



Mafalda da Costa Pardal

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Modelos probabilísticos de previsão de fendilhamento em pavimentos rodoviários

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Construção

Orientador: Luís Manuel Trindade Quaresma,
Professor Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Júri:

Presidente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu
Arguente: Professor Doutor Luís Armando Canhoto Neves
Vogal: Professor Eng.º Luís M. T. Quaresma

“Copyright” Mafalda da Costa Pardal , FCT/UNL e UNL

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

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao meu orientador, Professor Luís Quaresma, pela disponibilidade, confiança e motivação demonstrados no decorrer do trabalho realizado.

Um muito obrigada ao meu amigo Carlos Mata pela ajuda essencial no *software MATLAB (R2010a)*, sem ele esta tarefa tornar-se-ia mais morosa.

Ao Mário pela enorme paciência, carinho e apoio demonstrados em todos os momentos.

Aos meus amigos Gonçalo Telo, Luís Gonçalves, Viviana Delgado, Pedro Romão e Inês Oliveira pelo companheirismo e pelas inúmeras horas que passámos juntos no decorrer deste percurso académico.

Às minhas amigas Rita Moreira e Susana Monteiro que me acompanham desde a infância e que, indirectamente, me ajudaram durante todo este percurso. Por toda a amizade, um muito obrigada.

Por último, mas o mais importante, à minha família que sempre demonstrou grande confiança em mim e por todo o apoio e carinho que me concederam sempre.

Resumo

A presente dissertação tem como finalidade elaborar um modelo de previsão de deterioração de uma rede rodoviária ao longo do tempo. A elaboração deste modelo recorre a métodos probabilísticos, mais especificamente aos processos de decisão de Markov. A aplicação dos processos de Markov recorreu a dados referentes a uma rede de estradas que, no caso em estudo, diz respeito a um inventário da rede elaborado através de inspecções visuais feitas às secções de pavimentos, sendo a degradação estudada o fendilhamento.

É importante perceber se o modelo utilizado na previsão do desempenho é eficiente, ou seja, se retrata de forma eficaz a realidade. Para isso é calculada a verosimilhança do modelo e posteriormente é efectuado um processo de optimização da mesma com a finalidade de obter um resultado mais próximo do real. Desta maneira é possível comparar os dados do inventário com os dados que se obtém a partir do valor da verosimilhança optimizada e, assim, torna-se fácil perceber se o modelo utilizado se aproxima de forma eficiente da realidade.

A previsão do desempenho de pavimentos rodoviários é importante para a gestão das estratégias de conservação a efectuar. Por esta razão, apresenta-se, neste documento, os tipos de acções de conservação existentes bem como as técnicas de reparação que podem ser utilizadas para cada estratégia de conservação.

Apresenta-se, então, como exemplos práticos, a previsão de desempenho dos pavimentos para os processos de Markov em tempo contínuo e, ainda, o comportamento futuro de um pavimento quando é sujeito aos tipos de conservação estudados.

Para resolver os problemas enunciados recorreu-se ao *software MATLAB (R2010a)*, tendo sido utilizadas as rotinas de minimização pré-programadas do mesmo para a obtenção do valor óptimo da verosimilhança.

PALAVRAS-CHAVE:

Desempenho de pavimentos rodoviários, deterioração, modelos probabilísticos, processos de Markov, minimização, verosimilhança, estratégias de conservação.

Abstract

The present dissertation is directed to the development of a model which predicts the deterioration of a road network through time. This model uses probabilistic methods, specifically Markov decision processes. The application of Markov processes was based on data related to a road network. In the case presented, the data collected are obtained through the visual inspections conducted in the pavement sections, being the cracking the degradation of studying.

It is important to understand if the model used in the performance prediction is efficient, that is, if it reflects reality effectively. In order to ascertain the model's efficiency, its likelihood is calculated and later an optimization process is performed over it with the purpose to obtain a result as close as possible to reality. This way it is possible to compare the inventory data with the results obtained from the optimized likelihood value and, therefore it becomes easy to realize if the selected model is efficient in portraying reality.

Predicting the pavements performance is important for the management of conservation actions. For this reason, the types of conservation actions and respective repair techniques are presented in this dissertation.

This document covers two practical examples, the performance prediction of pavements for continuous Markov processes and the future behavior of a pavement subjected to the conservation types addressed.

The problems enunciated were solved using the software *MATLAB (R2010a)*, in which pre-programmed minimization routines were used in order to obtain the optimum likelihood value.

KEYWORDS:

Road pavements performance, deterioration, probabilistic models, Markov processes, minimization, likelihood, maintenance actions.

Índice de Matérias

Agradecimentos

Resumo i

Abstract iii

Índice de Figuras vii

Índice de Tabelas ix

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos xi

1 Generalidades 1

1.1 Enquadramento 1

1.2 Objectivos 2

1.3 Metodologia adoptada 2

1.4 Organização do trabalho 3

2 Caracterização do fendilhamento em sistemas de gestão de pavimentos 5

2.1 Introdução 5

2.2 Estrutura de um sistema de gestão rodoviária 6

2.2.1 Base de dados 6

2.2.2 Avaliação de qualidade estrutural e funcional 8

2.2.3 Modelos de previsão do comportamento 8

2.2.4 Análise económica incluindo optimização 9

2.2.5 Programa de conservação/reabilitação 9

2.3 Caracterização das degradações numa base de dados 10

2.4 Definição dos estados de condição para o fendilhamento 12

2.5 Estratégias de conservação 19

2.6 Técnicas de conservação de pavimentos rodoviários 21

2.6.1 Conservação preventiva 22

2.6.2 Conservação correctiva 23

3 Previsão de fendilhamento recorrendo aos processos de Markov 27

3.1 Cadeias de Markov 27

3.2 Estimativa da matriz probabilística, P , a partir de dados de observação 30

3.2.1 Tempo discreto 30

3.2.2 Tempo contínuo 31

3.2.3	Verosimilhança	33
3.3	Consideração da conservação de pavimentos	33
3.3.1	Conservação preventiva com base no tempo	34
3.3.2	Conservação correctiva com base no estado	35
4	Caso de estudo	37
4.1	Objectivos	37
4.2	Informação contida na base de dados	37
4.3	Análise de dados	38
4.4	Cadeias de Markov em tempo contínuo	41
4.4.1	Estimativa da verosimilhança	42
4.4.2	Maximização da verosimilhança	42
4.4.3	Avaliação do ajustamento do modelo	45
4.4.4	Evolução das probabilidades de transição	46
4.4.5	Tempo de permanência nos diferentes estados de condição	49
4.5	Previsão do desempenho de uma rede rodoviária	50
4.5.1	Sem considerar acções de conservação	53
4.5.2	Considerando acções de conservação	54
4.5.3	Evolução de cada estado de condição	60
4.6	Análise dos custos de aplicação das acções de conservação	62
5	Considerações finais	67
5.1	Conclusões	67
5.2	Perspectivas para desenvolvimentos futuros	68
	Bibliografia	71
A	Inventário utilizado no desenvolvimento do trabalho	75

Índice de Figuras

2.1	Estrutura de um sistema de gestão de pavimentos.	6
2.2	Modelos determinísticos e modelos probabilísticos.	9
2.3	Ilustração das degradações em pavimentos flexíveis.	12
2.4	Evolução do fendilhamento em pavimentos rodoviários flexíveis.	13
2.5	Ilustração dos níveis de gravidade associados ao fendilhamento.	18
2.6	Limites de aplicação dos três tipos de conservação.	20
2.7	Conservação preventiva e conservação correctiva.	20
2.8	Tratamentos a aplicar de acordo com o tipo de conservação.	21
2.9	Metodologia de selecção da técnica de conservação mais adequada.	22
3.1	Andrei Markov (1856-1922).	27
3.2	Evolução do estado de condição de um pavimento aquando a aplicação da conservação preventiva com base no tempo.	34
3.3	Evolução do estado de condição de um pavimento quando é aplicada a conservação correctiva com base no estado, com $EC_i = 3$ e $EC_f = 1$	35
4.1	Fluxograma do programa de maximização da verosimilhança desenvolvido.	43
4.2	Evolução da verosimilhança.	44
4.3	Contabilização do número de secções em cada estado de condição após cada data de inspecção, obtida através da consulta do inventário,	45
4.4	Comparação da contabilização do número de secções, em cada estado de condição à data de cada inspecção, dos valores observados e dos valores obtidos do modelo.	46
4.5	Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo para o estado de condição inicial 1.	47
4.6	Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo para o estado de condição inicial 2.	47
4.7	Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo para o estado de condição inicial 3.	47
4.8	Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo para o estado de condição inicial 4.	48
4.9	Evolução do fendilhamento tendo em conta o tempo de permanência nos diversos estados de condição.	50
4.10	Evolução do estado de condição médio da rede ao longo do tempo.	53
4.11	Ilustração do número de secções em cada estado de condição, na data início e a partir de 6 anos de previsão, quando não são aplicadas estratégias de conservação.	53
4.12	Ilustração do número de secções em cada estado de condição.	55
4.13	Evolução do estado médio da rede após aplicação das estratégias de conservação B e C.	56

4.14 Ilustração do número de secções que foram conservadas, por ano, para os dois cenários considerados.	57
4.15 Ilustração do número de secções em cada estado de condição, após aplicação das estratégias B e C no último ano de previsão.	58
4.16 Evolução do estado médio da rede após aplicação da estratégia de conservação A.	58
4.17 Ilustração do número de conservações correspondentes à Estratégia A, por ano, aplicadas às 24 secções.	59
4.18 Evolução dos estados de condição sem aplicação de acções de conservação	60
4.19 Evolução dos estados de condição com aplicação da Estratégia B.	61
4.20 Evolução dos estados de condição com aplicação da Estratégia C.	61
4.21 Evolução dos estados de condição com aplicação da Estratégia A.	62
4.22 Ilustração dos custos e do número de intervenções das acções de conservação na data de início.	64
4.23 Ilustração dos custos e do número de intervenções das acções de conservação para um horizonte de 20 anos.	64

