanicistas que são uma combinação dos dois primeiros. Podem ainda classificar-se os modelos de comportamento em função do tipo de formulação, assim, existem os modelos determinísticos e os modelos probabilísticos. Os determinísticos indicam um valor para o parâmetro de comportamento correspondente a cada grupo de variáveis independentes do modelo. O modelo probabilístico, não só indica um valor esperado, que pode ser comparado com o valor previsto calculado a partir de um modelo

determinístico, como também indica as probabilidades de cada estado do pavimento, definido após um ou mais anos de deterioração [28].

A determinação do tipo de modelos consoante o tipo de formulação é importante, na medida em que a modelação da evolução da degradação segundo cada um destes princípios influenciará a estrutura do modelo [29].

O Quadro 3.2 e Quadro 3.3 mostram os diferentes tipos de modelos de previsão do comportamento dos pavimentos que são utilizados na gestão da conservação de pavimentos rodoviários por diferentes entidades rodoviárias.

Quadro 3.2 - Exemplos de modelos de previsão de comportamento [30].

SGP ou Estudo	Nível	Modelo	Técnica
Paterson	Rede e Projeto	Empírico-Mecanicista	Regressão
HDM-III Banco Mundial	Rede e Projeto	Empírico-Mecanicista	Regressão
HDM-4 Banco Mundial	Rede e Projeto	Determinístico Empírico-Mecanicista Relativo	Regressão
Rilem	Projeto	Empírico	Regressão
Austroads	Projeto	Mecanicista	Regressão
Pavenet	Rede	Empírico-Mecanicista	Regressão
AASHTO	Rede e Projeto	Empírico-Mecanicista	Regressão
EP Portugal	Rede Nacional	Determinístico	Regressão
UKPMS Reino Unido	Rede Nacional	Determinístico	Regressão
BELMAN Dinamarca	Rede Nacional e Municipal	Determinístico	Regressão
WSPMS Washington, EUA	Rede Estatal e Projeto	Determinístico: Empírico-Mecanicista Relativo	Regressão
Suécia	Rede	Determinístico: Relativo	Regressão

Quadro 3.3- Exemplos de modelos de previsão de comportamento [30] (continuação).

SGP ou Estudo	Nível	Modelo	Técnica
RoSyPMS	Rede Nacional e Municipal	Determinístico: Empírico-Mecanicista Relativo	Regressão
NevadaPMS EUA	Rede Estatal	Determinístico: Empírico-Mecanicista Relativo	Regressão
Estudo C-SHRP Canadá	Projeto	Determinístico: Empírico-Mecanicista Relativo/Absoluto	Regressão + Metodologia Bayesiana
SouthDakotaPMS EUA	Rede Estatal	Determinístico: Empírico-Mecanicista Relativo	Regressão + Metodologia Bayesiana
ArizonaPMS EUA	Rede Estatal	Probabilístico	Markov Homogéneo
OklahomaPMS EUA	Rede Estatal	Probabilístico	Markov Homogéneo
KansasPMS EUA	Rede Estatal	Probabilístico	Markov Homogéneo
AlaskaPMS EUA	Rede Estatal	Probabilístico	Markov Homogéneo
MicroPAVER EUA	Rede Estatal	Probabilístico	Markov Homogéneo
HIPS Finlândia	Rede Nacional	Probabilístico	Markov Homogéneo
GiRR França	Rede Nacional	Probabilístico	Markov Homogéneo
HPMS Hungria	Rede Nacional	Probabilístico	Markov Homogéneo
SIGPAV Portugal	Rede Municipal	Probabilístico ou Determinístico	Markov Homogéneo ou Regressão
Estudo Manitoba Canadá	Projeto	Probabilístico	Semi-Markov
Estudo Ontario Canadá	Rede Nacional	Probabilístico	Markov Homogéneo ou Regressão
Estudo Belgrado Jugoslávia	Rede Nacional	Probabilístico	Markov Homogéneo Não-Homogéneo

Existem duas abordagens para prever a profundidade das rodeiras como resultado da densificação e do fluxo plástico. A primeira abordagem é usada principalmente em procedimentos de projeto de pavimentação e limita a deformação abaixo de um limite "fracasso" especificado; esses modelos não são úteis para o cálculo de desempenho, devido à necessidade de prever, não o limite, mas a tendência das rodeiras, durante a vida útil do pavimento [31]. A segunda abordagem prevê a tendência das rodeiras, durante a vida de um pavimento, identificando a resposta de um pavimento para as ações de tráfego, ambiente e manutenção. Como tal, este segundo método é útil para previsões de desempenho do pavimento [32].

A utilização do *Heavy Vehicle Simulator* – HVS – [33], na década de 1980, na avaliação do comportamento de pavimentos mostrou que as deformações permanentes não podem ser tidas em consideração apenas pelo critério da extensão vertical no solo de fundação [16]. Torna-se assim premente uma melhor caracterização das propriedades dos materiais das misturas betuminosas e das camadas granulares em ensaios laboratoriais.

As primeiras metodologias de previsão da contribuição das camadas betuminosas para as deformações permanentes em pavimentos flexíveis, foram desenvolvidas e apresentadas em 1972 [34]. Desde então têm-se desenvolvido esforços no sentido de validar tais processos de previsão, por comparação com os resultados das observações efetuadas em trechos de pavimentos ou em pistas de ensaios. Com efeito, desde 1982 têm vindo a desenvolver-se estudos relativos à previsão das deformações permanentes em pavimentos flexíveis. Os trabalhos de investigação neste campo estão relacionados, quer com a caracterização do material, quer com o desenvolvimento de modelos de previsão de rodeiras [16].

Nos pontos seguintes apresentar-se-ão de forma mais detalhada as metodologias desenvolvidas para a previsão do comportamento à deformação permanente.

3.2 Análise individual dos modelos

3.2.1 Modelo de Paterson

Este modelo implementado no Brasil, no estado de Santa Catarina, foi desenvolvido por Paterson em 1987. Criou dois modelos que permitem prever a profundidade das rodeiras como resultado da densificação e fluxo plástico. A primeira aproximação era usada para procedimentos de projetos de pavimentação e limita a deformação abaixo de um limite especificado. Estes modelos não são úteis na modelação do comportamento do pavimento, devido à necessidade de prever, não o limite, mas a tendência das rodeiras durante o período

de vida do pavimento. A segunda aproximação prevê a tendência das deformações permanentes durante a vida útil do pavimento, identificando a resposta de um pavimento às ações do tráfego e clima [31]. Paterson utilizou misturas betuminosas com idade inferior a 10 anos, num clima ameno e com uma intensidade de precipitação de 1630mm/ano.

Assim, esta segunda aproximação, definida na equação (3.1) interessa para este estudo, no âmbito da previsão da evolução das deformações permanentes em pavimentos rodoviários. Essa evolução ao longo do tempo é prevista, segundo este modelo com base na idade do pavimento, na compactação das camadas do pavimento, no tráfego, no número estrutural modificado, na precipitação incidente e na quantidade área de pavimento fendilhada.

Considera-se este modelo como um modelo de gestão de pavimento com aplicação não ao nível de rede, mas ao nível de troço de rede.

Este modelo considera a viga Benkelman para medir a deflexão máxima do pavimento. O número estrutural modificado é relacionado com a deflexão máxima da viga Benkelman, de acordo com a equação (3.3). O número estrutural modificado é a evolução do número estrutural da AASHTO, que vai ser detalhado mais à frente, considerando a contribuição da fundação [35]. De salientar ainda, que este modelo não inclui uma variável que represente a profundidade das rodeiras no início da análise.

Deste modo,

$$R_t = age^{0,166} \cdot SNC^{-0,502} \cdot COMP^{-2,3} \cdot N_{80t}^{ERM} \quad (3.1)$$

$$ERM = 0,09 + 0,0384 \cdot B - 0,0009 \cdot RH + 0,00158 \cdot precip \cdot ACXa \quad (3.2)$$

$$SNC = 3,2 \cdot B^{-0,63} \quad (3.3)$$

Em que, *age* é a idade da construção, definida como o tempo desde a última intervenção, reconstrução ou atividade de construção nova, em anos; *SNC* é o número estrutural modificado do pavimento; *COMP* é a compactação relativa média ponderada pela espessura das camadas de base, sub-base e fundação, em percentagem; *N_{80t}* é o numero equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t (milhões ESAL / pista); *B* é a deflexão máxima da viga Benkelman para o pavimento existente, da superfície de ambos os rodados, para uma carga de 80kN por eixo padrão, 520kPa de pressão de pneus, e 30°C de temperatura média do asfalto, em mm; *RH* é o indicador de reabilitação do pavimento, em que *RH*=1 para pavimentos

muti-camadas e $RH=0$ nos restantes casos; *precip* é a precipitação média mensal, em m/mês; $ACXa=0$ para valores de área fendilhada menores que 6% e $ACXa=21,6$ para valores de área fendilhada maiores ou iguais a 6%; $ACAA$ é a área de todo o fendilhamento, no início do ano em análise, em percentagem da área total da faixa de rodagem; $ACWa$ é a área total do fendilhamento de maior largura no início do ano em análise, em percentagem de área total da faixa de rodagem.

Sabendo que este modelo utiliza condições, quer de tráfego, climáticas, tipos de pavimentos e de solos utilizados em estudos no Brasil, a sua aplicação na rede rodoviária portuguesa carece de uma calibração para as condições de Portugal.

3.2.2 Modelo HDM-III

Os modelos HDM – Highway Design Maintenance foram desenvolvidos pelo departamento de transportes do World Bank para responder às necessidades das autoridades rodoviárias, sobretudo em países desenvolvidos para avaliação de políticas, padrões e programas de projeto e manutenção de pavimentos rodoviários.

Este modelo simula o ciclo de profundidade de rodeiras de uma via, de um grupo de vias de características semelhantes, ou de uma rede inteira de vias pavimentadas.[36]. Também estima detalhadamente a deterioração do pavimento durante o ciclo de vida, e fornece racionais e consistentes critérios de decisão económicos para planeamento técnico [37].

Todos os tipos de superfície e base aplicam as mesmas relações para prever a progressão da profundidade de rodeiras. A média de profundidade das rodeiras não é utilizada como critério de intervenção de manutenção no HDM-III, mas é usado como um meio para estimar a variação da profundidade [38].

As expressões generalizadas desenvolvidas por Paterson (1987) foram modificados neste modelo HDM-III (não só para as deformações permanentes como para o fendilhamento) para permitir que o fendilhamento seja uma variável progressiva com a idade e para permitir que o modelo calcule a profundidade das rodeiras no primeiro ano para um pavimento novo, utilizando as mesmas variáveis [38].

Considera-se este modelo, à semelhança do modelo de Paterson como um modelo de gestão de pavimento com aplicação ao nível de troço de rede. Também foi testado sob as mesmas condições e merece a mesma conclusão no que à aplicabilidade em Portugal diz respeito.

Este modelo de deformações permanente criado pela *Highway Development and Management*, em 1987, ao contrário do modelo anterior (modelo de Paterson), que lhe serviu de base, é aplicado em duas fases, incluindo uma variável que represente a profundidade das rodeiras no início da análise, representada na equação (3.4).

Deste modo:

A média de profundidade das rodeiras no final do primeiro ano (admitindo, a profundidade das rodeiras no início do primeiro como zero),

$$R_0 = Krp[39800 \cdot SNC^{-0,502} \cdot COMP^{-2,30} \cdot N_{80ct}^{ERM}] \quad (3.4)$$

$$ERM = 0,09 + 0,0384 \cdot B - 0,0009 \cdot RH + 0,00158 \cdot precip \cdot ACX_a \quad (3.5)$$

O incremento anual subsequente na profundidade média das rodeiras como resultado da deterioração do pavimento:

$$\Delta R_t = Krp \cdot \frac{0,256 - 0,0009 \cdot RH + 0,0384 \cdot B + 0,00158 \cdot precip \cdot C_i}{AGE3} + 0,0219 \cdot precip \cdot \Delta CX_d \cdot \ln(MAX(1, age \cdot N_{80ct})) \cdot R_0 \quad (3.6)$$

Em que, R_0 é a média da profundidade das rodeiras no final do primeiro ano, em mm; ΔR_t é o aumento esperado de profundidade média das rodeiras, durante o ano de análise, devido deterioração do pavimento, em mm; Krp é o fator de utilizador específico para a progressão na profundidade das rodeiras (por defeito = 1); SNC é o número estrutural modificado do pavimento; $COMP$ é a compactação relativa média ponderada pela espessura das camadas de base, sub-base e fundação, em percentagem; N_{80ct} é o numero equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t (milhões ESAL/ pista); B é a deflexão máxima da viga Benkelman para o pavimento existente, da superfície de ambos os rodados, sob uma carga de 80kN por eixo padrão, 520kPa de pressão de pneus, e 30°C de temperatura média do pavimento, em mm; RH é o indicador de reabilitação do pavimento, em que $RH=1$ para pavimentos multicamadas e $RH=0$ nos restantes casos; $precip$ é a precipitação média mensal, em m/mês; C_i é a área total de fendilhamento associado, no início do ano em análise, em percentagem da área total da faixa de rodagem: = 0.62 ACAa + 0.39 ACWa; ACAa é a área de todo o fendilhamento, no início do ano em análise, em percentagem da área total da faixa de

rodagem; ACW_a é a área total do fendilhamento de maior largura no início do ano em análise, em percentagem da área total da faixa de rodagem; age é a idade da construção, definida como o tempo desde a última intervenção, reconstrução ou atividade de construção nova, em anos; ΔCX_d é a alteração esperada na área de fendilhamento associado devido à deterioração do pavimento no ano em análise, em percentagem da área total da faixa de rodagem.

Note-se que a precipitação tem um efeito sobre o modelo de deformação permanente, mas apenas quando há fissuras presentes. Assim, um aumento na profundidade das rodeiras, devido à precipitação não será modelado até que exista fendilhamento à superfície. [32].

O número AASHTO estrutural (SN), calculado pela equação (3.3), não inclui a contribuição da fundação, pois é considerada no processo de projeto do pavimento através do módulo de resiliência. Pelo contrário, os modelos HDM consideram uma diferente versão do número estrutural, o número modificado estrutural (SNC), calculado usando a equação (3.7), que tem em conta a contribuição da fundação, que é calculada usando a equação (3.8) [39].

$$SNC = 0,0396 \sum_{n=1}^N (H_n / 25,4) \cdot C_n^e \cdot C_n^d + SNSG \quad (3.7)$$

$$SNSG = 3,51 \log(CBR) - 0,85[\log(CBR)]^2 - 1,43 \quad SECBR \geq 3 \quad (3.8)$$

Em que, SN_t é o número estrutural do pavimento; H_n é a espessura da camada n ; C_n^e é o coeficiente estrutural da camada n ; C_n^d é o coeficiente de drenagem da camada n ; SNSG é o coeficiente de contribuição da fundação.

3.2.3 Modelo HDM-4

O HDM-4 é o sucessor do Modelo HDM-III do *World Bank Highway Design and Maintenance Standards*, que tem sido usado por várias agências rodoviárias de todo o mundo nos últimos 20 anos [39]. Da mesma forma, este modelo, foi testado nas mesmas condições que o seu antecessor.

Neste modelo HDM-4 apresentam-se as modificações feitas ao modelo anterior. Aqui é analisado detalhadamente cada parâmetro do modelo. Assim, as alterações ao modelo HMD-III de previsão de deformações permanentes, previstas para o novo modelo HDM-4 serão explicadas em seguida.

Considera-se este modelo como um modelo de gestão de pavimento com aplicação não ao nível de rede, mas ao nível de troço de projeto, devido ao vasto número de variáveis que o compõem e à abrangência da gama de valores dessas variáveis.

O modelo HDM-4 é baseado em quatro componentes da deformação permanente, sendo a profundidade total das rodeiras a qualquer momento a soma dos quatro componentes [40]:

- Densificação inicial;
- Deformação estrutural;
- A deformação plástica (limitado a camadas betuminosas);
- Uso de pneus com pregos.

O último ponto não é considerado neste trabalho uma vez que em Portugal não são utilizados esse tipo de pneus.

O fluxograma do modelo HDM-4 para deformações permanentes é apresentado na Figura 3.1.

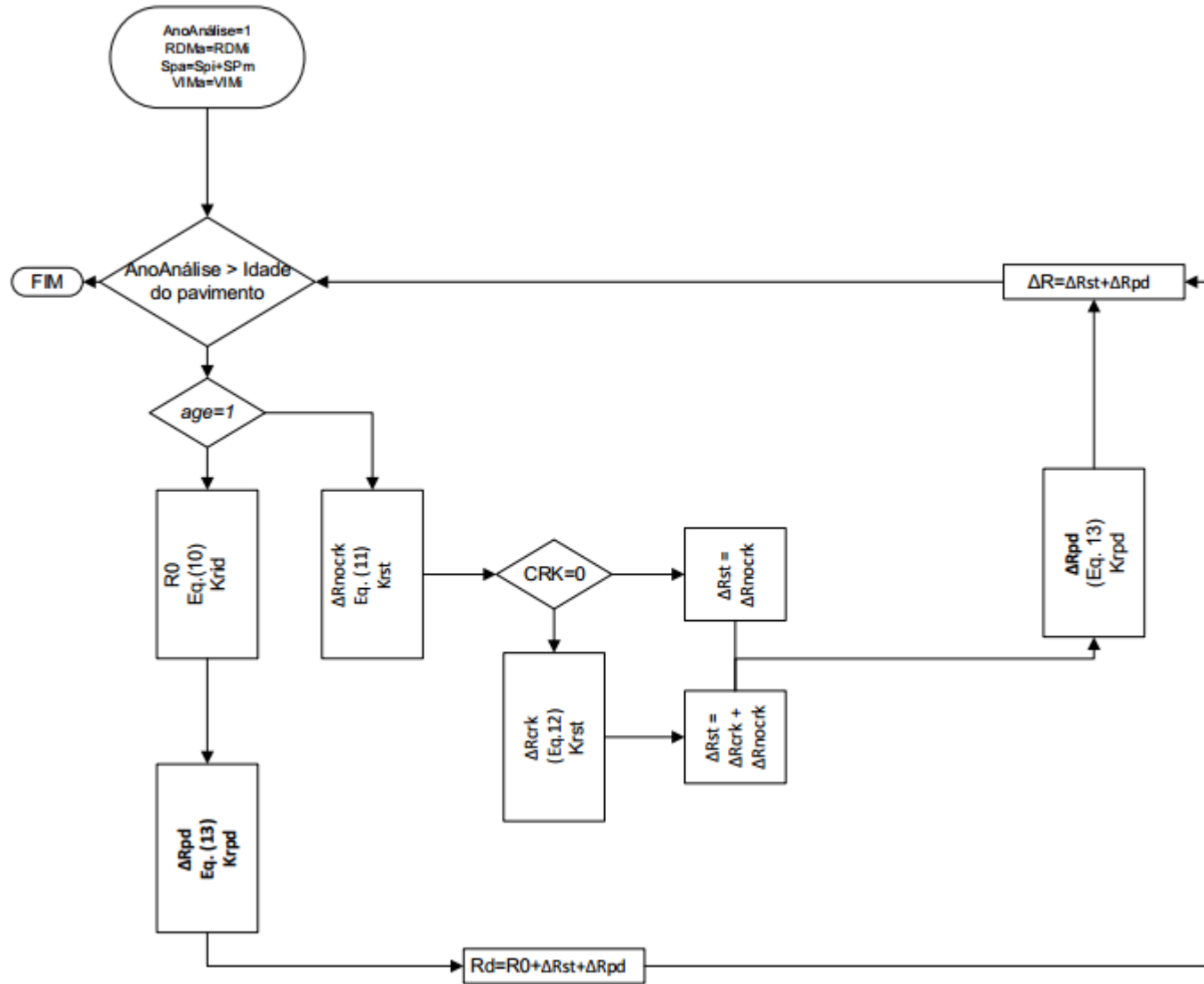


Figura 3.1 - Fluxograma do modelo de rodeiras HDM-4.

À semelhança do Modelo HDM-III do *World Bank Highway Design and Maintenance Standards*, também esta versão (HDM-4) utiliza um sistema de previsão de comportamento relativamente às deformações permanentes, aplicado em duas fases: A iniciação das deformações permanentes e a progressão destas (equação (3.9) [41]). Isto serve para incorporar melhorias, e para permitir a flexibilidade do modelo, que assim incorpora dois fatores separadamente, que contribuem para a profundidade das rodeiras, da seguinte forma:

$$R_d = R_0 + \Delta R_{st} + \Delta R_{pd} \quad (3.9)$$

Sendo que, R_d é a profundidade média prevista das rodeiras, em mm; R_0 é a consolidação inicial prevista, em mm, definida pela equação (3.10); ΔR_{st} é o incremento de profundidade das rodeiras, como resultado da degradação estrutural do pavimento, em mm, expressa na equação (3.11); ΔR_{pd} é o incremento de profundidade das rodeiras, como resultado da deformação plástica nas camadas betuminosas, em mm, demonstrado na equação (3.13).

$$R_0 = k_{rid} [51740 \cdot (N_{80ct} \cdot 10^6)^{0,09+0,0384 \cdot B} \cdot SNC_t^{-0,502} \cdot COMP^{a-2,30}] \quad (3.10)$$

Onde, N_{80t} é o número equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t (milhões ESAL / pista); B é a deflexão máxima da viga *Benkelman* para o pavimento existente, da superfície de ambos os rodados, sob uma carga de 80kN por eixo padrão, 520kPa de pressão de pneus, e 30°C de temperatura média do asfalto, em mm; SNC_t é o número estrutural médio anual ajustado do pavimento; $COMP$ é a compactação relativa média ponderada pela espessura das camadas de base; k_{rid} é um coeficiente de calibração [42].

O cálculo da deformação estrutural toma duas formas diferentes, consoante existe, ou não fendilhamento no pavimento. A equação (3.11) calcula o incremento de profundidade das rodeiras, como resultado da degradação estrutural do pavimento quando o fendilhamento é igual a zero.

ΔR_{nocrk} é o incremento de profundidade da rodeira devido à deformação estrutural, sem fendilhamento, em mm – equação (3.11).

$$\Delta R_{nocrk} = K_{rst} (44950 \cdot SNC_t^{-1,14} \cdot N_{80ct}^{0,11} \cdot COMP^{-2,30}) \quad (3.11)$$

Em que, K_{rst} é um coeficiente de calibração do modelo (por defeito, considera-se = 1) [42]; SNC_t é o número estrutural médio anual ajustado do pavimento calculado na equação (3.7); N_{80t} é o número equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t (milhões ESAL / pista); COMP é a compactação relativa média ponderada pela espessura das camadas de base.

A equação (3.12) calcula o incremento de profundidade das rodeiras, como resultado da degradação estrutural do pavimento quando o fendilhamento é superior a zero.

$$\Delta R_{crk} = K_{rst}(0,0000248 \cdot SNC_t^{-0,84} \cdot N_{80c_t}^{0,14} \cdot precip^{1,07} \cdot ACX_a^{1,11}) \quad (3.12)$$

Onde, $\Delta R_{wthtcrk}$ é o incremento de profundidade da rodeira devido à deformação estrutural, com fendilhamento, em mm; K_{rst} é um coeficiente de calibração do modelo (por defeito, considera-se = 1) [42]; SNC_t é o número estrutural médio anual ajustado do pavimento calculado na equação (3.7); N_{80t} é o número equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t (milhões ESAL / pista); $precip$ é a precipitação média mensal, em m/mês; ACX_a é a área total de fendilhamento associado, no início do ano em análise, em percentagem da área total da faixa de rodagem.

$$\Delta R_{pd} = k_{rpd} \cdot 0,3 \cdot CDS^{3,27} \cdot N_{80c_t} \cdot Sh^{-0,78} \cdot HS^{0,71} \quad (3.13)$$

Em que, k_{rpd} é um coeficiente de calibração (por defeito, considera-se = 1); CDS é um indicador de defeitos de construção ($CDS=1$); Sh é a velocidade dos veículos pesados, em Km/h (foi considerado 60Km/h); HS é a espessura das camadas betuminosas, em mm.

Os coeficientes de calibração por definição tomam o valor de 1.

Assim como os modelos anteriores, para aplicar este modelo à rede rodoviária portuguesa é necessário efetuar uma calibração do modelo às condições locais.

3.2.4 Modelo de RILEM

O antigo RILEM TC 182 PEB organizou em 1997, um teste interlaboratorial internacional para previsão e avaliação de desempenho dos pavimentos. O objetivo era o de prever os danos esperados após 10 anos, em função do tráfego e dos dados climáticos. Foram construídas duas secções na Áustria e em Portugal. Cortaram-se amostras do teste do pavimento e levadas para laboratórios diferentes. Participaram neste estudo 13 laboratórios de 12 países diferentes, e deram previsões de desempenho de acordo com seus próprios métodos e dados. O documento resume a condição da estrada real e compara com o previsto [43]. Este modelo,

apresentado na equação (3.14) apenas tem em conta o tráfego de veículos pesados, não sendo assim de esperar resultados muito satisfatórios.

$$R_t = -0,246 \cdot TT_c^{0,2113} \quad (3.14)$$

Em que, R_t é a profundidade média esperada das rodeiras, em mm; TT_c é o número de veículos pesados.

3.2.5 Modelo Pavenet

Este modelo de previsão de deformações permanentes definido na equação (3.15), utilizado no modelo de computador PAVENET – R [21] visa a otimização do problema de manutenção-reabilitação ao nível da rede. A profundidade das rodeiras ao longo do tempo é prevista com base no tráfego, na idade do pavimento e no número estrutural da AASHTO, calculado pela equação (3.16). À semelhança do modelo de PATERSON, também este não inclui uma variável que represente a profundidade das rodeiras no início da análise.

$$R_t = 4,98 \cdot SN_t^{-0,5} \cdot age^{0,166} \cdot N_{80c_t}^{0,13} \quad (3.15)$$

$$SN = \sum_{n=1}^N H_n \cdot C_n^e \cdot C_n^d \quad (3.16)$$

Em que, R_t é a profundidade média esperada das rodeiras, em mm; age é a idade da construção, definida como o tempo desde a última intervenção, reconstrução ou atividade de construção nova, em anos; N_{80c_t} é o número equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t (milhões ESAL / pista); SN_t é o número estrutural do pavimento; H_n é a espessura da camada n; C_n^e é o coeficiente estrutural da camada n; C_n^d é o coeficiente de drenagem da camada n.

3.2.6 Modelo Austroads

Este recente modelo, desenvolvido na Austrália em 2010 é aplicável à fase de deterioração gradual de pavimentos granulares que representa o habitual leque de condições para pavimentos em serviço. Este tipo de pavimentos, com tratamento superficial sobre camadas granulares, não é representativo da rede rodoviária de Portugal, pelo que se torna de difícil aplicação ao caso de estudo em questão, tendo ainda assim ter sido considerado neste estudo para aferir da sua adaptabilidade a outros tipos de pavimentos.