Índice de Tabelas

2.1	Dados propostos para descrição do estado do pavimento.	7
2.2	Degradações em pavimentos flexíveis	11
2.3	Tipos de fendilhamento em pavimentos flexíveis.	13
2.4	Pesos para os tipos de fendilhamento para pavimentos flexíveis.	15
2.5	Dimensão da abertura das fendas.	16
2.6	Valores deduzidos devido aos eixos dos veículos (cw).	17
2.7	Valores deduzidos devido aos restantes factores (co).	17
2.8	Definição dos estados de condição.	17
2.9	Níveis de gravidade de fendilhamento para pavimentos flexíveis	18
2.10	Objectivo e duração das técnicas de conservação.	24
2.11	Previsão a 40 anos do tipo de tratamento a utilizar num pavimento flexível.	25
4.1	Dados relativos à secção de pavimento 1	38
4.2	Caracterização do fendilhamento nas secções em estudo	39
4.3	Caracterização dos Estados de Condição	39
4.4	Evolução dos estados de condição, secção 21	40
4.5	Divisão da secção 21 em duas secções	40
4.6	Registo de inspecções das secções de pavimento 1.	42
4.7	Valores estimados do tempo de permanência	49
4.8	Comparação das fases de fendilhamento.	50
4.9	Inventário utilizado na evolução dos estados de condição	51
4.10	Dados referentes à secção 15.	52
4.11	Dados referentes às acções de conservação.	54
4.12	Tabela de resumo do tipo de intervenções e do número de secções afectadas para o ano 2013.	63
4.13	Tabela de resumo do número intervenções e do número de secções afectadas durante o período de previsão.	63
4.14	Custos associados aos tipos de intervenções.	63
4.15	Custo total das estratégias de conservação.	64
A.1	Inventário das secções disponibilizadas com os respectivos estados de condição obtidos	75
A.2	Inventário das secções utilizadas com os respectivos estados de condição obtidos	76

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

EUA	Estados Unidos da América
PSI	Present Serviceability Index
SAMI	Stress Absorbing Membrane Interlayer
SGP	Sistemas de Gestão de Pavimentos

Siglas

COST	European COoperation in the field of Scientific and Technical Research
EP	Estradas de Portugal
FDOT	Florida Department Of Transportation
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

Símbolos

TP_{cr}	taxa de fendilhamento total
$TP_{cr,A}$	taxa de área fendilhada
$TP_{cr,L}$	taxa de comprimento fendilhado
$TP_{cr,E}$	taxa de fendilhamento do elemento
A_{ref}	área de referência
W_m	peso das áreas fendilhadas
$S_{cr,a,i}$	gravidade do tipo de fendilhamento i
A_i	área das fendas para o tipo de fendilhamento i
$I_{width,l}$	largura influência padrão de fissuras lineares

$S_{cr,l,j}$	gravidade do tipo de fendilhamento j
L_j	comprimento de fendas para o tipo de fendilhamento j
W_o	peso dos elementos fendilhados
$I_{area, k}$	área padrão de elementos com fendas
$S_{cr,E,k}$	gravidade das fendas num elemento de tipo de fendilhamento k
E_k	número de elementos com fendas do tipo k
CR	parâmetro de fendilhamento
cw	valores deduzidos, associados ao fendilhamento, devido aos eixos dos veículos
co	valores deduzidos, associados ao fendilhamento, devido aos restantes factores
C_t	coeficiente de fendilhamento
SF_1, SF_2, SF_3	área afectada com fendilhamento de gravidade 1, 2 e 3, respectivamente
L_{via}	largura da via
<i>Extensão</i>	comprimento da secção
k	número de estados de condição
Δt	intervalo de tempo
P	matriz de probabilidades de Markov
p_{ij}	probabilidade de transição do estado i para o estado j
p_{ii}	probabilidade de permanência no estado i
$p(t)$	vector de probabilidades de estados de condição no tempo t
I	matriz identidade
EC_{med}	estado de condição médio
N_{ij}	número total de secções do pavimento que passam do estado de condição i para o estado de condição j durante um intervalo de tempo
N_i	número total de secções do pavimento no estado de condição i no início de cada intervalo de tempo
m	número de intervalos de tempo Δt
q	razão de uma progressão geométrica
Q	matriz intensidade
$q_{ij}(t)$	taxa de transição do estado i para o estado j
$q_{ii}(t)$	taxa de permanência no estado i

n_{ij}	número de elementos que transita do estado i para o estado j
t_p	tempo de permanência
V	verosimilhança
N	número total de secções
M	número total de intervalos de tempo, entre inspecções, para cada secção
$T_{p,i}$	tempo até à primeira aplicação da conservação
T_d	tempo de duração da aplicação da conservação
EC_i	estado de condição a partir do qual se deseja efectuar a acção de conservação
EC_f	estado de condição que se pretende atingir depois de efectuada a acção de conservação

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Enquadramento

Grande parte dos recursos das autoridades rodoviárias dos países da OCDE são despendidos nas actividades de conservação de pavimentos rodoviários, estimando-se que os mesmos possam ter alguma variabilidade, podendo representar cerca de 50% dos orçamentos anuais [37]. No caso das Estradas de Portugal entre 2005 e 2012 foram despendidos 602 milhões de euros em actividades de conservação, representando 28% dos investimentos totais na rede sob gestão directa [36]. No entanto os recursos disponibilizados para a conservação de pavimentos são frequentemente escassos e há, também, que ter conta as actividades de conservação diferidas que são muito comuns nestes países [37].

A realidade cotidiana para os profissionais de administração de estradas é a de aumentar a sua eficácia e produtividade na realização de uma missão que cresce em complexidade, pois as restrições orçamentais são cada vez mais severas. Os mesmos profissionais devem tentar minimizar as despesas da sociedade sobre os transportes mas também atender às necessidades do usuário [28].

É cada vez mais comum as autoridades rodoviárias, como é o caso dos países da OCDE [37], utilizarem sistemas de gestão da conservação de pavimentos que recorrem a procedimentos sistemáticos e objectivos para assegurarem que a conservação das redes rodoviárias seja efectuada optimizando os recursos de forma a cumprir o orçamento disponível. As condições estruturais também podem, ao fim de algum prazo, conduzir a degradações que afectem as condições de serviço, podendo ser avaliadas a partir de diferentes parâmetros que expressem o estado do pavimento. Um desses parâmetros é o fendilhamento.

A evolução do estado dos pavimentos pode ser realizada com recurso a modelos de previsão determinísticos ou probabilísticos. A evolução do fendilhamento, ao longo do tempo, num pavimento em função de secções de estrada através de métodos determinísticos já foi avaliada a partir de dados da rede rodoviária nacional [38]. Contudo, é opinião generalizada [7, 46] que, devido à incerteza associada à propagação desta degradação nos pavimentos, torna-se imperativo o uso de métodos probabilísticos no estudo do desempenho dos mesmos.

Nesta temática é comum ser utilizado, como método probabilístico, as cadeias de Markov, sendo que através das mesmas é possível prever o estado do pavimento ao longo do tempo, tornando-se, assim, mais fácil a decisão do tipo de conservação a aplicar. A metodologia seguida pelas cadeias de Markov inclui a análise de dados históricos relativos a pavimentos, de forma a verificar a progressão das degradações e,

dessa forma, prever as probabilidades da matriz de transição. Deste modo, esta metodologia proporciona a elaboração de planos de conservação de acordo com a condição futura dos pavimentos [43].

1.2 Objectivos

A presente dissertação tem como principal objectivo estabelecer a matriz de probabilidades de transição utilizada nos processos probabilísticos de Markov, apoiando-se numa base de dados de uma rede rodoviária, e efectuar a previsão do desempenho de pavimentos rodoviários ao longo do seu período de vida útil. O estudo da previsão do desempenho de pavimentos rodoviários traz uma grande vantagem e facilidade a nível da gestão de pavimentos uma vez que permite obter os seus estados de condição futuros. Para a obtenção dos mesmos, julgou-se oportuno, no desenvolvimento deste trabalho, a utilização de uma base de dados relativa a uma rede rodoviária.

Um outro objectivo deste trabalho passa pela simulação da aplicação de acções de conservação de forma a perceber a influência que as mesmas têm na evolução do fendilhamento num pavimento ao longo do tempo, permitindo, assim, elaborar, previamente e de forma mais simples, planos de conservação com as estratégias de reabilitação e conservação mais indicadas.

1.3 Metodologia adoptada

Como anteriormente mencionado, no desenvolvimento deste trabalho utilizou-se uma base de dados para a obtenção dos estados de condição das secções de pavimento em estudo. A base de dados utilizada é uma base real que contém dados referentes a inspecções visuais de fendilhamento relativas a quatro períodos de tempo: 2003, 2007, 2010 e 2012. Estes dados são utilizados na previsão da deterioração dos pavimentos através de métodos probabilísticos que recorrem aos processos de Markov.

Foram, posteriormente, estabelecidos critérios para definir os diferentes estados de condição. Esses critérios tiveram em conta os elementos disponíveis na base de dados.

Após a definição dos estados de condição, efectuou-se a classificação do estado de cada secção da rede em cada uma das campanhas de inspecção.

A principal preocupação na previsão do desempenho dos pavimentos é encontrar a matriz de probabilidades de transição. A mesma foi encontrada através da automatização do problema com recurso ao *software MATLAB (R2010a)* e utilizando processos de Markov em tempo contínuo, uma vez que se concluiu que os dados utilizados não permitem a utilização dos processos de Markov em tempo discreto.

Após a previsão do desempenho futuro dos pavimentos são enunciadas estratégias e técnicas de reparação dos mesmos e simuladas, recorrendo ao mesmo *software*, acções de conservação a que os mesmos podem estar sujeitos. Desta forma, é possível visualizar o efeito das mesmas na progressão do fendilhamento.

1.4 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos:

No capítulo 1 é feita a introdução ao tema em estudo. Este capítulo está dividido em quatro subcapítulos: enquadramento, objectivos, metodologia adoptada e organização do trabalho.

No capítulo 2, intitulado de "Caracterização do fendilhamento em sistemas de gestão de pavimentos", é abordado, de uma forma geral, os sistemas de gestão de pavimentos, é apresentada a diferença dos modelos de previsão determinísticos e dos modelos de previsão probabilísticos, são mostradas as degradações existentes nos pavimentos e, por último, as diferentes formas de contabilizar o fendilhamento em diferentes zonas geográficas, quer através da largura da fenda quer através da área fendilhada, que possam ser utilizados no estabelecimento dos estados de condição. É, também, efectuado um levantamento das técnicas para a conservação de pavimentos fendilhados.