Os dados para o desenvolvimento deste modelo foram obtidos a partir do desempenho a longo prazo do pavimento e manutenção do pavimento a longo prazo. Os dados observacionais foram prorrogados por dados experimentais de testes de carga acelerado, simulações de escala completa com a instalação de carregamento acelerado e aumento da gama de dados para possíveis mudanças na manutenção e cargas por eixo [44]. A definição do limite para a fase de deterioração gradual foi determinada com base em dados de deterioração experimentais de testes de carga acelerados através de testes de vários tratamentos de manutenção da superfície. Assim, o limite para a fase de deterioração gradual está definido de seguida na equação (3.17).

$$Rt_{max} = 86,347 - 11,008 \cdot IRI \quad (3.17)$$

Em que, Rt_{max} é a média deformação vertical máxima em do perfil em relação à superfície original, em mm; IRI é o Índice de Rugosidade Internacional, em m / km.

O modelo da equação (3.18) determina o desenvolvimento da profundidade das rodeiras.

$$R_t = R_0 + k \cdot (age - 1)^{0,617} \cdot [0,022 \cdot \frac{100 + TI_i}{SNC_0} + 0,594 \cdot N_{80ct} - 0,000102 \cdot me] \quad (3.18)$$

Em que, R_t é a profundidade média esperada das rodeiras, em mm; R_0 é a media da profundidade das rodeiras no final do primeiro ano, em mm; k é o coeficiente de calibração, por defeito=1; age é a idade da construção, definida como o tempo desde a última intervenção, reconstrução ou atividade de construção nova, em anos; TI_i é o índice de mistura *Thorntwaite*, no tempo “i”, é uma medida ampla do clima e influencia o comportamento do pavimento [45]; SNC_0 é o número estrutural modificado do pavimento para a idade, $age=0$. SNC_0 foi estimado utilizando a relação expressa na equação (3.19)[46]:

$$SNC_0 = \frac{SNC_i}{0,9035 * (2 - e^{0,0023 * TI_i + 0,185 * \frac{age}{DL}})} \quad (3.19)$$

Em que, DL é o projeto de vida do pavimento em anos; N_{80t} é o número equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t (milhões ESAL / pista); me é a despesa anual de manutenção do pavimento (\$/faixa-km/ano).

O Quadro 3.4 sumariza os valores das variáveis.

Quadro 3.4 -Valores das variáveis (adaptado de [44]).

Fonte dos dados	Gama de valores das variáveis independentes					Gama de valores das variáveis dependentes		Número de amostras
	$N_{80t}^{(1)}$ (faixa/ano)	$age^{(2)}$ (anos)	$TI_i^{(3)}$	$SNC_o^{(4)}$	$me^{(5)}$ (\$/faixa-km/ano)	IRI ⁽⁶⁾ (m/km)	Δrut ⁽⁷⁾ (mm)	
LTPP	0.007 a 2.54	1 a 105	-43 a 99	3.0 a 16.7	0 a 3365	0.08 a 6.24	0 a 14.79	68
LTPPM	0.004 a 2.09	1 a 64	-43 a 99	3.9 a 11.5	995 a 3286	0 a 5.94	0.26 a 25.14	72

⁽¹⁾Número equivalente de solicitações do eixo padrão (ESAL), na idade t (milhões ESAL/pista);

⁽²⁾Idade da construção, definida como o tempo desde a última intervenção, reconstrução ou atividade de construção nova (anos);

⁽³⁾Índice de mistura *Thorntwaite*, no tempo "i", é uma medida ampla do clima que influencia o comportamento do pavimento;

⁽⁴⁾Número estrutural modificado do pavimento para a idade, $age=0$;

⁽⁵⁾ Despesa anual de manutenção do pavimento (\$/faixa-km/ano);

⁽⁶⁾ Índice de Rugosidade Internacional (m/km);

⁽⁷⁾ Incremento de profundidade das rodeiras (mm).

3.2.7 Modelo AASHTO

Neste modelo a deformação permanente é calculada separadamente para cada tipo de camada e subcamada e depois é feito o somatório das deformações permanentes de todas elas, como mostra a equação (3.20).

$$RD = \sum_{i=1}^{nsubcamadas} \varepsilon_p^i \cdot h^i \quad (3.20)$$

Em que, RD é a deformação permanente total do pavimento, em mm; $nsubcamadas$ é o número total de subcamadas do pavimento; ε_p^i é a deformação total plástica na subcamada i ; h^i é a profundidade em mm, da subcamada i .

Esta abordagem, desenvolvida em 2004, baseia-se em calcular a deformação incremental dentro de cada subcamada. Em outras palavras, a deformação permanente é estimada para cada subestação a metade da profundidade de cada subcamada no interior da estrutura do pavimento. A deformação plástica para uma determinada altura do ano é a soma das deformações plásticas verticais dentro de cada camada.

O modelo de cálculo da deformação permanente total usa a deformação plástica vertical sob condições específicas de pavimento para o número total de veículos.

As condições variam de um mês para outro, pelo que é necessária a utilização de uma abordagem especial chamada de aproximação "tensão de endurecimento" para incorporar essas deformações plásticas verticais dentro de cada mês em um subsistema de deformação cumulativo [47].

Relativamente às camadas betuminosas, a deformação permanente acumulada em cada uma das subcamadas betuminosas é dada pela equação (3.21):

$$\Delta_p = \varepsilon_p \cdot h \quad (3.21)$$

Em que Δ_p é a deformação permanente acumulada em cada subcamada betuminosa, em mm; h é a espessura da subcamada betuminosa, em mm; ε_p é a extensão plástica acumulada em cada subcamada, em mm/mm, e é dada pela equação (3.22):

$$\varepsilon_p = k_z \cdot \varepsilon_r \cdot 10^{-3,35412} \cdot N^{0,4791} \cdot T^{1,5606} \quad (3.22)$$

Em que, N é o número de repetições de carga; T é a temperatura a metade da profundidade da subcamada, em °C; ε_r é a tensão elástica, como função das propriedades da mistura, da temperatura e da duração da carga, em m/m, e é dada pela equação (3.23):

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E^*} \cdot (\sigma_z - \mu\sigma_x - \mu\sigma_y) \quad (3.23)$$

Em que, σ_x , σ_y e σ_z são as tensões normais aplicadas a metade da profundidade total das subcamadas betuminosas, nas direções x , y e z , respetivamente sendo que estas tensões

foram determinadas através do software ELSYM5; E^* é o módulo dinâmico, expresso em função das propriedades da mistura, da temperatura e da duração da carga aplicada; K_z é o fator de confinamento de profundidade, dado pela equação (3.24):

$$K_z = (C_1 + C_2 D \cdot 0,3937) \cdot 0,328196^{(D \cdot 0,3937)} \quad (3.24)$$

$$C_1 = -0,1039 \cdot (H_{HMA} \cdot 0,397)^2 + 2,4868 \cdot (H_{HMA} \cdot 0,3937) - 17,342 \quad (3.25)$$

$$C_2 = 0,0172 \cdot (H_{HMA} \cdot 0,397)^2 - 1,7331 \cdot (H_{HMA} \cdot 0,3937) - 27,428 \quad (3.26)$$

Onde, D é a profundidade de metade da subcamada abaixo da fronteira entre subcamadas, em cm e H_{HMA} é a profundidade total das camadas betuminosa e granular, em cm.

Na descrição deste modelo, o número equivalente de ciclos de carga, N , para cada subestação é encontrado resolvendo o modelo de deformação permanente para a deformação acumulada até a atual subestação, às propriedades do material e às condições de carga prevaletentes na subestação atual [48].

A aproximação é ilustrada na Figura 3.2 para um modelo com a forma da equação (3.27).

$$\varepsilon_p = f(\varepsilon_r, T, N) \quad (3.27)$$

Em que ε_p é a extensão plástica total, em mm/mm; ε_r é a extensão residual que está relacionada com o módulo dinâmico das propriedades da mistura (mm/mm); T é a temperatura em °C e N é o número total de ciclos de carga (dado o tipo de eixo e carga).

A deformação plástica total $\varepsilon_{p,i-1}$, no final da subestação $i-1$ corresponde a um número total de repetições de tráfego Nt_{i-1} (ponto A). Na próxima subestação i , a temperatura da camada é T_1 e a extensão resiliente para carga e as condições vigentes em i é $\varepsilon_{r,i}$.

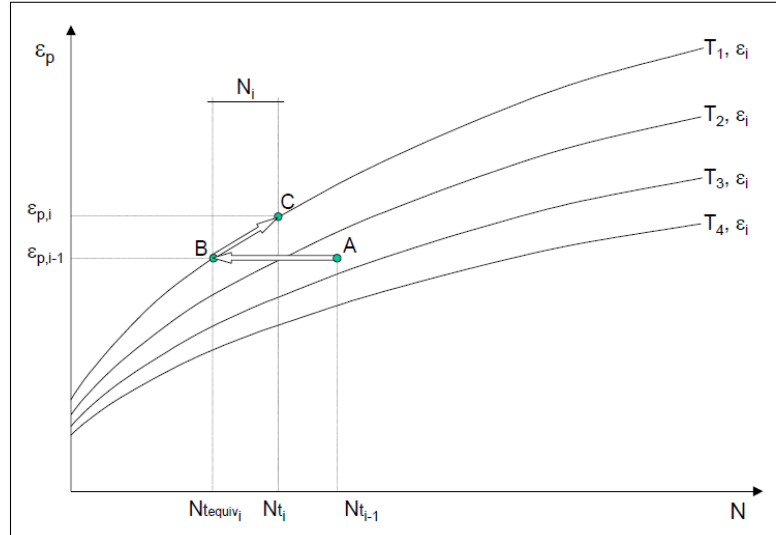


Figura 3.6 - Aproximação da deformação permanente [48].

No início da próxima subestação i (ponto B), existe um número equivalente de repetições de tráfego $Nt_{eq,i}$ que está associado à deformação total no final da subestação $i-1$, mas sob as condições prevalectentes na subestação nova ($T1, \varepsilon_{r,i}$).

A abordagem é necessária porque os modelos para a deformação permanente fornecem uma estimativa da deformação total, em vez de o incremento na deformação plástica, devido ao tráfego sazonal. Adicionando o número de repetições de tráfego na estação i (N_i) com o número total equivalente de repetições $Nt_{eq,i}$, utilizando-se o modelo de material específico, é possível estimar o ponto C, o que corresponde ao total de deformação plástica no final da subestação i .

Quanto à deformação permanente das camadas não ligadas, a estrutura inicial do modelo que prevê a deformação permanente neste tipo de camadas foi proposto por *Tseng* e *Lytton* [49], em 1989. A relação básica é dada pela equação (3.28).

$$\delta_a(N) = \beta_1 \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \cdot \varepsilon_v \cdot h \quad (3.28)$$

Em que δ_a é a deformação permanente para a camada/subcamada, em mm; N é o número de repetições de tráfego; $\varepsilon_0, \beta, \rho$ são propriedades dos materiais; ε_r é a tensão resiliente imposta em teste de laboratório, em mm/mm para obter as características dos materiais do ponto de cima; ε_v é a média da tensão vertical resiliente na camada/subcamada; h é a altura da camada/subcamada, em mm; β_1 é o fator de calibração para materiais granulares e para a fundação; $\beta = 1,673$ para as camadas granulares ou $\beta = 0,136$ para o solo de fundação.

Relativamente ao modelo apresentado por *Tseng e Lyttom* [49], a *American Association of State Highway Transports Officials* (AASHTO) propõe algumas alterações. Nomeadamente, a eliminação do fator de *stress*, algumas alterações importantes nos cálculos de “ β ” e “ ρ ”, e a homogeneização do modelo de forma a incluir não só as camadas/subcamadas granulares, mas também a fundação. As modificações são as dadas pelas expressões (3.29), (3.30), (3.31), (3.32) e (3.33):

$$\log(\beta) = -0,61119 - 0,017638W_c \quad (3.29)$$

$$\log\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) = \frac{(e^{\rho\beta} \cdot a_1 \cdot E_r^{b_1}) + (e^{(\rho/10^9)\beta} \cdot a_9 \cdot E_r^{b_9})}{2} \quad (3.30)$$

$$C_0 = \ln\left(\frac{a_1 \cdot E_r^{b_1}}{a_9 \cdot E_r^{b_9}}\right) \quad (3.31)$$

$$\rho = 10^9 \cdot \left[\frac{C_0}{(1 - (10^9)\beta)}\right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.32)$$

$$W_c = 51,712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0,64}} \right]^{-0,3586 \cdot GWT^{0,1192}} \quad (3.33)$$

Em que W_c é a percentagem de água dos materiais que compõe a camada/subcamada/fundação; E_r é o módulo resiliente da camada/subcamada/fundação, em psi; GWT é a altura do nível freático, em m; $a_1 = 0,15$; $b_1 = 0,0$; $a_9 = 20,0$; $b_9 = 0,0$.

4. CASO DE ESTUDO E RESULTADOS

A análise dos modelos de deformação permanente suporta-se na implementação dos modelos a algumas estruturas de pavimento flexíveis propostas pelo manual da JAE, MACOPAV [50], considerando diferentes tipos de tráfego (T1,T3,T5) e de capacidade de suporte da fundação (F2 eF3). Escolheram-se seis tipos de pavimentos diferentes (T5F3P4, T3F3P9, T1F3P14, T5F2P7, T3F2P13 e T1F2P16) no âmbito desta dissertação a fim de comparar a evolução da profundidade das rodeiras ao longo do tempo para esses seis diferentes tipos de estrutura de pavimentos.

O Quadro 4.1 sumariza os níveis de tráfego diário (T1, T3, T5) e as correspondentes estruturas de pavimento para uma fundação do tipo F3 (CBR=20%). Neste estudo também se considerou uma fundação do tipo F2 (CBR=10%), que requer 40 mm extra de espessura em cada caso. Considera-se que este pavimento se encontra na região centro de Portugal Continental, mais especificamente em Coimbra [39]. Para os dados de precipitação e temperatura utilizou-se a base de dados do período compreendido entre o ano de 1971 e o ano de 2000 do Instituto Português de Meteorologia [51].

Quadro 4. 1 - Dados dos pavimentos [39].

Parâmetro		Pavimentos			
		P4	P9	P14	
Tráfego	TMDA (por via e faixa)	300 (T5)	800 (T3)	2000 (T1)	
	Taxa de crescimento do Tráfego (%)	3	4	5	
	Fator de agressividade dos veículos pesados	3	4.5	5.5	
Estrutura	Camada betuminosa superficial	H_n (mm)	40	50	60
		E (MPa)	4000	4000	4000
	Camada betuminosa de desgaste	H_n (mm)	100	100	220
		E (MPa)	4000	4000	4000
	Subcamada granular	H_n (mm)	200	200	200
		E (MPa)	200	200	200
Fundação CBR(%)		20	20	20	
Clima (Coimbra)	Temperatura média diária (°C)	15.5	15.5	15.5	
	Precipitação média anual (mm)	905.1	905.1	905.1	

Como se disse, foram aplicados os modelos aos vários tipos de pavimento já referidos que contemplam vários níveis de tráfego, tipos de fundação e tipos de pavimento.

Desta forma, para cada um dos modelos em cada um dos tipos de modelo analisados, estuda-se neste capítulo:

- A evolução das deformações;
- O estado das deformações permanentes ao fim da vida útil de um pavimento (20 anos);
- A idade à qual o modelo atinge determinados valores de profundidade (4mm, 9mm, 15mm e 25mm – definidos por Christensen e Ragnöy).

A Figura 4.1 demonstra a evolução da profundidade das rodeiras ao longo do tempo, para uma estrutura do tipo T5F3P4.

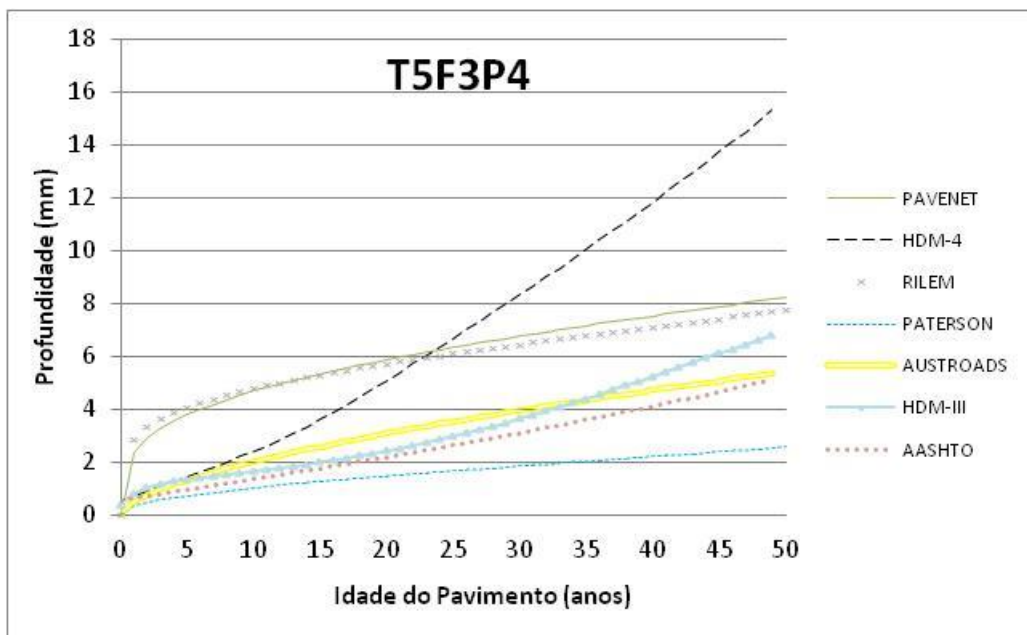


Figura 4.1 - Resultados para a combinação T5F3P4.

O Quadro 4.2 mostra a profundidade prevista, em mm, ao fim da vida útil de um pavimento (20 anos), para os vários modelos, aplicados a uma estrutura do tipo T5F3P4.

Quadro 4.2- Profundidades previstas a 20 anos - T5F3P4.

Modelo	Paterson	HDM-III	HDM-4	RILEM	PAVENET	AUSTROADS	AASHTO
Profundidade aos 20 anos (mm)	1.45	2.41	4.78	5.72	5.87	3.07	2.10

Da análise da Figura 4.1 e do Quadro 4.2, observa-se que o modelo PAVENET é o que apresenta valores mais severos, relativamente à profundidade das deformações permanentes, ao fim da vida útil do pavimento - 5,87mm, seguido do modelo RILEM- 5,72mm.

Posteriormente segue-se o modelo HDM-4 com 4,78mm, o modelo AUSTRROADS com 3,07mm, o modelo HDM-III com 2,41mm e o modelo da AASHTO com 2,10mm. O modelo de Paterson é o modelo que apresenta valores mais baixos de profundidade rodeiras – 1,45mm para a estrutura do tipo T5F3P4.

O Quadro 4.3 analisa a que idade do pavimento, em anos, cada modelo atinge os limites de 4, 9, 15 e 25mm para a estrutura do tipo T5F3P4.

Quadro 4.3 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T5F3P4.

Modelo	T5 F3 P4				
	Idade do pavimento (anos)				
	4mm	9mm	15mm	25mm	13mm
Paterson	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-III	32.5	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-4	16.3	33.0	49.2	Não atinge	44.1
Rilem	4.8	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Pavenet	6.1	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Austrroads	30.7	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
AASHTO	40.0	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge

Da observação do Quadro 4.3 pode verificar-se que nenhum dos modelos atinge os 9mm de profundidade ao longo dos 50 anos de evolução das deformações, exceto o modelo HMD-4 (aos 33 anos) pelo que os restantes não atingem o Nível III na escala adotada. O modelo Paterson não ultrapassa o Nível I em nenhuma altura da sua evolução, ou seja não ultrapassa os 4mm de profundidade. Os restantes modelos atingem 4mm de profundidade, passando para o Nível III pela seguinte ordem: Rilem (4,8anos); Pavenet (6,1anos); HDM-4 (16,3anos); AUSTRROADS (30,7anos); HDM-III (32,5anos) e AASHTO (40 anos). O modelo HDM-4 alcança o valor de 15 mm aos 49,2 anos, e o valor de 13 mm a partir do qual se considera necessária uma intervenção no pavimento, aos 44,1 anos. Visto nenhum dos restantes modelos atingirem os 13mm de profundidade, não se considera necessário intervir no pavimento em nenhum deles para a estrutura do tipo T5F3P4.

A Figura 4.2 demonstra a evolução da profundidade das rodeiras ao longo do tempo, para a estrutura do tipo T3F3P9.

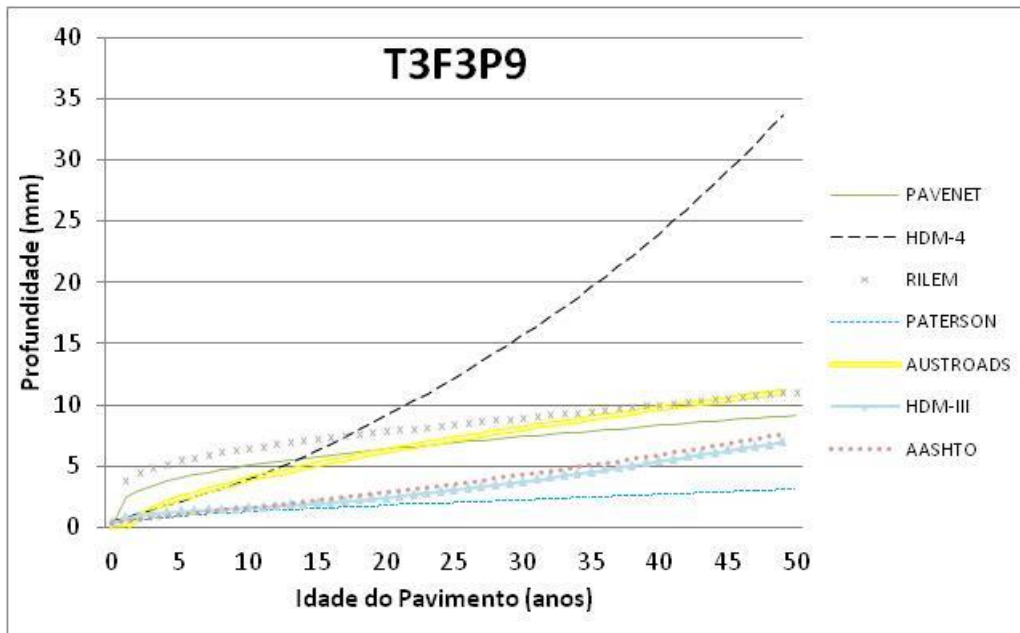


Figura 4.2 - Resultados para a combinação T3F3P9.

O Quadro 4.4 mostra a profundidade prevista, em mm, ao fim da vida útil de um pavimento (20 anos), para os vários modelos aplicados estrutura do tipo T5F3P4.

Quadro 4.4 - Profundidades previstas a 20 anos – T3F3P9.

Modelo	Paterson	HDM-III	HDM-4	RILEM	PAVENET	AUSTROADS	AASHTO
Profundidade aos 20 anos (mm)	1.80	2.43	8.53	7.84	6.38	6.24	2.76

Da análise da Figura 4.2 e do Quadro 4.4, observa-se que o modelo HDM-4 é o modelo que apresenta valores mais severos relativamente à profundidade das deformações permanentes ao fim da vida útil do pavimento – 8,53 mm, seguido do modelo RILEM – 7,84 mm. Segue-se o modelo Pavenet com 6,38mm, o modelo AUSTROADS com 6,24mm, o modelo da AASHTO com 2,76mm e o modelo HDM-III com 2,43mm. O modelo de Paterson é aquele que apresenta valores mais baixos de profundidade de rodagem – 1,80 mm para a estrutura do tipo T3F3P9.

O Quadro 4.5 analisa a que idade do pavimento, em anos, cada modelo atinge os limites de 4, 9, 15 e 25mm para a estrutura do tipo T3F3P9.

Quadro 4.5 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T3F3P9.

T3 F3 P9					
Idade do pavimento (anos)					
Modelo	4mm	9mm	15mm	25mm	13mm
Paterson	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-III	31.9	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-4	11.5	20.8	30.0	42.0	27.9
Rilem	1.3	30.1	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Pavenet	4.7	47.9	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Austroroads	10.2	35.5	Não atinge	Não atinge	Não atinge
AASHTO	28.9	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge

Da observação do Quadro 4.5 e analisando cada modelo isoladamente pode verificar-se que o modelo Rilem atinge os 4mm de profundidade, passando para o Nível II aos 1,3anos e atinge os 9mm de profundidade passando para o Nível III aos 30,1 anos. O modelo Pavenet atinge os 4mm de profundidade, passando para o Nível II aos 4,7anos e atinge os 9mm de profundidade passando para o Nível III aos 47,9 anos. O modelo Austroroads atinge os 4mm de profundidade, passando para o Nível II aos 10,2anos e atinge os 9mm de profundidade passando para o Nível III aos 35,5anos. O modelo HDM-4 atinge os 4mm de profundidade aos 1,5anos, 9 mm aos 20,8 anos, 15 mm aos 30 anos e 25 mm de profundidade aos 42 anos. O modelo AASHTO atinge os 4mm de profundidade aos 28,9anos e não atinge os 9mm de profundidade. O modelo HDM-III atinge os 4mm aos 31,9 anos e não chega aos 9mm de profundidade. Por fim, o modelo Paterson não ultrapassa o Nível I em nenhuma altura da sua evolução, ou seja não ultrapassa os 4mm de profundidade. Apenas o modelo HDM-4 alcança a profundidade 13 mm de profundidade, pelo que será necessário intervir no pavimento aos 27,9 anos. Nenhum dos restantes modelos alcança o nível IV nem os 13mm de profundidade, pelo que em nenhum deles se considera necessário intervir no pavimento para a estrutura do tipo T1F3P14.

A Figura 4.3 demonstra a evolução da profundidade das rodeiras ao longo do tempo, para a estrutura do tipo T1F3P14.

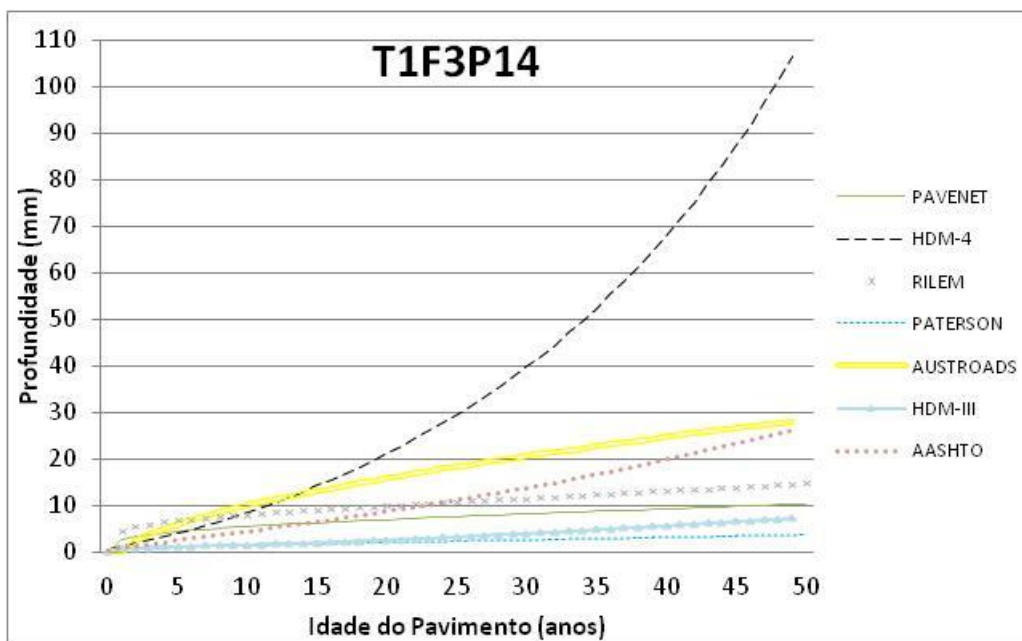


Figura 4.3 - Resultados da combinação T1F3P14.