No capítulo 3 é explicada a metodologia para deduzir a matriz de probabilidades de transição, a partir de dados de observação, e a metodologia de previsão do estado de condição futuro dos pavimentos em estudo, através das cadeias de Markov. São, ainda, dadas a conhecer as acções de conservação possíveis, preventivas ou correctivas, para melhorar o estado de condição dos pavimentos, bem como as formas de aplicação possíveis das mesmas. São, ainda, comparados custos das respectivas acções de conservação.

No capítulo 4 apresenta-se o caso prático, onde são apresentados exemplos práticos das metodologias apresentadas no capítulo 3. É efectuada a previsão do estado de condição futuro dos pavimentos e faz-se a simulação da aplicação de acções de conservação com o intuito de visualizar o desempenho de um pavimento rodoviário após a aplicação das mesmas.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões finais obtidas e possíveis desenvolvimentos futuros do trabalho.

Capítulo 2

Caracterização do fendilhamento em sistemas de gestão de pavimentos

2.1 Introdução

Um sistema de gestão de pavimentos (SGP) pode ser definido, como um conjunto de ferramentas/procedimentos, de recolha, análise, conservação e comunicação de dados, utilizados no auxílio de tomada de decisões, melhores e mais informadas, por parte de determinada entidade, de forma a encontrar estratégias de conservação de pavimentos mais indicadas e com os melhores custos [1, 45]. Tendo em conta que assim que um pavimento é construído se inicia o seu processo de deterioração, revela-se de grande importância o processo de conservação dos mesmos [1].

Salienta-se, no entanto, que a elaboração de um SGP não é uma tarefa fácil, pois dela fazem parte uma análise exaustiva e um bom conhecimento do meio envolvente e, sobretudo, porque está sujeito a uma limitação dos meios disponíveis. É, ainda, de notar que este processo deve ser efectuado por etapas de forma a integrar e racionalizar uma situação existente [31]. O SGP opera em dois níveis distintos, ao nível da rede e ao nível do projecto. Ao nível da rede o objectivo é prever as condições futuras da rede, efectuar uma estimativa orçamental de forma a manter, no futuro, a rede em condições designadas de aceitáveis, comparar o efeito dos diferentes cenários de financiamento da rede e justificar o orçamento anual utilizado em conservações. Por outro lado, ao nível do projecto o objectivo é identificar as secções que são candidatas a projectos de conservação, providenciar alternativas de conservação para cada um deles, analisar técnica e economicamente cada alternativa e justificar a necessidade de actividades de conservação [45, 46]. No âmbito do presente trabalho será, essencialmente, considerada a utilização do SGP ao nível da rede.

Analisar-se-ão, de seguida, os módulos presentes na estruturação de um sistema de gestão de pavimentos a ser aplicado ao nível de uma rede rodoviária, os elementos para caracterização das degradações a incluir na base de dados do sistema e a forma como se pode caracterizar o fendilhamento observado através de estados de condição. Irão ser, também, abordadas técnicas e estratégias de conservação dos pavimentos rodoviários.

2.2 Estrutura de um sistema de gestão rodoviária

Tendo em conta que um sistema de gestão de pavimentos se destina a fornecer informação sobre o mesmo, surge, como módulo nuclear da sua estruturação, a base de dados, Figura 2.1, pois é ela que serve de elo de ligação entre a informação proveniente do exterior do sistema e os restantes módulos do sistema de gestão [31].

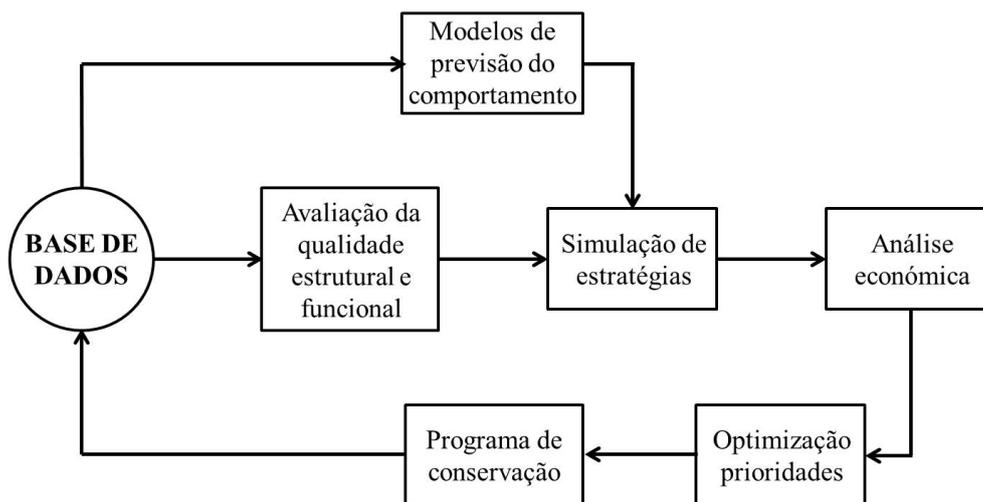


Figura 2.1: Estrutura de um sistema de gestão de pavimentos. Adaptado de [31].

2.2.1 Base de dados

As bases de dados são elaboradas com o intuito de servir de apoio ao sistema de gestão de pavimentos [13]. Da base de dados deve constar todo o inventário da rede, com as soluções utilizadas na construção, conservação e reabilitação, proporcionando, assim, um meio simples através do qual é possível tomar decisões que permitam a escolha entre conservação e reabilitação [39]. Para a estruturação de uma base de dados é necessário, em primeiro lugar, obter informação geográfica relativa à rede. Através de um sistema de informação geográfica é possível capturar, armazenar, gerenciar, recuperar, consultar, analisar e apresentar dados espaciais tais como a localização de uma secção de pavimento ou algum tipo de degradação específico ao longo da secção [13, 39]. É de notar que, quando se faz referência a um pavimento este é apresentado através da agregação de secções rodoviárias denominadas de segmento de gestão, sendo que cada secção é definida por um nó de início e um nó de fim, definindo-se, desta forma, a extensão da mesma [13].

Posteriormente, é necessário efectuar o levantamento das condições da rede. Este levantamento é feito através da observação e registo de uma série de parâmetros de caracterização das condições, designados de "parâmetros de estado". Na construção da base de dados é preciso realizar, ainda, o registo das degradações e dos dados complementares referentes ao pavimento. Desta forma, e após a caracterização dos estados das secções do pavimento, é possível fazer a avaliação da aplicação dos recursos [13]. De seguida serão analisadas as informações que devem ser encontradas numa base de dados [39].

Inventário das secções

Um inventário de secções deve conter informações relativas à extensão e largura do pavimento, o tráfego médio diário anual (de ligeiros e pesados), a designação da estrada, tipo e classificação da superfície, ano de tráfego, limite de velocidade e número de reabilitações.

Histórico dos pavimentos

No histórico das secções de pavimento devem ser indicadas as constituições das camadas do pavimento e a sua espessura, para o ano de construção e todas as medidas de conservação e reabilitação efectuadas bem como os custos de construção/conservação/reabilitação.

Estado superficial do pavimento

Para avaliar o estado do pavimento é necessário quantificar e classificar os tipos de degradações presentes em cada secção do inventário considerado, para posteriormente atribuir um valor a cada secção ou a uma área da secção, que defina a gravidade da mesma.

Na Tabela 2.1 é descrita a informação contida na base de dados da EP, que é utilizada em Portugal.

Tabela 2.1: Dados propostos para descrição do estado do pavimento [13].

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

2.2.2 Avaliação de qualidade estrutural e funcional

O sistema de avaliação de qualidade tem como objectivo classificar os elementos constituintes da base de dados de forma a tomar decisões relativamente às fases seguintes. Estes sistemas baseiam-se nos dados recolhidos *in situ* e determinam índices que traduzem a qualidade estrutural e funcional do pavimento [31]. Estes índices avaliam a qualidade de um pavimento e representam o estado do pavimento em função das características superficiais e das degradações, como sejam, a irregularidade longitudinal, as rodeiras, o fendilhamento, a pele de crocodilo, as peladas, as covas e as reparações. A avaliação é efectuada trecho a trecho sendo usual o recurso a programas informáticos [23].

2.2.3 Modelos de previsão do comportamento

As bases de dados permitem elaborar modelos de previsão de forma a prever o desempenho futuro dos pavimentos. Estes modelos podem ser determinísticos ou probabilísticos e permitem elaborar cenários de evolução da rede, podendo ser ajustados à medida que forem obtidos mais dados para a base. Os modelos determinísticos fazem uma previsão de um dado estado de deterioração futuro através de funções matemáticas. Essas funções são estabelecidas com base em observação do estado da rede. Por outro lado, os modelos probabilísticos fazem a previsão do grau de deterioração através da transição entre estados de condição e calculam a probabilidade de ocorrência de uma série de resultados possíveis [30].

Na primeira modalidade de modelos de previsão abordada, assume-se que o comportamento de um pavimento pode ser formulado sem contabilizar a incerteza associada à sua deterioração. No entanto, esta não é a forma mais correcta de analisar este problema. Utilizou-se, na presente dissertação, um modelo probabilístico que permite que a análise das condições de um pavimento seja feita de forma estocástica, não desprezando a respectiva incerteza associada à sua deterioração [46].

A Figura 2.2 ilustra a previsão da deterioração de um pavimento segundo os modelos determinísticos em comparação com os modelos probabilísticos. Na mesma, pode observar-se que são representados no eixo das ordenadas os estados de condição de um pavimento rodoviário, em que as diferentes formas de os definir são apresentadas mais à frente neste capítulo. Note-se que, o número de estados de condição não é um valor fixo e o valor associado a essa variável, que define a melhor condição do pavimento, é o de abcissa nula ($t = 0$ anos). A linha a tracejado representada corresponde à previsão da degradação de acordo com os modelos determinísticos e a gama de valores representada pela curva em forma de sino, é determinada através dos modelos probabilísticos. O ponto de intersecção das duas (k_1), assinalado na figura, representa o estado do pavimento para os modelos determinísticos e o estado de condição mais provável do pavimento para modelos probabilísticos. Indica-se como p_{k_2} a probabilidade do estado de degradação corresponder ao valor k_2 .