O Quadro 4.6 mostra a profundidade prevista, em mm, ao fim da vida útil de um pavimento (20 anos), para os vários modelos, aplicando a estrutura do tipo T1F3P14.

Quadro 4.6 - Profundidades previstas a 20 anos - T1F3P14.

Modelo	Paterson	HDM-III	HDM-4	RILEM	PAVENET	AUSTROADS	AASHTO
Profundidade aos 20 anos (mm)	2.12	2.66	19.7	10.15	7.02	15.93	8.35

Da análise da Figura 4.3 e do Quadro 4.6, observa-se que o modelo HDM-4 é o que apresenta valores mais severos relativamente à profundidade das deformações permanentes mais ao fim da vida útil do pavimento – 19,7 mm, seguido do modelo AUSTROADS com 15,93mm, do modelo RILEM com 10,15mm. Segue-se o modelo AASHTO com 8.35mm, o modelo Pavenet com 7,02mm, o modelo HDM-III com 2,66mm. O modelo de Paterson é o que apresenta valores mais baixos de profundidade de rodagem - 2,12 mm para a estrutura do tipo T3F3P9.

O Quadro 4.7 analisa a que idade do pavimento, em anos, cada modelo atinge os limites de 4, 9, 15 e 25mm para a estrutura do tipo T1F3P14.

Quadro 4.7 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T1F3P14.

T1 F3 P14					
Idade do pavimento (anos)					
Modelo	4mm	9mm	15mm	25mm	13mm
Paterson	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-III	29.8	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-4	5.9	11.4	16.5	23.3	14.9
Rilem	1.0	13.5	Não atinge	Não atinge	37.9
Pavenet	3.8	37.0	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Austroads	3.0	8.5	18.1	40.5	14.7
AASHTO	9.6	21.4	33.1	48.2	29.4

Da observação do Quadro 4.7 e analisando cada modelo isoladamente pode verificar-se que o modelo Rilem atinge os 4mm de profundidade, passando para o Nível II no primeiro ano, atinge os 9mm de profundidade passando para o Nível III passados 11,4 anos e atinge os 15mm passando para o Nível IV aos 16,5 anos. O modelo Austroads atinge os 4mm de profundidade, passando para o Nível II aos 3,0 anos, os 9mm passando para o Nível III aos 8,5anos, os 15mm passando para o Nível IV aos 18,1 anos e os 25mm passando para o Nível V aos 40,5 anos. O modelo Pavenet atinge os 4mm de profundidade passando para o Nível II aos 3,8 anos e os 9mm de profundidade passando para o Nível III aos 37 anos. O modelo HDM-4 atinge os 4mm aos 5,9anos, os 9mm aos 11,4anos, os 15mm aos 16,5anos e os 25 mm aos 23,3 anos; O modelo AASHTO atinge os 4mm de profundidade aos 9,6anos, os 9mm aos 21,4anos, os 15mm aos 33,1anos e os 25mm aos 48,2 anos. O modelo HDM-III atinge os 4mmaos 29,8 anos e não chega aos 9mm de profundidade. O modelo Paterson não ultrapassa o Nível I em nenhuma altura da sua evolução, ou seja não ultrapassa os 4mm de profundidade.

Relativamente à idade em que se considera necessário intervir, o Quadro 4.7 mostra que segundo o modelo Austroads será necessário intervir no pavimento aos 14,7anos de idade do pavimento; segundo o modeloHDM-4 será necessário intervir aos 14,9anos; segundo o modelo AASHTO será necessário intervir no pavimento aos 29,4anos e segundo o modelo Rilem será necessário intervir no pavimento aos 37,9anos de idade do pavimento. Segundo a previsão dos modelos Paterson, HDM-III e Pavenet não se atingirá os 13mm de profundidade de deformações permanentes pelo que não será necessário intervir no pavimento.

A figura 4.4 demonstra a evolução da profundidade das rodeiras ao longo do tempo, para a estrutura do tipo T5F2P7.

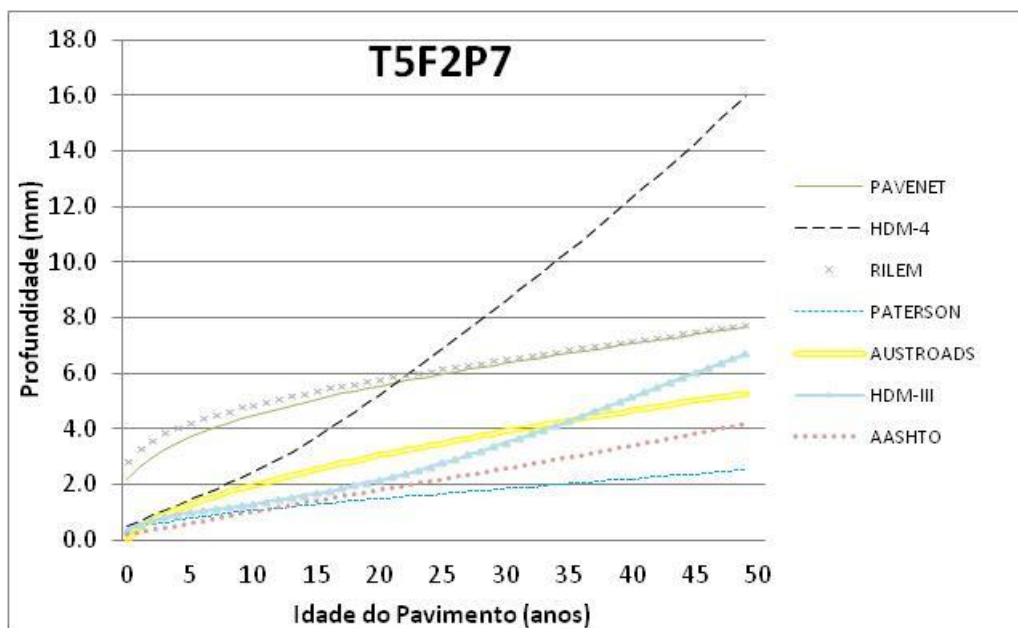


Figura 4.4 - Resultados para a combinação T5F2P7.

O Quadro 4.8 mostra a profundidade prevista, em mm, ao fim da vida útil de um pavimento (20 anos), para os vários modelos, aplicando a estrutura do tipo T5F2P7.

Quadro 4.8 - Profundidades previstas a 20 anos - T5F2P7.

Modelo	Paterson	HDM-III	HDM-4	RILEM	PAVENET	AUSTROADS	AASHTO
Profundidade aos 20 anos (mm)	1.43	2.06	4.93	5.73	5.46	2.95	1.72

Da análise da Figura 4.4 e do Quadro 4.8, observa-se que o modelo RILEM é o que apresenta valores mais severos relativamente à profundidade das deformações permanentes ao fim da vida útil do pavimento - 5,73 mm, seguido do modelo RILEM - 5,46mm. Segue-se o modelo HDM-4 com 4,93mm, o modelo AUSTROADS com 2,95mm, o modelo HDM-III com 2,06mm e o modelo da AASHTO com 1,72mm de profundidade. O modelo de Paterson é o que apresenta valores mais baixos de profundidade de rodagem - 1,43mm para a estrutura do tipo T5F2P7.

O Quadro 4.9 analisa a que idade do pavimento, em anos, cada modelo atinge os limites de 4, 9, 15 e 25mm para a estrutura do tipo T5F2P7.

Quadro 4.9 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T5F2P7.

T5 F2 P7					
Idade do pavimento (anos)					
Modelo	4mm	9mm	15mm	25mm	13mm
Paterson	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-III	34.1	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-4	18.0	32.0	47.8	Não atinge	42.8
Rilem	4.7	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Pavenet	7.6	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Austroads	32.0	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
AASHTO	47.9	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge

Da observação do Quadro 4.9 pode verificar-se que nenhum dos modelos atinge os 9mm de profundidade ao longo dos 50 anos de evolução das deformações, exceto o modelo HMD-4 (aos 32 anos) pelo que os restantes não atingem o Nível III na escala adotada. O modelo Paterson não ultrapassa o Nível I em nenhuma altura da sua evolução, ou seja não ultrapassa os 4mm. Os restantes modelos atingem os 4mm, passando para o Nível III pela seguinte ordem: Rilem - 4,7anos; Pavenet - 7,6anos; HDM-4 - 18 anos; AUSTROADS – 32 anos; HDM-III - 34,1 anos e AASHTO - 47,9anos. O modelo HDM-4 alcança o valor de 15 mm aos 47,8 anos, e o valor de 13 mm a partir do qual se considera necessária uma intervenção no pavimento, aos 42,8 anos. Visto nenhum dos restantes modelos atingirem os 13mm de profundidade, não se considera necessário intervir no pavimento em nenhum dos modelos para a estrutura do tipo T5F2P7.

A figura 4.5 demonstra a evolução da profundidade das rodeiras ao longo do tempo, para a estrutura do tipo T3F2P13.

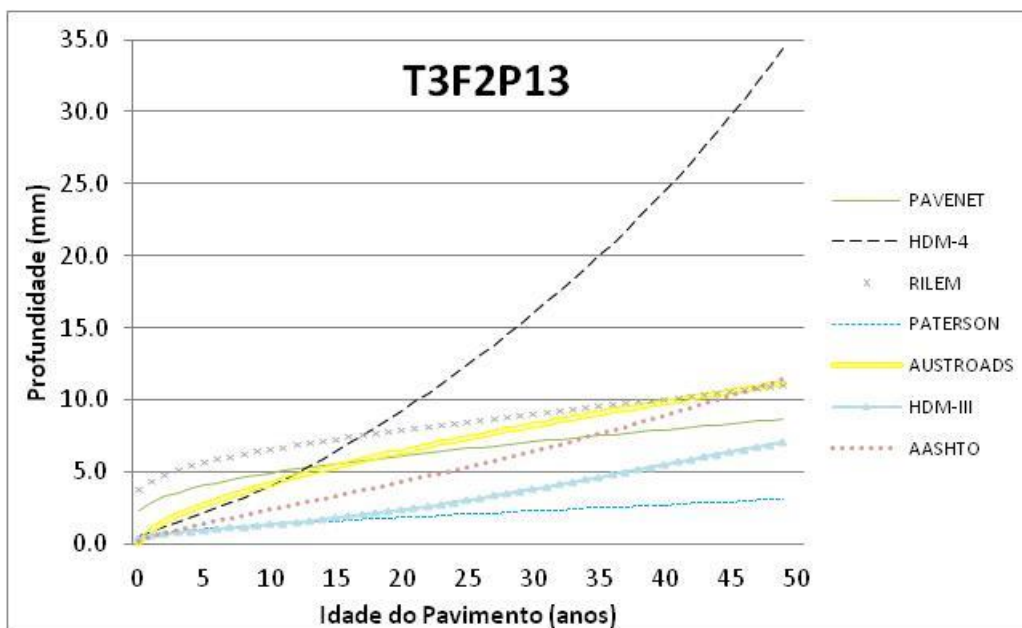


Figura 4.5 - Resultados para a combinação T3F2P13.

O Quadro 4.10 mostra a profundidade prevista, em mm, ao fim da vida útil de um pavimento (20 anos), para os vários modelos, aplicando a estrutura do tipo de ações T3F2P13.

Quadro 4.10 - Profundidades previstas a 20 anos - T3F2P13.

Modelo	Paterson	HDM-III	HDM-4	RILEM	PAVENET	AUSTROADS	AASHTO
Profundidade aos 20 anos (mm)	1.77	2.24	8.67	7.84	6.01	6.22	4.10

Da análise da Figura 4.5 e do Quadro 4.10, observa-se que o modelo HDM-4 é o que apresenta valores mais severos relativamente à profundidade das deformações permanentes ao fim da vida útil do pavimento – 8,67 mm, seguido do modelo RILEM – 7,84 mm de profundidade. Segue-se o modelo Austroads com 6,22mm, o modelo Pavenet com 6,01mm, o modelo da AASHTO com 4,01mm e o modelo HDM-III com 2,24mm de profundidade. O modelo de Paterson é o que apresenta valores mais baixos de profundidade rodadas – 1,77 mm para a estrutura do tipo T3F2P13.

O Quadro 4.11 analisa a que idade do pavimento, em anos, cada modelo atinge os limites de 4, 9, 15 e 25mm para a estrutura do tipo T3F2P13.

Quadro 4.11 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T3F2P13.