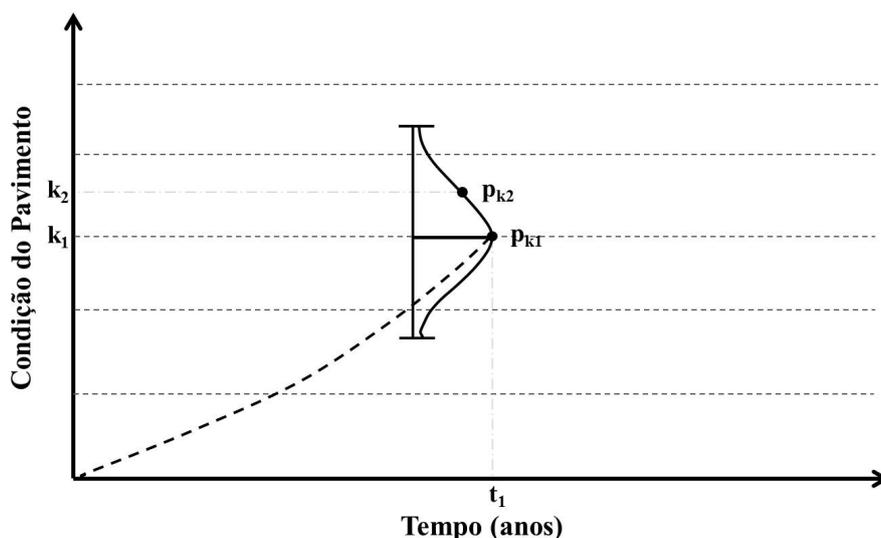


Figura 2.2: Modelos determinísticos e modelos probabilísticos.

2.2.4 Análise económica incluindo optimização

Com base nos resultados obtidos através dos modelos de previsão é possível elaborar diferentes estratégias de conservação da rede sendo, depois, possível avaliar os custos e benefícios das mesmas [31]. Desta análise fazem parte técnicas que, através de ferramentas matemáticas, priorizam as estratégias de conservação, apoiando, assim, a decisão relativamente à escolha da estratégia mais rentável, combinando custos e benefícios, tendo em conta certas condições técnicas e económicas [31, 45]. A comparação destas estratégias é efectuada com base num valor global que admite os custos suportados pela administração para intervenções nos pavimentos e os custos suportados pelos utilizadores e atende às restrições de custos [34].

2.2.5 Programa de conservação/reabilitação

Da análise económica é possível, através do módulo de optimização, elaborar, um programa de conservação/reabilitação de forma a manter certas características de qualidade da rede rodoviária [31].

A decisão de necessidade de intervenção é tomada com base na evolução do estado dos pavimentos. As estratégias podem ter um carácter mais preventivo ou mais correctivo tendo em conta os seguintes estágios [34]:

- Estágio crítico:

Este estágio é definido por um valor, de avaliação de qualidade estrutural ou funcional, que se considere como valor limite do estado do pavimento. Uma vez atingido este valor, é obrigatório intervir de forma correctiva de modo a remediar o defeito.

2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS DEGRADAÇÕES NUMA BASE DE DADOS

- Estágio de alerta:

Este estágio ocorre um certo período antes de se atingir o estágio crítico, podendo ser estimado através dos modelos de previsão do comportamento. Desta forma é possível ir acompanhando a evolução da deterioração do pavimento de forma a controlar o aparecimento do estágio crítico e intervir assim que necessário.

- Estágio de intervenção preventiva:

É aconselhável que a intervenção preventiva ocorra um período de tempo precedente ao estágio de alerta com o intuito de garantir um período mínimo entre duas operações de conservação consecutivas. Quando se atinge este período é feita uma intervenção de maneira a retardar o aparecimento do estágio crítico.

As principais vantagens de um SGP, atendendo ao atrás referido, são:

- Justificar os níveis de financiamento;
- Planificar de uma forma mais eficaz melhoramentos da rede em função de pedidos de crédito;
- Demonstrar os efeitos de diferir trabalhos ou diminuir os níveis de qualidade;
- Estabelecer programas de prioridades;

2.3 Caracterização das degradações numa base de dados

O período de dimensionamento de um pavimento rodoviário é limitado, sendo normal considerar-se, para pavimentos flexíveis, uma duração de 20 anos. Tendo em conta a estrutura do pavimento, características mecânicas dos materiais e espessura das camadas, podem ocorrer degradações significativas a partir de uma certa intensidade de tráfego, agravado pelas condições climáticas desfavoráveis e/ou a deficiências construtivas [35]. Em Portugal o catálogo de degradações da EP [12] permite a determinar e quantificar os tipos de degradações. Na Tabela 2.2 e na Figura 2.3 ilustram-se as degradações consideradas em pavimentos flexíveis, assim como uma breve descrição de cada uma.

Tabela 2.2: Degradações em pavimentos flexíveis. [12]

Degradação	Tipologia	Descrição	Ilustração
Fendilhamento	Fendas Longitudinais	Fendas paralelas ao eixo da estrada, na zona de passagem dos rodados dos veículos ou junto ao eixo.	a)
	Fendas transversais	Fendas perpendiculares ao eixo da estrada, abrangem parte ou toda a largura da faixa de rodagem.	
	Pele de crocodilo	Fendas que formam entre si uma malha de dimensão variável, localizam-se, inicialmente, na zona de passagem dos rodados dos veículos até atingirem toda a largura da via de tráfego.	
Deformações	Rodeiras	Deformação transversal localizada ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos pesados.	b)
	Deformações localizadas	Alterações de nível do pavimento, formando depressões ou alteamentos, podendo surgir isoladamente em diferentes pontos do pavimento.	
Desagregações superficiais	Polimento dos agregados	Arranque de uma das frações do agregado, geralmente a mais grossa ou perda do mastic betuminoso	c)
	Defeitos de superfície	Desgaste por abrasão, conferindo à superfície do pavimento um aspecto polido e brilhante	
	Ninhos	Cavidades de forma arredondada localizadas na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores, resultantes da evolução de outras degradações do pavimento.	
	Peladas	Desprendimento em forma de placa, da camada de desgaste, relativamente à camada inferior.	
Movimento de materiais	Exudação	Subida à superfície do ligante betuminoso na camada de desgaste, em particular na zona de passagem dos rodados dos veículos, conferindo-lhe um aspecto negro e brilhante.	d)
Reparações		Reparações observáveis na camada de desgaste.	e)

2.4. DEFINIÇÃO DOS ESTADOS DE CONDIÇÃO PARA O FENDILHAMENTO

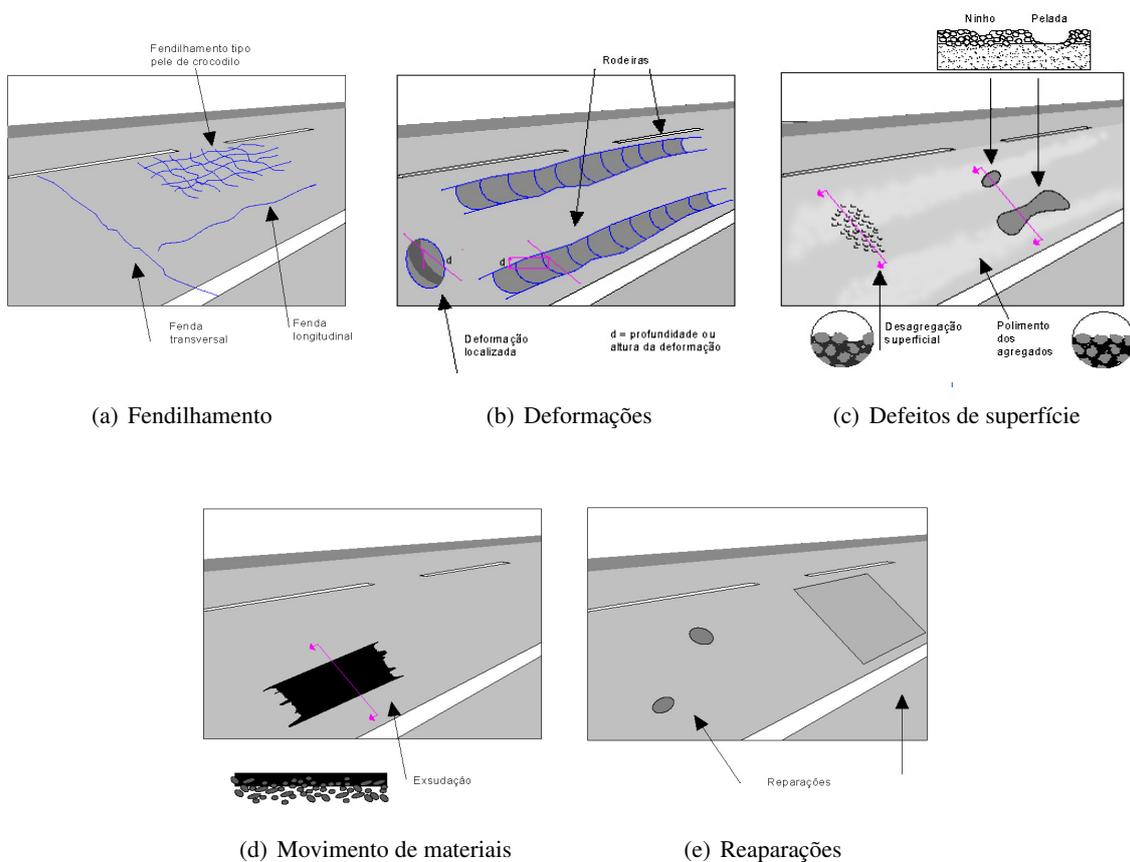


Figura 2.3: Ilustração das degradações em pavimentos flexíveis. [12]

2.4 Definição dos estados de condição para o fendilhamento

Um pavimento rodoviário deve permitir a circulação de veículos em condições apropriadas de segurança, conforto e economia. Para isso, a sua superfície deve respeitar certas características funcionais, como é o caso da regularidade geométrica, a aderência e a capacidade de drenagem de águas superficiais. [4]

Um dos principais mecanismos de degradação de pavimentos rodoviários flexíveis é o fendilhamento das camadas betuminosas. Na Tabela 2.3 encontra-se a descrição das principais causas que conduzem ao fendilhamento. [4]

Tabela 2.3: Tipos de fendilhamento em pavimentos flexíveis. [4]

Fendilhamento	Descrição
Por fadiga	Resultante da aplicação repetida de esforços de tracção induzidos na base das camadas betuminosas devido à passagem dos rodados dos veículos pesados
Por reflexão de fendas	Resultante da propagação, às camadas superiores, de fendas existentes em camadas subjacentes, devido à sua natureza (camadas com ligantes hidráulicos) ou pelas mesmas se encontrarem danificadas.
Com origem à superfície	Pode ser atribuído a diversos fenómenos: envelhecimento das misturas betuminosas das camadas de desgaste; estados de tensão induzidos na zona de contacto com o pneu ou nas suas proximidades. Estes fenómenos estão eventualmente combinados com acções térmicas.