T3 F2 P13					
Idade do pavimento (anos)					
Modelo	4mm	9mm	15mm	25mm	13mm
Paterson	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-III	32.9	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-4	12.0	20.6	28.2	41.4	26.7
Rilem	1.2	30.0	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Pavenet	5.8	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Austroads	10.3	35.7	Não atinge	Não atinge	Não atinge
AASHTO	19.5	41.3	Não atinge	Não atinge	Não atinge

Da observação do Quadro 4.11 e analisando cada modelo isoladamente pode verificar-se que o modelo Rilem atinge os 4mm, passando para o Nível II aos 1,2anos e atinge os 9 mm de profundidade passando para o Nível III aos 30 anos. O modelo Pavenet atinge os 4mm, passando para o Nível II aos 5,8anos e não atinge os 9mm de profundidade. O modelo Austroads atinge os 4mm, passando para o Nível II aos 10,3anos e atinge os 9mm passando para o Nível III aos 35,7anos. O modelo HDM-4 atinge os 4 mm aos 12 anos, os 9mmaos 20,6 anos, os 15 mm aos 28,2 anos e os 25 mm de profundidade aos 41,4 anos de profundidade. O modelo AASHTO atinge os 4mm aos 19,5anos e os 9mm aos 41,3anos. O modelo HDM-III atinge os 4mm aos 32,9 anos e não chega aos 9mm de profundidade. O modelo Paterson não ultrapassa o Nível I em nenhuma altura da sua evolução, ou seja não ultrapassa os 4mm de profundidade. Apenas o modelo HDM-4 alcança a profundidade 13 mm de profundidade, pelo que será necessário intervir no pavimento aos 26,7 anos. Nenhum dos restantes modelos alcança o nível IV nem os 13mm de profundidade, pelo que em nenhum deles se considera necessário intervir no pavimento para a estrutura do tipo T3F2P13.

A figura 4.6 demonstra a evolução da profundidade das rodeiras ao longo do tempo, para a estrutura do tipo T1F2P16.

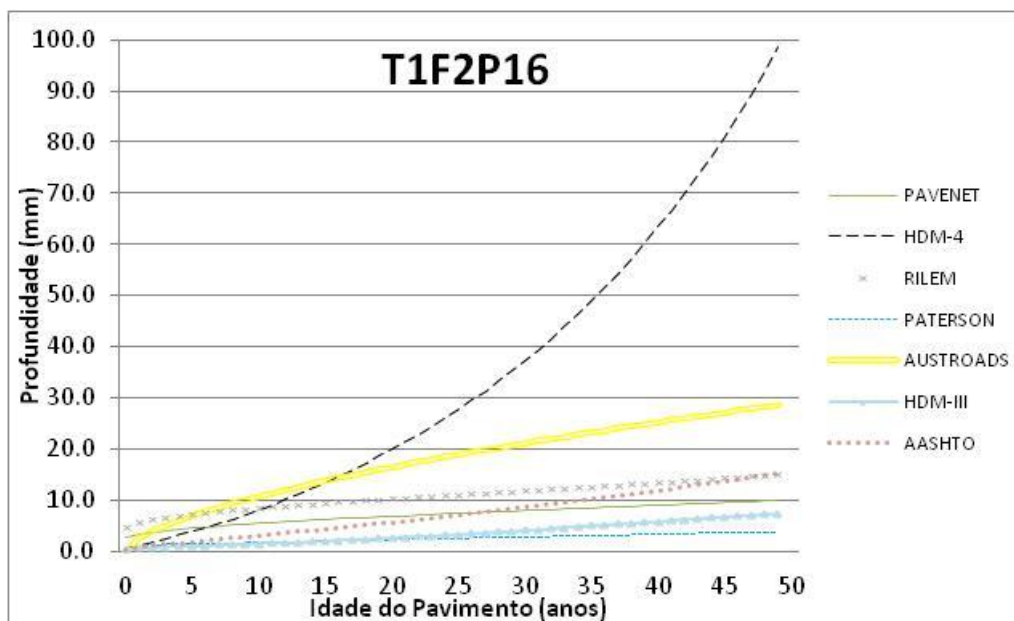


Figura 4.6 - Resultados para a combinação T1F2P16.

O Quadro 4.12 mostra a profundidade prevista, em mm, ao fim da vida útil de um pavimento (20 anos), para os vários modelos, aplicando a estrutura do tipo T1F2P16.

Quadro 4.12 - Profundidades previstas a 20 anos - T1F2P16.

Modelo	Paterson	HDM-III	HDM-4	RILEM	PAVENET	AUSTRROADS	AASHTO
Profundidade aos 20 anos (mm)	2.08	2.42	18.54	10.15	6.66	15.91	5.38

Da análise da Figura 4.6 e do Quadro 4.12, observa-se que o modelo HDM-4 é o que apresenta valores mais severos relativamente à profundidade das deformações permanentes ao fim da vida útil do pavimento – 18,54 mm, seguido do modelo AUSTRROADS com 15,91 mm, e do modelo RILEM com 10,15mm de profundidade. Em seguida tem-se o modelo Pavenet com 6.66mm, o modelo AASHTO com 5,38 mm e o modelo HDM-III com 2,42mm. O modelo de Paterson é o que apresenta valores mais baixos de profundidade de rodagem – 2,08 mm para a estrutura do tipo T1F2P16.

O Quadro 4.13 analisa a que idade do pavimento, em anos, cada modelo atinge os limites de 4, 9, 15 e 25mm para a estrutura do tipo T1F2P16.

Quadro 4.13 - Idade do pavimento, em anos, à qual atinge vários valores de profundidade das rodeiras – T1F2P16.

T1 F2 P16					
Idade do pavimento (anos)					
Modelo	4mm	9mm	15mm	25mm	13mm
Paterson	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-III	30.6	Não atinge	Não atinge	Não atinge	Não atinge
HDM-4	7.1	12.9	18.2	24.3	15.8
Rilem	1.0	13.6	Não atinge	Não atinge	37.9
Pavenet	4.2	41.7	Não atinge	Não atinge	Não atinge
Austroads	3.0	8.6	18.8	40.4	14.7
AASHTO	14.8	32.4	Não atinge	Não atinge	44.9

Da observação do Quadro 4.13 e analisando cada modelo isoladamente pode verificar-se que o modelo Rilem atinge os 4mm de profundidade passando para o Nível II no primeiro ano, atinge os 9mm passando para o Nível III aos 13,6 anos e não atinge os 15mm de profundidade. O modelo Austroads atinge os 4mm, passando para o Nível II aos 3 anos, atinge os 9mm passando para o Nível III aos 8,6anos, os 15mm passando para o Nível IV aos 18,8 anos e os 25mm passando para o Nível V aos 40,4 anos. O modelo Pavenet atinge os 4mm, passando para o Nível II aos 4,2anos e atinge os 9mm passando para o Nível III aos 41,7anos; O modelo HDM-4 atinge os 4mm aos 7,1anos, os 9mm aos 12,9anos, os 15mm de profundidade aos 18,2anos, e os 25 mm aos 24,3 anos. O modelo AASHTO atinge os 4mm aos 14,8anos e os 9mm aos 32,4anos. O modelo HDM-III atinge os 4mm aos 30,6 anos e não chega aos 9mm de profundidade. O modelo Paterson não ultrapassa o Nível I em nenhuma altura da sua evolução, ou seja não ultrapassa os 4mm para a estrutura do tipo T1F2P16.

Relativamente à idade em que se considera necessário intervir, o Quadro 4.13 mostra que segundo o modelo Austroads será necessário intervir no pavimento aos 14,7anos de idade do pavimento; segundo o modeloHDM-4 será necessário intervir aos 15,8anos; segundo o modelo AASHTO será necessário intervir no pavimento aos 44,9anos e segundo o modelo Rilem será necessário intervir no pavimento aos 37,9anos de idade do pavimento. Segundo a previsão dos modelos Paterson, HDM-III e Pavenet não se atingirá os 13mm de profundidade de deformações permanentes pelo que não será necessário intervir no pavimento.

As Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 comparam o tempo, em anos, que cada modelo prevê que se atinja os 4mm, 9 mm, 15 mm e 25 mm de profundidade, respetivamente, para cada um dos tipos de estrutura considerados.

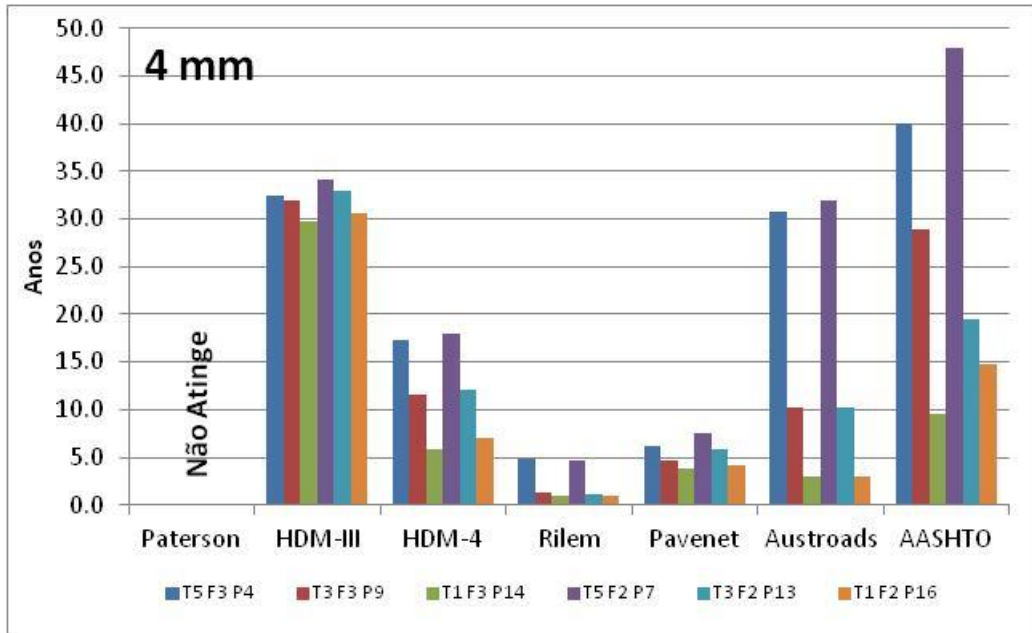


Figura 4.7 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.

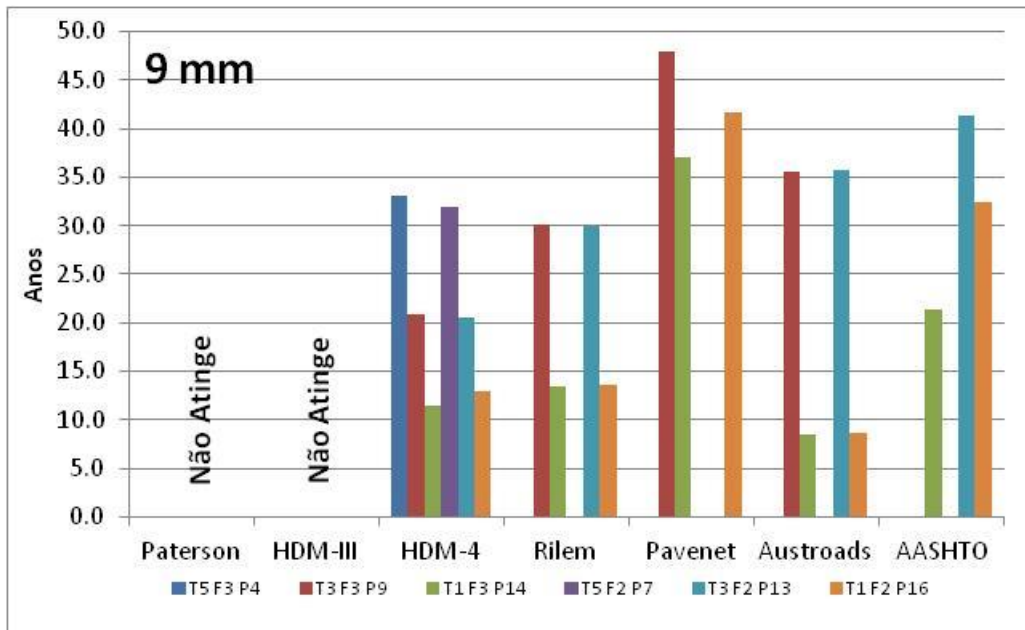


Figura 4.8 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 9 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.

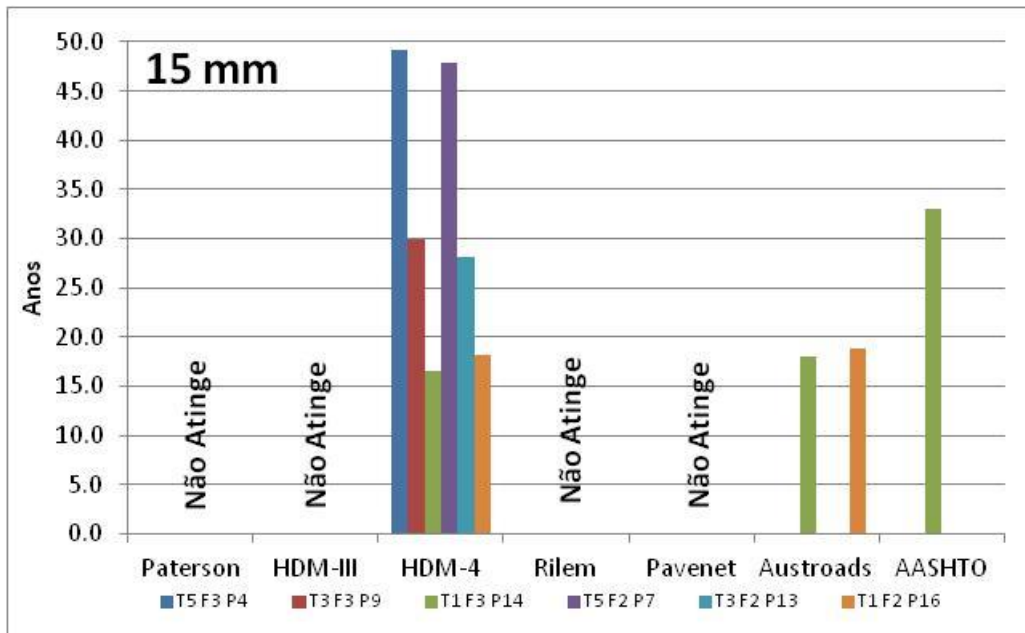


Figura 4.9 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 15 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.