É importante referir que o fendilhamento apresenta duas etapas de evolução. A primeira denomina-se de "fase de iniciação", ou seja, corresponde ao tempo decorrido desde a construção da estrada até que a fenda seja visível e, conseqüentemente, contabilizada. A segunda etapa corresponde à "fase de progressão" do fendilhamento [24], onde se verifica uma crescente evolução desta degradação até ao momento em que a mesma estabiliza, isto é, atinge uma degradação generalizada. É possível visualizar-se as duas fases mencionadas anteriormente na Figura 2.4.

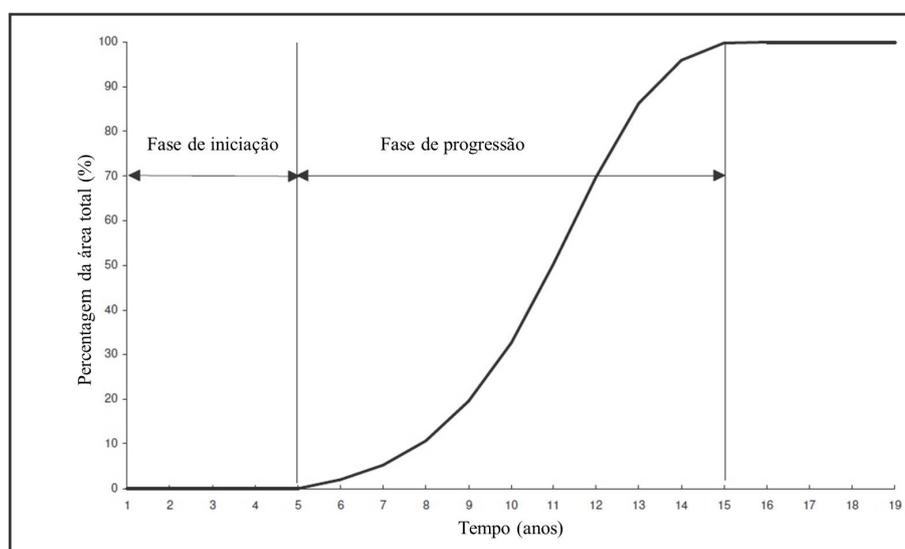


Figura 2.4: Evolução do fendilhamento em pavimentos rodoviários flexíveis. [24]

Tendo em conta as degradações existentes e as suas causas, para a aplicação de métodos probabilísticos torna-se necessário arranjar uma forma de quantificá-las em ordem a uma determinada escala que defina a condição do pavimento em função das mesmas. Assim, surge a necessidade de criar o conceito "Estados de Condição" que define a condição de um pavimento, secção a secção, e que se apresenta explicado a seguir.

Os estados de condição podem ser discretos ou contínuos. No caso de serem discretos os seus valores decorrentes das inspeções realizadas são dados por números inteiros e igualmente espaçados usando uma escala de i a k , sendo i o estado em que não existe fendilhamento visível e k é o estado mais grave em que existe uma degradação generalizada. Este método faz com que estes valores sejam logo os correspondentes aos estados de condição finais. Os estados de condição contínuos são obtidos a partir de um índice de condição do pavimento. Este índice é dado em forma de percentagem, sendo que os estados de condição se obtêm fazendo a sua discretização em intervalos, cada um desses intervalos é associado a um estado [21, 41].

A nível europeu foram estabelecidos critérios para obter os estados de condição em programa COST [22], em que intervieram 35 países europeus. O índice de fendilhamento é expresso adimensionalmente numa escala de 0 (boa condição) a 5 (má condição), a fim de fornecer uma base quantitativa consistente do fendilhamento. Foi desenvolvido um método que combina os diferentes tipos de fendilhamento, tais como a pele de crocodilo, as fendas longitudinais e as fendas transversais, num único parâmetro de fendilhamento, TP_{cr} . Este parâmetro define-se como a soma ponderada dos diferentes tipos e dimensões do fendilhamento em referência à área investigada, ou seja, as diferentes dimensões são convertidas em áreas equivalentes. O cálculo deste parâmetro é feito com recurso às expressões [22]:

- Área

$$TP_{cr,A} = \text{Min}(100; \frac{1}{A_{ref}} \cdot \sum_m [W_m \cdot \sum_i (S_{cr,a,i} \cdot A_i)] \cdot 100) \quad (2.1)$$

Em que:

$TP_{cr,A}$ - taxa de área fendilhada [%];
 A_{ref} - área de referência;
 W_m - peso das áreas fendilhadas;
 $S_{cr,a,i}$ - gravidade do tipo de fendilhamento i ;
 A_i - área das fendas para o tipo de fendilhamento i ;

- Comprimento

$$TP_{cr,L} = \text{Min}(100; \frac{1}{A_{ref}} \cdot \sum_n [W_n \cdot I_{width,l} \cdot \sum_j (S_{cr,l,j} \cdot L_j)] \cdot 100) \quad (2.2)$$

Em que:

$TP_{cr,L}$ - taxa de comprimento fendilhado [%];
 A_{ref} - área de referência;
 W_n - peso do comprimento fendilhado;
 $I_{width,l}$ - largura influência padrão de fissuras lineares;
 $S_{cr,l,j}$ - gravidade do tipo de fendilhamento j ;

L_j - comprimento de fendas para o tipo de fendilhamento j ;

- Elementos

$$TP_{cr,E} = \text{Min}(100; \frac{1}{A_{ref}} \cdot \sum_o [W_o \cdot I_{area,k} \cdot \sum_k (S_{cr,E,k} \cdot E_k)] \cdot 100) \quad (2.3)$$

Em que:

$TP_{cr,E}$ - taxa de fendilhamento do elemento [%];

A_{ref} - área de referência;

W_o - peso dos elementos fendilhados;

$I_{area,k}$ - área padrão de elementos com fendas (ex. área de lajes em betão de cimento);

$S_{cr,E,k}$ - gravidade das fendas num elemento de tipo de fendilhamento k ;

E_k - número de elementos com fendas do tipo k ;

Então, a taxa final de fendilhamento é dado por:

$$TP_{cr} = \text{Min}(100; TP_{cr,A} + TP_{cr,L} + TP_{cr,E}) \quad (2.4)$$

Aos diferentes tipos de fendas aplicam-se pesos diferentes para a determinação da taxa de fendilhamento. Na Tabela 2.4 apresenta-se a proposta para os valores dos pesos dos diferentes tipos de fendilhamento para pavimentos flexíveis [22].

Tabela 2.4: Pesos para os tipos de fendilhamento para pavimentos flexíveis. [22]

Tipo de fendilhamento	Peso W' [0-1] (0 = menos importante, 1 = mais importante)			
	Pavimentos Flexíveis			
	minimo	máximo	médio	significativo
Pele de crocodilo	0.9	1.0	1.0	0.9
Fendas longitudinais	0.7	0.8	0.7	0.7
Fendas transversais	0.6	0.8	0.8	0.7
Fendas bloqueadas	0.6	1.0	1.0	0.8
Fendilhamento térmico	0.6	0.9	0.7	0.7
Fendas reflexivas	0.8	0.9	0.8	0.8

O peso máximo utilizado não pode ser superior a 1. Se tal acontecer tem que se multiplicar o valor por um factor de escala. Note-se que, também são apresentados os pesos para os outros tipos de pavimentos, semi-rígidos e rígidos. Contudo, os mesmos não são objecto de estudo no presente trabalho.

2.4. DEFINIÇÃO DOS ESTADOS DE CONDIÇÃO PARA O FENDILHAMENTO

A definição do estado do fendilhamento, a partir de vários parâmetro, também é prática usual nos EUA. A título de exemplo mostra-se de que forma este procedimento é realizado no Departamento de Transportes da Florida (FDOT), em que se consideram três tipos de fendilhamento distintos, agrupados por classes, de acordo com a dimensão da fenda. É possível consultar a que dimensão da fenda corresponde cada classe de fendilhamento na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Dimensão da abertura das fendas. [46]

Classe	Abertura das fendas
IB	≤ 3.18 mm
II	> 3.18 mm; ≤ 6.35 mm
III	> 6.35 mm

Segue-se uma breve descrição do tipo de fendilhamento abrangido em cada uma das categorias mencionadas na Tabela 2.5 [46]:

- Classe IB: Esta categoria inclui fendas isoladas, longitudinais ou transversais;
- Classe II: Esta categoria inclui fendilhamento transversal ou longitudinal com fragmentação moderada ou ramificação grave. Inclui, também, fendas com uma largura inferior a 6.35 mm que formam uma malha (pele de crocodilo).
- Classe III: Esta categoria inclui fendas transversais ou longitudinais que se estendem até à camada de base ou ao material subjacente. Inclui, também, fendilhamento progressivo de Classe II que resulta em fragmentação severa do pavimento, podendo existir desagregação de partes do pavimento.

Depois de categorizado o fendilhamento, é proposta uma expressão para o parâmetro de fendilhamento. Este parâmetro é obtido subtraindo os "valores deduzidos negativos", associados às diferentes formas de fendilhamento, ao valor 10 [46]:

$$CR = 10 - (cw + co) \quad (2.5)$$

Onde:

cw - valores deduzidos, associados ao fendilhamento, devido aos eixos dos veículos;

co - valores deduzidos, associados ao fendilhamento, devido aos restantes factores.

O valor 10 que aparece na expressão 2.5 corresponde ao valor máximo considerado para o parâmetro de fendilhamento, sendo esse valor o indicativo de que o pavimento está em condições perfeitas, isto é, sem fendilhamento observado. Os valores deduzidos, para pavimentos flexíveis, são apresentados nas Tabelas 2.6 e 2.7 [46].

Tabela 2.6: Valores deduzidos devido aos eixos dos veículos (cw). [46]

Área de pavimento afectada com fendilhamento [%]	Classe de fendilhamento predominante		
	Classe IB	Classe II	Classe III
00-05	0.0	0.0	0.0
06-25	0.5	1.0	1.0
26-50	1.0	1.5	2.0
> 51	1.5	2.0	3.0

Tabela 2.7: Valores deduzidos devido aos restantes factores (co). [46]

Área de pavimento afectada com fendilhamento [%]	Classe de fendilhamento predominante		
	Classe IB	Classe II	Classe III
00-05	0.0	0.5	1.0
06-25	1.0	2.0	2.5
26-50	2.0	3.0	4.5
> 51	3.5	5.0	7.0

Cada estado de condição corresponde a um intervalo do parâmetro de fendilhamento. Pela expressão 2.5 é fácil visualizar que o maior valor que este parâmetro pode tomar é 10. Assim sendo, divide-se o mesmo em 10 intervalos e cada um deles representa um estado de condição, como se pode observar na tabela. Ao estado de condição 1 corresponde um pavimento com degradações generalizadas e ao estado de condição 10 corresponde um pavimento em bom estado, ou seja, sem fendilhamento visível 2.8.

Tabela 2.8: Definição dos estados de condição. [46]

Estado de condição	Parâmetro de fendilhamento
10	$9 < CR \leq 10$
9	$8 < CR \leq 9$
8	$7 < CR \leq 8$
7	$6 < CR \leq 7$
6	$5 < CR \leq 6$
5	$4 < CR \leq 5$
4	$3 < CR \leq 4$
3	$2 < CR \leq 3$
2	$1 < CR \leq 2$
1	$0 \leq CR \leq 1$

A EP contabiliza a gravidade do fendilhamento através de um único parâmetro que se baseia na quantificação das áreas fendilhadas e desenvolveu um catálogo de degradações onde é possível visualizar que o fendilhamento se pode dividir em três categorias, tendo em conta a tipologia das fendas: fendas longitudinais, fendas transversais e pele de crocodilo.

Sendo o fendilhamento um tipo de degradação difícil de quantificar, é feita a identificação desta anomalia por níveis de gravidade de 1 a 3, sendo 1 o nível onde se verifica menos incidência da patologia e o nível

2.4. DEFINIÇÃO DOS ESTADOS DE CONDIÇÃO PARA O FENDILHAMENTO

3 onde esta é mais grave. A forma como se quantificam estes níveis, para o parâmetro de degradação em estudo, é apresentada na Tabela 2.9 junto com a descrição do tipo de fenda associada a cada nível de degradação [13].

Tabela 2.9: Níveis de gravidade de fendilhamento para pavimentos flexíveis. [13]

Degradação	Níveis de Gravidade	Descrição do Nível de Gravidade	Área afectada/Valor adoptado
Fendilhamento	Nível 1	Fenda isolada mas perceptível	0,5m × comprimento afectado
	Nível 2	Fendas longitudinais ou transversais abertas e/ou ramificadas	2,0m × comprimento afectado
	Nível 3	Pele de crocodilo	Largura do trecho × comprimento afectado

Na Figura 2.5 é possível visualizar os diferentes tipos de fendilhamento, de um pavimento flexível, associados aos três níveis de gravidade descritos na Tabela 2.9.



Figura 2.5: Ilustração dos níveis de gravidade associados ao fendilhamento. [12]

O estado de fendilhamento é caracterizado pelo coeficiente de fendilhamento, sendo o mesmo calculado em função dos níveis de gravidade disponibilizados para cada secção e por data de inspecção. A expressão utilizada para o cálculo deste coeficiente, para uma dada secção, é [38]:

$$C_t = \frac{SF_1 \times 0,5 + SF_2 \times 2 + SF_3 \times L_{via}}{Extensão \times L_{via}} \quad (2.6)$$

Em que:

C_t - Coeficiente de fendilhamento;

SF_1, SF_2, SF_3 - Área afectada com fendilhamento de gravidade 1, 2 e 3 respectivamente;

L_{via} - Largura da via;

$Extensão$ - Comprimento da secção.

2.5 Estratégias de conservação

Devido às restrições orçamentais, que são cada vez mais elevadas, torna-se necessário otimizar as operações de conservação rodoviárias. Outrora era comum a realização de construções de estradas novas, hoje em dia há uma maior preocupação em preservar as já existentes [19, 36]. Surgiu, então, por um lado, a necessidade de determinar qual o tratamento mais eficaz tendo em conta o tipo de pavimento e o seu estado de condição, por outro, de ter estratégias de conservação da rede rodoviária que maximizam os benefícios através da utilização dos recursos disponíveis [31]. Assim, é possível distinguir três tipos de operações de conservação em pavimentos:

- Conservação Preventiva:

É um tratamento de baixo custo realizado com o intuito de manter ou melhorar a capacidade estrutural e funcional do pavimento, retardando, assim, a evolução da sua deterioração. Aplica-se, geralmente, quando as degradações se iniciam reduzindo a necessidade de recorrer a conservações correctivas. A conservação preventiva é uma ferramenta fundamental para aumentar o período de vida útil de um pavimento. Uma vez usada no início de vida de um pavimento, corrige os problemas enquanto estes são diminutos, economizando, assim, os gastos que grandes problemas iriam trazer no futuro e melhorando a segurança da estrada [6, 19].

- Conservação Correctiva:

É realizada quando ocorre uma deficiência no pavimento, tal como, perda de atrito ou fendilhamento significativo. Esta estratégia de conservação tem custos mais elevados do que a anterior [15, 19]. A conservação correctiva acontece quando o estado de degradação do pavimento se agravou de tal forma que é necessário corrigir a degradação e não apenas atrasar a sua evolução. A urgência da utilização da conservação correctiva resulta quer de ser comprometido um nível limite de serviço quer de a partir de um certo nível de degradação das condições do pavimento existir uma mais rápida deterioração e, conseqüentemente, um acentuado aumento dos custos de conservação [4].

- Conservação de Emergência:

É realizada numa situação de emergência em que a reparação tem que ser imediata, como por exemplo quando existe uma acentuada desagregação do pavimento [15, 19].

Para elaborar um programa de conservação de pavimentos são necessários os três tipos de conservação descritos anteriormente. Contudo, é possível evitar ou retardar a utilização de conservações correctivas se houver, ao longo do tempo, aplicação de conservações preventivas de forma a preservar o bom desempenho do pavimento [19].

Os limites entre aplicações de cada uma das intervenções de conservação mencionadas, em função do tempo e do estado do pavimento, podem ser visualizados na Figura 2.6.

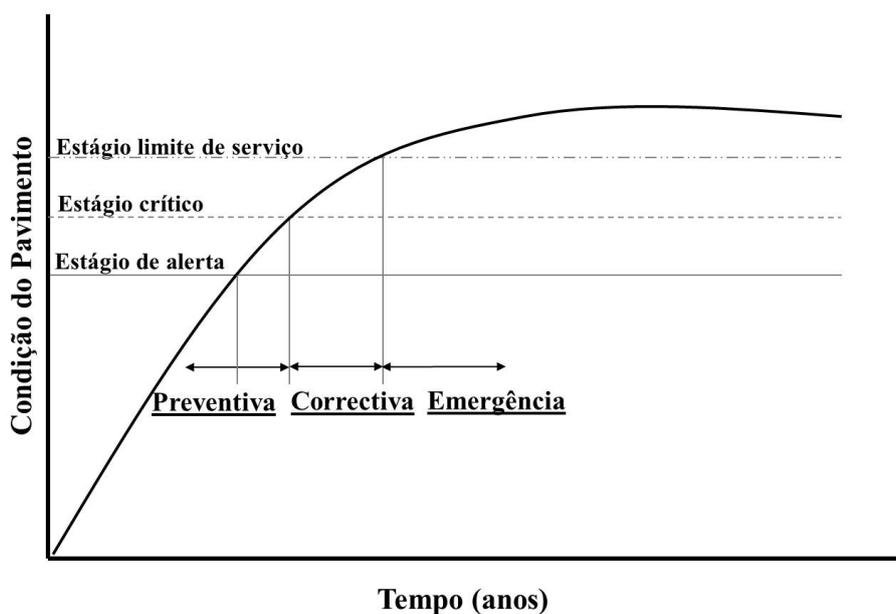


Figura 2.6: Limites de aplicação dos três tipos de conservação.

Como se pode ver, pela Figura 2.6, a diferença entre os três tipos de conservação reside no estado de condição do pavimento, ou seja, da definição dos três estágios referidos, sendo que não existem limites nítidos de quando se deve aplicar um tratamento preventivo, correctivo ou de emergência.

Na Figura 2.7 é possível ter uma percepção da diferença na aplicação das conservações preventiva e correctiva no desempenho de um pavimento. Aqui, pode observar-se de que forma evolui a curva de deterioração do pavimento quando é submetido a estas intervenções de conservação.

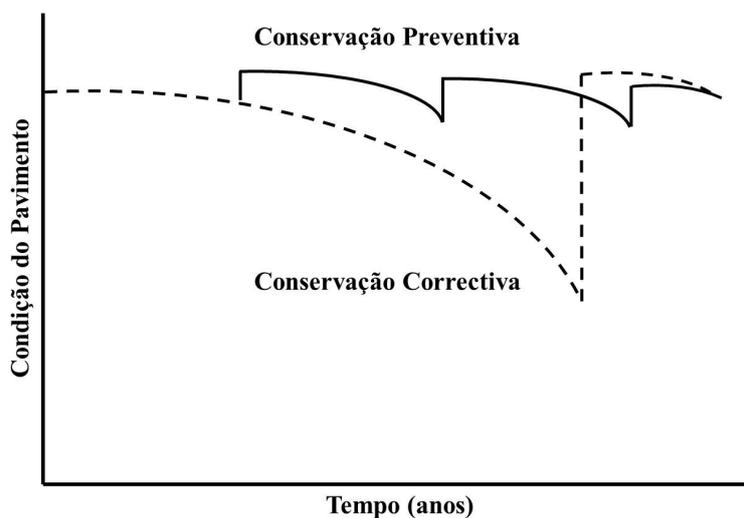


Figura 2.7: Conservação preventiva e conservação correctiva. Adaptado de [25].