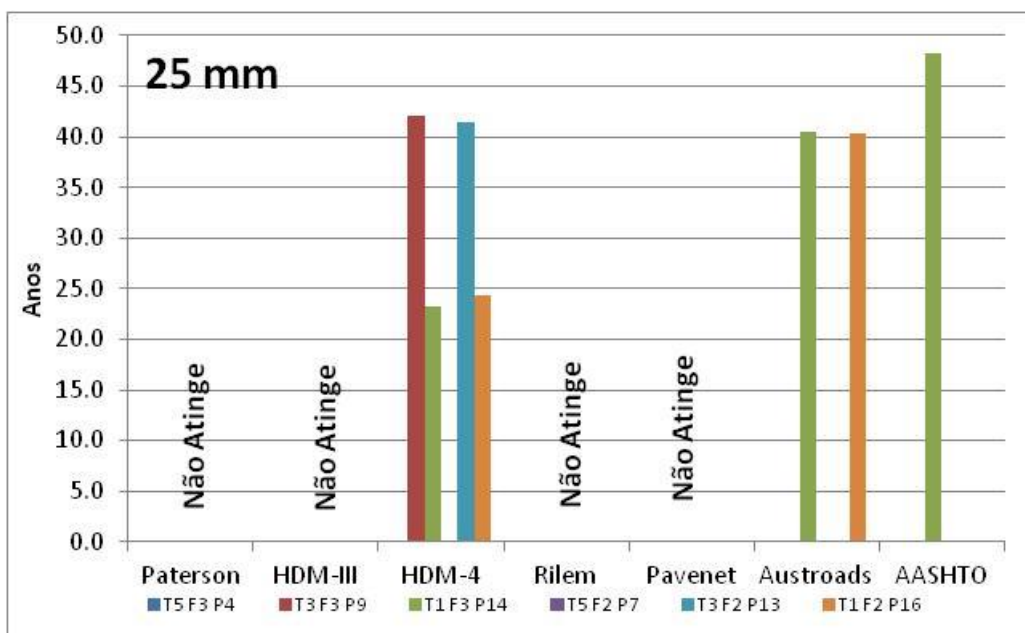


Figura 4.10 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 25 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.

De acordo com as Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 verifica-se que de acordo com o modelo Paterson, não são atingidas as profundidades de rodeiras de 4 mm, 9 mm, 15 mm e 25 mm, respectivamente, em nenhum tipo de estrutura considerado.

No que respeita ao modelo HMD-3, este prevê que para nenhum tipo de estruturas considerados se atingem os 9 mm de profundidade de rodeiras. De acordo com a Figura 4.7 e para as estruturas T5F3P4, T3F3P9, T1F3P14, T5F2P7, T3F2P13 e T1F2P16 os anos aos quais se

atinge os 4 mm são 32,5 anos, 31,9 anos, 29,8 anos, 34,1 anos, 32,9 anos e 30,6 anos respectivamente.

Relativamente ao modelo HDM-4, este prevê que são atingidas as profundidades de 4 mm, 9 mm, 15 mm e 25 mm para todos os tipos de estruturas considerados, exceto as combinações de ações T5F3P4 que não atinge as profundidades de 15 mm e 25 mm e T5F2P7 que não atinge a profundidade de 25 mm. Para as estruturas dos tipos T5F3P4, T3F3P9, T1F3P14, T5F2P7, T3F2P13 e T1F2P16 os anos aos quais se atinge os 4 mm de profundidade – Figura 4.7 são 17,3 anos, 11,5 anos, 5,9 anos, 18 anos, 12 anos e 7,1 anos respectivamente. Para as estruturas dos tipos T5F3P4, T3F3P9, T1F3P14, T5F2P7, T3F2P13 e T1F2P16 os anos aos quais se atinge os 9 mm de profundidade – Figura 4.8 são 33 anos, 20,8 anos, 11,4 anos, 32 anos, 20,6 anos e 15,9 anos respectivamente. Para as estruturas dos tipos T3F3P9, T1F3P14, T5F2P7, T3F2P13 e T1F2P16 os anos aos quais se atinge os 15 mm de profundidade – Figura 4.9 são 49,2 anos, 30 anos, 16,5 anos, 47,8 anos, 28,2 anos e 18,2 anos respectivamente. Para as estruturas dos tipos T3F3P9, T1F3P14, T3F2P13 e T1F2P16 os anos aos quais se atinge os 25 mm de profundidade – Figura 4.10 são 42 anos, 23,3 anos, 41,7 anos e 24,3 anos respectivamente.

Relativamente ao modelo Rilem, este prevê que para a combinação T5F3P4 não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 4,8 anos – Figura 4.7. Para a combinação T3F3P9, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade aos 1,3 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 30,1 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9. Para a combinação T1F3P14, o modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade no primeiro ano – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 13,5 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9. Para a combinação T5F2P7, este modelo prevê que não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 4,7 anos – Figura 4.7. Para a combinação T3F2P13, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade aos 1,2 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 30 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9. Para a combinação T1F2P16, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade no primeiro ano – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 13,6 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9.

Relativamente ao modelo Pavenet, este prevê que para a combinação T5F3P4 não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 6,1 anos – Figura 4.7. Para a combinação T3F3P9, este modelo prevê que se atinja 4 mm

de profundidade aos 4,7 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 47,9 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9. Para a combinação T1F3P14, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade aos 3,8 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 37 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9. Para a combinação T5F2P7, o modelo prevê que não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 7,6 anos – Figura 4.7. Para a combinação de ações T3F2P13, o modelo prevê que não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 5,8 anos – Figura 4.7. Para a combinação T1F2P16, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade aos 4,2 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 41,7 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9.

Relativamente ao modelo Austroads, este prevê que para a combinação T5F3P4 não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 30,7 anos – Figura 4.7. Para a combinação T3F3P9, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade aos 10,2 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 35,5 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9. Para a combinação T1F3P14, este modelo prevê que se atinja 4 mm, 9 mm, 15 mm e 25 mm de profundidade de rodeiras aos 3 anos, 8,5 anos, 18,1 anos e 40,5 anos respetivamente. Para a combinação T5F2P7, este modelo prevê que não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 32 anos – Figura 4.7. Para a combinação T3F2P13, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade aos 10,3 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 35,7 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9. Para a combinação T1F2P16, este modelo prevê que se atinja 4 mm, 9 mm, 15 mm e 25 mm de profundidade de rodeiras aos 3 anos, 8,6 anos, 18,8 anos e 40,4 anos respetivamente.

Relativamente ao modelo AASHTO, este prevê que para a combinação T5F3P4 não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 40 anos – Figura 4.7. Para a combinação T3F3P9, este modelo prevê que não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 28,9 anos – Figura 4.7. Para a combinação T1F3P14, este modelo prevê que se atinja 4 mm, 9 mm, 15 mm e 25 mm de profundidade de rodeiras aos 9,6 anos, 21,4 anos, 33,1 anos e 48,2 anos respetivamente. Para a combinação T5F2P7, este modelo prevê que não se atinja 9 mm de profundidade de rodeiras – Figura 4.8. Os 4 mm de profundidade de rodeiras atingem-se aos 47,9 anos – Figura 4.7. Para a combinação T3F2P13, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade aos 19,5 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 41,3 anos – Figura

4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9. Para a combinação T1F2P16, este modelo prevê que se atinja 4 mm de profundidade aos 19,8 anos – Figura 4.7, 9 mm de profundidade aos 32,4 anos – Figura 4.8 e que não se atinge 15 mm de profundidade – Figura 4.9.

A figura 4.11 mostra o tempo, em anos, que cada modelo prevê que se atinja os 13mm de profundidade, para cada uma das combinações de ações consideradas. Valor a partir do qual se considera ser necessário intervir no pavimento.

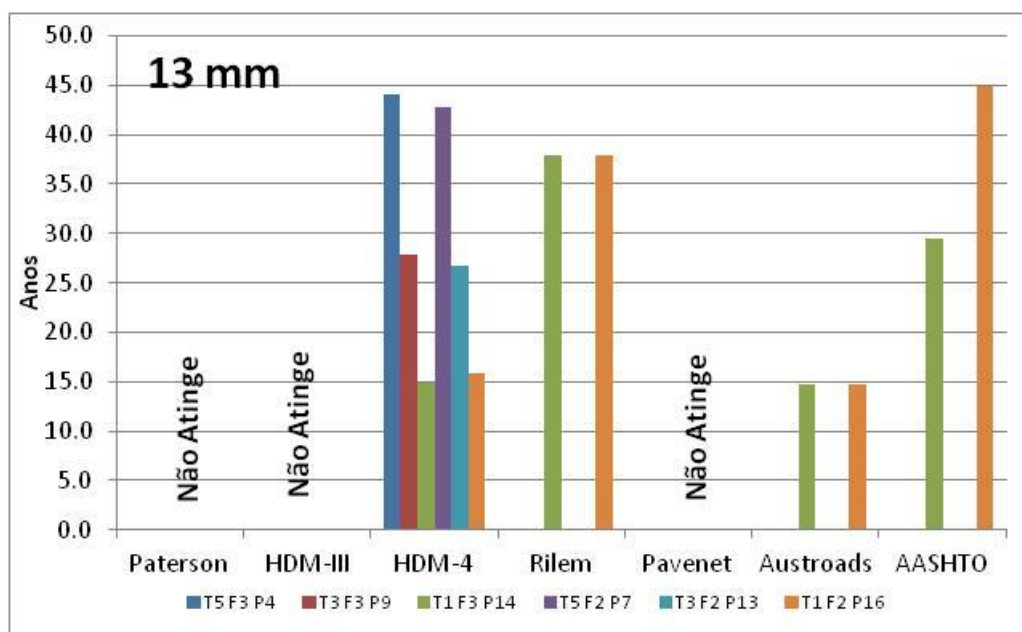


Figura 4.11 - Comparação dos resultados que cada modelo prevê que se atinja 13 mm de profundidade entre todas as combinações consideradas.

De acordo com a Figura 4.11, observa-se que os modelos Paterson, HMD-3 e PAVENET não preveem que seja necessário intervir no pavimento para nenhum dos tipos de estrutura considerados.

Relativamente ao modelo HDM-4, este prevê que seja necessário intervir no pavimento para as estruturas tipo T5F3P4, T3F3P9, T1F3P14, T5F2P7, T3F2P13 e T1F2P16 aos 44,1 anos, 27,9 anos, 14,9 anos 42,8 anos, 26,7 anos e 15,8 anos, respetivamente.

Relativamente ao modelo Rilem, este prevê que apenas será necessário intervir nas estruturas do tipo T1F3P14 e T1F2P16 aos 37,9 anos. O modelo não prevê que seja necessário intervir nos outros tipos de estrutura.

Relativamente ao modelo Austroads, este prevê que apenas será necessário intervir nas estruturas do tipo T1F3P14 e T1F2P16 aos 14,7 anos. O modelo não prevê que seja necessário intervir nos outros tipos de estrutura.

Relativamente ao modelo AASHTO, este prevê que apenas será necessário intervir nas estruturas do tipo T1F3P14 e T1F2P16 aos 29,4 anos e aos 44,9 anos respetivamente. O modelo não prevê que seja necessário intervir nos outros tipos de estrutura.

Segundo o modelo HDM-4, será necessária uma intervenção no pavimento em todos os tipos de estrutura considerados. Assim, para a estrutura do tipo T5F3P4 o modelo prevê-se que se alcance os 13 mm aos 44,1 anos. Para as estruturas T1F3P4 e T1F2P16 não se verifica necessidade de intervenção na análise pelos modelos testados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os modelos apresentados no capítulo 3 (Paterson, HDM-III, HDM-4, Rilem, Pavenet, Austroads e AASHTO), e perceber quanto à viabilidade da sua aplicação ao nível da previsão das deformações permanentes. Deste modo, após análise dos resultados, foi possível chegar às conclusões a seguir descritas.

Da análise dos modelos conclui-se que os modelos HDM-III e Paterson não são adequados à rede rodoviária de Portugal. Estes dois modelos apresentam sempre profundidades previstas de rodéiras muito baixas e quase sempre muito similares entre os dois. O que seria expectável face a semelhança entre os dois modelos.

Dada a simplicidade do modelo PAVENET, já que só tem em conta o tráfego de veículos pesados, também não se deve considerar este como o modelo a adotar.

O modelo HDM-4 é um desenvolvimento dos modelos HDM-III e Paterson, pelo que, e a avaliar pelos resultados coerentes e distantes dos resultados dos modelos anteriores, o HDM-4 é mais fiável do que os seus antecessores. Os valores elevados apresentados por este modelo resultam do facto de ser um modelo que contempla a contribuição do fendilhamento nas deformações permanentes. Este modelo prevê que seja necessário intervir mais cedo no pavimento. Se essa intervenção não for realizada, o modelo prevê valores de profundidade de rodéiras muito elevados.

De todos os modelos analisados, o da AASHTO é o que envolve não só mais variáveis, como também envolve maior complexidade de análise dos dados. Neste modelo a deformação permanente é calculada separadamente para cada tipo de camada e subcamada e depois é feito o somatório das deformações permanentes de todas elas. Os resultados deste modelo apresentam uma evolução de valores com bastante coerência, o que faz do modelo da AASHTO um modelo confiável.