Note-se que, as acções de conservação podem ser baseadas no tempo ou no estado de condição do pavimento. As acções de conservação baseadas no tempo são aquelas em que o tempo de aplicação da

conservação é definido, independentemente do estado de condição e as acções de conservação baseadas no estado são aplicadas quando um determinado estado de condição é ultrapassado. Em geral, as acções de conservação preventiva são baseadas no tempo, já as acções de conservação correctivas são, geralmente, baseadas no estado do pavimento e aplicadas quando o pavimento se encontra no limiar ou abaixo do que é considerado aceitável [26].

2.6 Técnicas de conservação de pavimentos rodoviários

Nesta secção irão ser abordadas técnicas de conservação que podem ser aplicadas em conservação preventiva e correctiva, sendo a conservação do tipo preventiva considerada a mais rentável e a que oferece melhores condições no que respeita ao prolongamento da vida útil do pavimento [19, 25]. Na Figura 2.8 são indicados tipos de tratamento para os dois tipos de conservação a estudar [3].

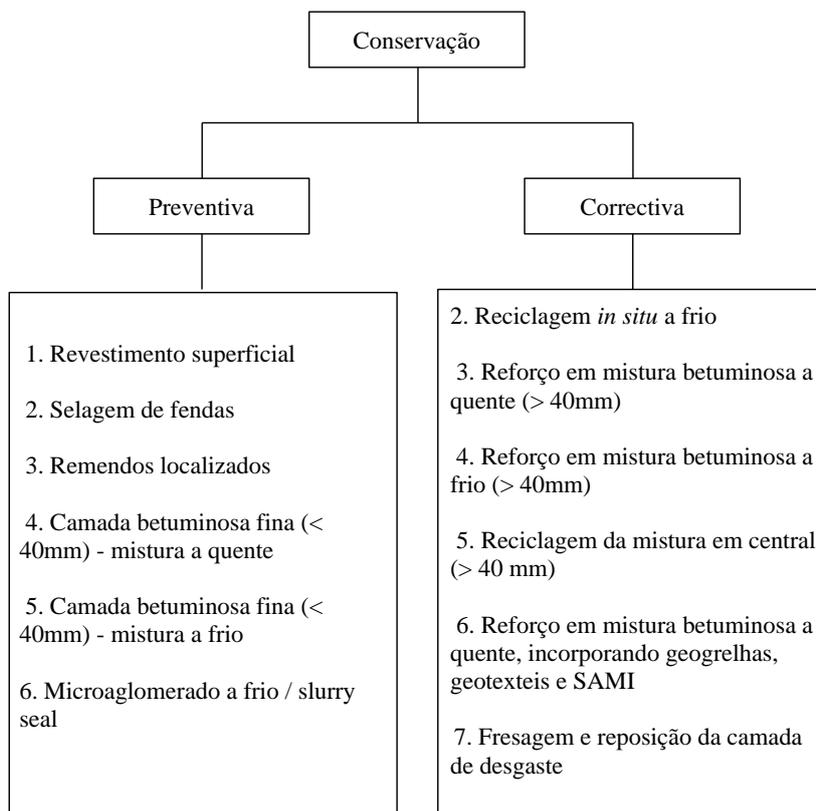


Figura 2.8: Tratamentos a aplicar de acordo com o tipo de conservação.

O que determina se a acção é do tipo preventiva ou correctiva é a gravidade do estado do pavimento. O tipo de conservação apropriado para pavimentos fendilhados, geralmente, depende da quantidade/densidade e da condição geral das fendas, sendo que quando há uma maior densidade das

fendas e as mesmas apresentam uma determinada condição, considerada má, aplica-se uma conservação do tipo correctiva caso contrário opta-se por uma medida preventiva [15, 40]. A metodologia a utilizar na selecção da técnica mais apropriada para determinado tipo de degradação é proposta por [3] e consiste em três fases, como mostra a Figura 2.9.

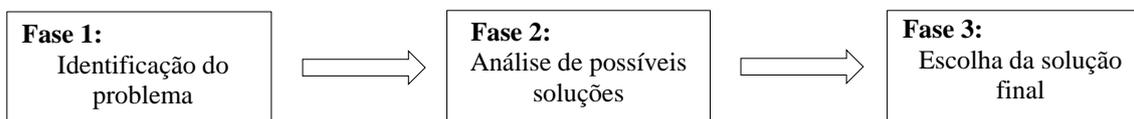


Figura 2.9: Metodologia de selecção da técnica de conservação mais adequada. [3]

As técnicas de conservação ilustradas na Figura 2.8 vão ser apresentadas, de seguida, de uma forma mais detalhada, sendo apresentada uma breve descrição das mesmas assim como os seus objectivos e o tempo de duração de cada uma.

2.6.1 Conservação preventiva

De seguida é feita uma breve descrição das técnicas de conservação preventiva enunciadas na Figura 2.8, [19, 3]:

1. Revestimento superficial - Espalhamento sucessivo de ligante betuminoso seguido de gravilha e posterior compactação.
2. Selagem de fendas - Este tratamento é utilizado em todos os tipos de fendas. Envolve o preenchimento da fenda com um selante e, de forma a ser mais económico, destina-se a fendas de pequenas dimensões.
3. Remendos localizados - Remoção de materiais que não se encontram em boas condições e que se encontram em zonas localizadas do pavimento, fazendo a sua substituição por novos materiais.
4. Camada betuminosa fina (< 40mm), mistura a quente - Aplicação de camada de desgaste em mistura betuminosa a quente.
5. Camada betuminosa fina (< 40mm), mistura a frio - Aplicação de camada de desgaste em mistura betuminosa a frio.
6. Microaglomerado a frio / slurry seal - Aplicação de uma camada de pequena espessura de ligante betuminoso e agregado fino, misturada a frio no local da obra.

Estas técnicas têm algumas limitações na sua utilização, pois requerem que se repita o procedimento durante o período de vida útil do pavimento de forma a manter a superfície do mesmo funcional. [19].

Este tipo de conservação é apenas uma das ferramentas disponibilizadas para a conservação e preservação da rede rodoviária, não podendo ser utilizada para corrigir todos problemas que os pavimentos experimentam à medida que se desgastam. Então, surge a conservação correctiva como medida mais gravosa na conservação de pavimentos rodoviários [29].

2.6.2 Conservação correctiva

De seguida é feita uma breve descrição das técnicas de conservação correctiva enunciadas na Figura 2.8:

1. Reforço em betão betuminoso (> 50mm) - Aplicação, sobre o pavimento existente, de uma camada de reforço em betão betuminoso.
2. Reciclagem *in situ* a frio - Fresagem de camadas do pavimento com aplicação, posterior, de mistura com materiais novos *in situ* (agregado e ligante betuminoso e/ou hidráulico).
3. Reforço em mistura betuminosa a quente (> 40 mm) - Aplicação, sobre o pavimento existente, de uma ou mais camadas de uma mistura betuminosa fabricada a quente.
4. Reforço em mistura betuminosa a frio (> 40 mm) - Aplicação, sobre o pavimento existente, de uma ou mais camadas de uma mistura betuminosa fabricada a frio.
5. Reciclagem da mistura em central (> 40 mm) - Remoção de misturas betuminosas existentes com aplicação, posterior, de camada de reforço utilizando uma mistura reciclada em central mas com adição de materiais novos.
6. Reforço em mistura betuminosa a quente, incorporando geogrelhas, geotêxteis e SAMI - Aplicação, sobre o pavimento, de uma ou mais camadas de uma mistura betuminosa fabricada a quente combinada com aplicação de medidas anti-reflexão de fendas.
7. Fresagem e reposição da camada de desgaste - Remoção, de forma controlada, da camada de desgaste para posterior substituição por nova camada com a mesma espessura e com materiais novos.

É importante definir o tempo de duração de cada técnica de conservação para a escolha da mais indicada. Na Tabela 2.10 é possível consultar a duração de cada técnica de conservação assim como o objectivo a que cada uma se destina.

É, ainda, importante salientar que, no geral, os tratamentos, apresentados na Tabela 2.10, correspondentes ao tipo de conservação correctiva são seguidos da aplicação de uma nova camada de desgaste e, ainda, que as durações atribuídas a cada uma das técnicas implicam uma boa execução das mesmas, ou seja, se a técnica não for bem executada a sua duração pode reduzir drasticamente [2].

2.6. TÉCNICAS DE CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Tabela 2.10: Objectivo e duração das técnicas de conservação [19, 15, 5, 2].

Conservação	Técnica	Objectivo	Duração
Preventiva	1	Selar as fendas presentes na superfície de um pavimento e melhorar o atrito superficial.	4-8 anos
	2	Evita que a água entre na estrutura do pavimento, o que pode enfraquecer o material de base e impedir o pavimento de expandir e contrair livremente.	< 4 anos
	3	Garantir resistência local do pavimento igual à do pavimento circundante, promovendo um suporte uniforme.	< 4 anos
	4	Reduzir oxidação da superfície do pavimento, melhorar o atrito superficial e regularizar a superfície do pavimento.	> 8 anos
	5	Melhorar o atrito superficial e regularizar a superfície do pavimento.	> 8 anos
	6	Retardar o fendilhamento, selando as fendas e melhorar o atrito superficial.	4-8 anos
Correctiva	1	Reforçar o pavimento já existente, prolongar a vida útil do mesmo e proporcionar uma superfície regular. Aumenta, também, a resistência do pavimento à penetração de água e agentes químicos.	> 8 anos
	2	Corrigir a superfície do pavimento.	> 8 anos
	3	Corrigir e reforçar a superfície do pavimento.	> 8 anos
	4	Corrigir e reforçar a superfície do pavimento.	> 8 anos
	5	Corrigir a superfície do pavimento.	> 8 anos
	6	Impedir a propagação das fendas das camadas mais antigas para a superfície das camadas aplicadas no reforço	> 8 anos
	7	Corrigir os danos presentes na camada substituída de forma a recuperar as condições funcionais do pavimento.	> 8 anos

Devido à vasta gama de técnicas de conservação existentes, existem várias estratégias de conservação a ser aplicadas que podem incidir mais sobre as técnicas preventivas ou sobre as técnicas correctivas. Uma abordagem para o tipo de tratamento a aplicar ao pavimento, que combina técnicas de conservação do tipo preventivas com técnicas de conservação do tipo correctivas, é prevista pela Scetauroute [8] e mostrada na Tabela 2.11:

Tabela 2.11: Previsão a 40 anos do tipo de tratamento a utilizar num pavimento flexível [8].