Da análise dos gráficos, considera-se que os modelos HDM-4 e AASHTO são os mais aceitáveis, e são por isso os recomendáveis na aplicação de um estudo de previsão de profundidade de deformações permanentes. Facto que seria de esperar já que são estes modelos os que utilizam mais variáveis, tornando estes modelos mais fiáveis, o que se veio a verificar.

Os valores dos resultados do modelo Austroads estão sempre relativamente próximos dos modelos HDM-4 e AASHTO, sendo assim estes resultados considerados como satisfatórios.

Da análise geral dos modelos, conclui-se que é possível uma boa previsão ao nível da profundidade das deformações permanentes.

Recomenda-se a aplicação dos modelos em mais combinações entre condições de tráfego, de fundação e de pavimento.

De referir ainda que seria também interessante estender este estudo a outros tipos de degradações, nomeadamente ao fendilhamento e ao movimento de materiais.

Considera-se que se justifica a aplicação deste estudo nos sistemas de gestão de pavimentos da rede rodoviária nacional desde que feitas as devidas calibrações, sendo que esta linha de pensamento é reforçada pelos resultados obtidos neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OE. (2013) – Ordem dos Engenheiros. Acedido em Novembro de 2012, em <http://www.ordemengenheiros.pt/pt/a-ordem/especializacoes/horizontais/transportes-e-vias-de-comunicacao/>
- [2] OHMPA (2004) “The ABCs of Pavement Preservation”, Ontario Hot Mix Producers Association, Mississauga.
- [3] Pereira P. e Miranda V. – Gestão e Conservação dos Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho, Braga, 1999.
- [4] COST 325. – New Road Monitoring Equipment and Methods. Final Report of the Action, European Commission, 1997.
- [5] Silva, Rita Justo Pereira – Contribuição para o desenvolvimento de modelos de previsão de fendilhamento de pavimentos rodoviários, 2012.
- [6] Gardete, D.- *Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*. Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Rodoviária, Coimbra, 2006.
- [7] COST 333. 1999 -*Development of New Bituminous Pavement Design Method: Final Report of the Action*. European Commission - Directorate General Transport : Bruxelles, 1999.
- [8] COST 324 (1997) Long Term Performance of Road Pavements. Final Report of the Action. Transportation Research. Luxemburg.
- [9] Kraemer, C., Del Val, M. A., - *Firmes y Pavimentos*, Madrid, 1998.
- [10] Branco F., Pereira P. e Picado Santos L.- *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra, 2008.
- [11] Pavemen Interactive, 2008. Acedido em 12/03/2012, em <http://www.pavementinteractive.org/article/pavement-typespavement-types>.
- [12] Jiménez, F., Sánchez, J., - *Manual de Pavimentação*, CEPESA Betumes, Barcelona, 2006.
- [13] Shakir Shatnawi and Brian D. Toepfer- *Caltrans Maintenance Technical Advisory Guide*.

- [14] PARIS. Pavement Deterioration Models: Deliverable D4-RO 96-SC.404, European Commission, 1998.
- [15] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004) *Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements*. NCHRP - Report 468. Transportation Research Board, Washington, DC.
- [16] Freire, A. – Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários. Tese submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Coimbra, 2002.
- [17] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2002) *Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior*. NCHRP - Report 478. Transportation Research Board, Washington, DC.
- [18] Sousa J. B., Craus J. and Monimith C. L. - "Summary Report on Permanent.
- [19] Telford, T. - *Asphalts in Road Construction*, Londres, 2000.
- [20] Prozzi, J. – *Modeling Pavement Performance by Combining Field and Experimental Data*. Berkeley, 2001.
- [21] Fwa, T F, C Y Tan and W T Chan, "genetic-algorithm programming of road maintenance and rehabilitation". *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 120, No. 5 :710-722, 1994.
- [22] Tua Pereda, J. (2003). A Publication of the National Center for Asphalt Technology, Auburn University. *Asphalt technology news*, Volume 15, number 1.
- [23] Ihs, A., Gustafsson, M., Eriksson, O., Wiklund, M., Sjögren, L. (2011). *Road user effect models – the influence of rut depth on traffic safety*. *VTI Rapport 73*.
- [24] Ferreira A. e Picado santos L. (2007). A Gestão da Qualidade das Redes Rodoviárias – O estado da arte e os Desenvolvimentos Futuros. *Ingenium*, 98. Acedido em Julho de 2012 em <http://pt.scribd.com/doc/24856615/Ing-98>.
- [25] Gonçalves, F., 1999. O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis.

- [26] Freitas, E., 1999. Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Trabalho de Síntese de Provas de Aptidão Pedagógicas e de Capacidade Científica, Universidade do Minho.
- [27] PIARC (1995). *XXth World Road Congress. Technical Committee on Flexible Roads. Report Nº 20.08.B. Permanent International association of Road Congress.* Montréal.
- [28] Li N., Xie W., Haas R., Xie W. (1997). *Investigation of Relationship Between Deterministic and Probabilistic Prediction Models in Pavement Management Systems. Transportation Research Record 1952. Pavement Management and Performance. Transportation Research Board.* pp 70-79. Washington.
- [29] Wang, K.; Zaniewski, J.; Way, G., 1994. Probabilistic Behavior of Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 120 (3), ASCE.
- [30] Ferreira, A. (2001), "Optimização da Conservação de Pavimentos de Redes Rodoviárias", dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, especialidade de Ordenamento do Território e Transportes, Coimbra.
- [31] Paterson, W.D.O. - *Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management.* A World Bank Publication. Washington D.C, 1987.
- [32] NDLI - *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4.* Final Report ADB RETA 5549, Vancouver, B.C, 1995.
- [33] Freeme, C.; Maree, J.; Vilijoen, A.,— *Mechanistic Design of Asphalt Pavements and Verification using the Heavy Vehicle Simulator, Proceedings, Fifth International Conference, Structural Design of Asphalt Pavements, Delft, The Netherlands, pp. 378-391, 1982.*
- [34] Barksdale, R. D, Romain, J. (1972). *"Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials."* *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Volume I, Londres.*
- [35] Bennett, C.R. (1994). *Comparison of loadman and Benkelman beam deflection Measurements,* pp.38, Four States Pavement Management Project, India.
- [36] World Bank HDM-PC: *The Highway Design and Maintenance Standards Model: User's Guide, version 2.0.* World Bank, Washington, D.C.

- [37] Mrawira, D., et al. (1999). Sensitivity Analysis of Computer Models: World Bank HDM-III Model, *Journal of Transportation Engineering*, 125 (5), pp. 421-428.
- [38] Watanatada T, C G Harral, W D O Paterson, A M Dhareshwar, A Bhandari and K Tsunokawa - The Highway Design and Maintenance Standards Model. Volume 1. Description of the HDM-III Model. John Hopkins Press, Baltimore, USA, 1985.
- [39] Ferreira, A.; Micaelo, R.; Souza, R. - Cracking Models for Use in Pavement Maintenance Management.
- [40] Revision of the South African Flexible Pavement Design Method.
- [41] Visser, A., Queiroz, C., and Caroca, A. (1994). Total cost rehabilitation method for use in pavement management, *Proceedings of 3rd International Conference on Managing Pavements*, Texas, USA, pp. 37-44.
- [42] S. Taniguchi & T. Yoshida - Road Technology Research Group, Public Works Research Institute, Japan - CALIBRATING HDM-4 RUTTING MODEL ON NATIONAL HIGHWAYS IN JAPAN, 2003.
- [43] H. Piber, M.N. Partl & C. Raab-RILEM TC 206 ATB, TG 4 (2009) - RILEM interlaboratory test on pavement performance prediction and evaluation.
- [44] Hickson, I.- AustRoads (2010)*Interim Network Level Functional Road Deterioration Models. AustRoads Report AP-T158/10*. Sidney.
- [45] Thornthwaite, CW 1948, 'An approach toward a rational classification of climate', *Geographical Review*, vol.38, no.1, pp.55-94.
- [46] Choumanivong, L & Martin, T 2009, 'Pavement structural deterioration', contract report, Austroads project AT1064, ARRB Group, Vermont South, Vic.
- [47] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) - Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice (Interim Edition), 2008.
- [48] White, T. D. et all. (2002) National Cooperative Highway Research Program. Report 468. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements. Washington D.C.

- [49] Tseng, K. and Lytton, R. (1989) *Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials*. Implication of Aggregates in the Design, Construction, and Performance of Flexible Pavements, ASTM STP 1016, ASTM, pp. 154-172.
- [50] JAE, (1995). *Manual of pavement structures for the Portuguese road network*. Junta Autónoma de Estradas: Portugal. 1–54.
- [51] IM. (2011). *Normals Climate 71-00*. Instituto Português de Meteorologia. [acedido em 21/08/2012]; A partir de: <http://www.meteo.pt/en/oclima/clima.normais/006/>.
- [52] Chen, J., Lin C., Stein E., e Hothan J. - Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements, JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING - ASCE, 2004.
- [53] Deformation on Asphalt Concrete." SHRP-A-318, Strategic Highway Research .
- [54] Program, National Research Council, Washington D.C., 40-60, 1994.
- [55] MOPU Tecnologia Carreteras – Catálogo de Deterioros en Firmes, 1989.
- [56] Miller, J. S. and Bellinger, W. Y. – Distress Intensification Manual for the Long-Term Pavement Performance (Fourth Revised Edition). U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration Publication no. FHWA-RD-03-031, 2003.
- [57] Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários." Volume 1: Projecto de Reabilitação, Gabinete de Gestão da Rede, EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa, 2008.
- [58] Ferreira, A. Meneses, S. and Vicente, F. (2009), Pavement management system for Oliveira do Hospital, Portugal, *Transport*, 162(3), 157-169.
- [59] Ferreira, A., Picado-Santos, L., Antunes, A. (2002). A segment-linked optimization model for deterministic pavement management systems. *The international journal of pavement engineering*, 2, 95-105.

APÊNDICES

Apêndice A Características das várias camadas

Quadro A.1 - Dados de misturas betuminosas.

Estruturas Pavimento	MB		
	h (cm)	E (MPa)	N
2	8	4000	0.35
3	12	4000	0.35
4	14	4000	0.35
5	14	4000	0.35
6	16	4000	0.35
7	18	4000	0.35
8	17	4000	0.35
9	19	4000	0.35
10	18	4000	0.35
11	20	4000	0.35
12	20	4000	0.35
13	23	4000	0.35
14	22	4000	0.35
15	24	4000	0.35
16	26	4000	0.35

Quadro A.2 - Dados de camadas granulares.

Estruturas Pavimento	SbG			
	h (cm)	E F3 (MPa)	E F2 (MPa)	N
1	20	200	120	0.35
2	20	200	120	0.35
3	20	200	120	0.35
4	20	200	120	0.35
5	20	200	120	0.35
6	20	200	120	0.35
7	20	200	120	0.35
8	20	200	120	0.35
9	20	200	120	0.35
10	20	200	120	0.35
11	20	200	120	0.35
12	20	200	120	0.35
13	20	200	120	0.35
14	20	200	120	0.35
15	20	200	120	0.35
16	20	200	120	0.35

Quadro A.3 - Dados de fundação tipo 3.

Estruturas Pavimento	Fundação F3									
	SN AASHTO	CBR (%)	E (MPa)	N	SNC	Et (base)	et (topo)	SD(mm)	εv (topo SbG)	εv (topo BD+MB)
1	2.36	20	100	0.40	4.06					
2	2.63	20	100	0.40	4.33					
3	3.17	20	100	0.40	4.86					
4	3.43	20	100	0.40	5.13	1.35E-04	2.05E-05	0.2519	1.27E-04	3.01E-04
5	3.61	20	100	0.40	5.30					
6	3.87	20	100	0.40	5.57					
7	3.97	20	100	0.40	5.67					
8	4.01	20	100	0.40	5.71					
9	4.28	20	100	0.40	5.97	9.41E-05	1.24E-05	0.1993	8.65E-05	6.47E-05
10	4.31	20	100	0.40	6.01					
11	4.41	20	100	0.40	6.11					
12	4.58	20	100	0.40	6.28					
13	4.81	20	100	0.40	6.51					
14	4.85	20	100	0.40	6.55	7.58E-05	1.02E-05	0.1761	7.17E-05	5.12E-05
15	5.12	20	100	0.40	6.82					
16	5.39	20	100	0.40	7.08					

Quadro A.4 - Dados da fundação tipo 2.

Estruturas Pavimento	Fundação F2									
	SN AASHTO	CBR (%)	E (MPa)	N	SNC	Et (base)	et (topo)	SD(mm)	εv (topo SbG)	εv (topo BD+MB)
1	2.36	10	60	0.40	3.592					
2	2.63	10	60	0.40	3.860					
3	3.17	10	60	0.40	4.395					
4	3.43	10	60	0.40	4.663					
5	3.61	10	60	0.40	4.836					
6	3.87	10	60	0.40	5.104					
7	3.97	10	60	0.40	5.199	1.24E-04	1.66E-05	0.2931	1.12E-04	3.01E-04
8	4.01	10	60	0.40	5.238					
9	4.28	10	60	0.40	5.506					
10	4.31	10	60	0.40	5.545					
11	4.41	10	60	0.40	5.639					
12	4.58	10	60	0.40	5.813					
13	4.81	10	60	0.40	6.041	8.68E-05	1.14E-05	0.2381	8.14E-05	6.07E-05
14	4.85	10	60	0.40	6.080					
15	5.12	10	60	0.40	6.348					
16	5.39	10	60	0.40	6.616	6.99E-05	9.07E-06	0.2132	6.73E-05	6.73E-05