Ano	Técnica
3	Eventual selagem de fendas
9	6 [cm] de betão betuminoso
17	RS [40 % da área] + 6 [cm] de BB [60 % da área]
25	RS [40 % da área] + 6 [cm] de BB [60 % da área]
33	RS [60 % da área] + 6 [cm] de BB [40 % da área]
41	RS [40 % da área] + 6 [cm] de BB [60 % da área]

RS - Tratamento Superficial; BB - Betão Betuminoso.

Capítulo 3

Previsão de fendilhamento recorrendo aos processos de Markov

3.1 Cadeias de Markov

Andrei Andreyevich Markov foi um matemático Russo que ficou conhecido por ter contribuído para o desenvolvimento dos processos estocásticos, mais especificamente os designados por cadeias de Markov. Durante vinte e cinco anos conciliou a investigação com o trabalho de professor na universidade de São Petersburgo. Primeiramente incidiu o seu estudo na teoria dos números e análise numérica, mas mais tarde dedicou-se à teoria das probabilidades. [11]

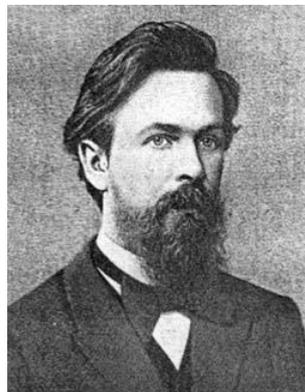


Figura 3.1: Andrei Markov (1856-1922).[44]

Neste capítulo são abordados os processos estocásticos de Markov. Estes têm como variável o tempo, que pode variar de forma discreta, através de intervalos de tempo regulares, ou de forma contínua. Os processos estocásticos de Markov assentam na premissa de que a evolução futura depende apenas do estado no presente, não sendo o histórico importante para a evolução dos estados de condição futuros. Isto significa que, apenas o estado de condição presente pode influenciar o estado de condição seguinte. [42]

É de referir que a transição de estados de um processo estocástico pode depender, ou não, do período de tempo decorrido. Quando essa transição depende da variável tempo é dito que o processo é não homogéneo, caso contrário denomina-se de processo homogéneo [42]. Neste trabalho irão ser abordados os processos de Markov homogéneos no tempo.

Para efectuar a previsão da evolução de fendilhamento num pavimento rodoviário através das cadeias de Markov é necessário, primeiramente, definir o número de estados de condição k a considerar para a avaliação do nível de degradação dos pavimentos. Para avaliar a probabilidade de transição de estados utiliza-se uma matriz de transição com dimensão $k \times k$ com a seguinte forma [30]:

$$P_{\Delta t} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1k} \\ 0 & p_{22} & \dots & p_{2k} \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

O valor unitário presente na matriz $P_{\Delta t}$ corresponde ao máximo valor que cada uma das entradas da mesma pode tomar, ou seja, corresponde a um acontecimento certo. A razão para a probabilidade p_{kk} tomar este valor deve-se ao facto de não haver mais nenhum estado de condição depois do estado k , uma vez que o mesmo é um valor limite. [46]

A probabilidade de transição de um estado i para um estado j , para um intervalo de tempo genérico (Δt), é representada por p_{ij} , com $i=j=1, \dots, k$, e determinada da seguinte forma [18]:

$$p_{(\Delta t)ij} = Prob(X_{t+\Delta t} = j | X_t = i) \quad (3.2)$$

Através da expressão 3.2 é possível verificar que o estado em que o pavimento se encontra no momento $(t+\Delta t)$ depende apenas do estado em que se encontra no momento inicial t .

Observando a matriz $P_{\Delta t}$ da expressão 3.1 observa-se que a sua diagonal inferior é constituída por valores nulos. Isto prende-se com o facto de se considerar que não são efectuadas acções de conservação. Assim sendo, um pavimento que se encontra num determinado estado no presente apenas pode evoluir para um estado mais gravoso ou manter-se no mesmo estado, sendo que não é válido melhorar de estado [46].

Então, as condições que a matriz $P_{\Delta t}$ tem que respeitar podem ser resumidas da seguinte forma [46]:

- $0 \leq p_{ij} \leq 1$, com i e $j=1,2,\dots,k$, sendo k o número máximo de estados de condição;
- $\sum_{j=i}^k p_{ij} = 1$;
- $p_{ij} = 0$, se $i > j$.

Os processos de Markov utilizados assentam em alguns pressupostos no que toca à deterioração dos pavimentos, sendo os mesmos enunciados seguidamente [27]:

- As probabilidades de transição apenas dependem do estado actual de deterioração, não interessando o histórico de degradações. Sendo a afirmação anterior denominada de propriedade de Markov.
- As probabilidades de transição não dependem da variável tempo, ou seja, são constantes ao longo do tempo (cadeias de Markov homogêneas no tempo).
- A afirmação acima descrita, associada à homogeneidade do método estudado, requer a utilização de uma das seguintes distribuições: geométrica (para tempo discreto) ou exponencial (para tempo contínuo).

O estado presente de um pavimento é descrito por um vector de probabilidades de estados, p . Este vector traduz a probabilidade do pavimento se encontrar em cada um dos estados de condição. Então, o vector, genérico, de probabilidades de estado para o instante t tem a seguinte forma:

$$p(t) = [p_{i1} \ p_{i2} \ (\dots) \ p_{ik}] \quad (3.3)$$

Onde, por exemplo, p_{i1} traduz a probabilidade de um pavimento, que inicialmente se encontra no estado de condição i , se encontrar no estado 1 no instante $t+\Delta t$, sendo k o número de estados de condição definidos.

Nas cadeias de Markov, o vector do estado futuro pode ser estimado através da relação [27]:

$$p(t+\Delta t) = p(t) \times P_{\Delta t} \quad (3.4)$$

Em que:

$p(t+\Delta t)$ - Vector de probabilidades de estado para o instante final ($t+\Delta t$);

$p(t)$ - Vector de probabilidades de estado para o instante inicial (t);

$P_{\Delta t}$ - Matriz de transição de estado para o intervalo de tempo considerado.

Depois de encontrada a matriz P , matriz de transição de probabilidades para um intervalo t , é possível calcular a mesma para um outro intervalo de tempo $t+\Delta t$. Assim, a matriz de probabilidades de transição P satisfaz a equação de Chapman-Kolmogorov seguinte:

$$P_{t+\Delta t} = P_{\Delta t} \times P_t = P_t \times P_{\Delta t} \quad (3.5)$$

E tem como condição inicial:

$$P_0 = \lim_{t \rightarrow 0} P_t = I \quad (3.6)$$

Sendo I a matriz identidade.

Depois de definido o vector de probabilidades é, então, possível encontrar o valor médio do estado de condição. Este valor é encontrado multiplicando o vector de probabilidades pelo vector dos estados de condição da seguinte forma [41]:

$$EC_{med,(t)} = p_{(t)} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ k \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.2 Estimativa da matriz probabilística, P , a partir de dados de observação

Os dados de observação podem ser recolhidos com intervalos de tempo periódicos ou variáveis correspondendo, respectivamente, a tempo discreto ou tempo contínuo.

3.2.1 Tempo discreto

Admita-se que se conhece a evolução do estado de condição de uma rede rodoviária com N secções. Se se pretender estimar a matriz probabilística que representa a transição de estados nesta rede através de dados correspondentes a intervalos de tempo regulares, $\Delta t = n$, n tem que respeitar a condição [42]:

$$n \in \mathbb{Z}^+ = 0, 1, 2, \dots$$

Uma cadeia de Markov em tempo discreto é definida como um processo estocástico que satisfaz a propriedade de Markov indicada na expressão 3.2 e que respeita as condições da matriz de transição de estados $P_{\Delta t}$, descritas em 3.1 [33].

A principal preocupação no desenvolvimento do modelo de uma cadeia de Markov é a estimativa da matriz de transição de estados, sendo que em tempo discreto a probabilidade de transição do estado i para o estado j é mostrada na equação 3.8 [21, 30]:

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (3.8)$$

Onde:

p_{ij} - é a probabilidade de transição do estado i para o estado j ;

N_{ij} - é o número total de secções do pavimento que passam do estado de condição i para o estado de condição j durante um intervalo de tempo;

N_i - é o número total de secções do pavimento no estado de condição i no início de cada intervalo de tempo.

3.2.2 Tempo contínuo

Admita-se que, conhecendo a evolução do estado de condição da mesma rede rodoviária com N secções, se pretende estimar, agora, a matriz probabilística que representa a transição de estados dessa rede através de dados correspondentes a intervalos de tempo não regulares, $\Delta t = t$, em que t que respeita a seguinte condição [42]:

$$t \in \mathbb{R}^+ = [0, \infty[\quad (3.9)$$

De forma análoga ao processo de Markov em tempo discreto, uma cadeia de Markov em tempo contínuo é um processo estocástico se satisfizer a propriedade de Markov indicada na expressão 3.2, que define a transição de estados, e se respeitar as condições da matriz de transição de estados $P_{\Delta t}$, descritas em 3.1 [33].

Em tempo discreto as relações entre os estados de condição são dadas em forma de probabilidades de transição. Numa cadeia de Markov em tempo contínuo essas relações são estimadas em função de taxas de transição, ou seja, uma cadeia que se apresenta no estado i no tempo t transita para o estado j com uma taxa $q_{ij}(t)$. Então, uma cadeia de Markov em tempo discreto é representada por uma matriz de transição de estados P enquanto que uma cadeia de Markov em tempo contínuo é representada pela matriz de taxas de transição Q que assenta na premissa:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{P_t - I}{t} = Q \quad (3.10)$$

E a matriz intensidade Q tem a seguinte forma [42]:

$$Q = \begin{bmatrix} -\theta_1 & \theta_1 & 0 & \dots \\ 0 & -\theta_2 & \theta_2 & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \dots & 0 & -\theta_{k-1} & \theta_{k-1} \\ \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Em que as taxas de transição, $\theta_i = q_{ij}(t)$ com $i=1, \dots, k-1$, podem ser calculadas da forma seguinte [17, 33]:

$$q_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum \Delta t_i} \quad (3.12)$$

Onde n_{ij} representa o número de secções que transita do estado i para o estado j e $\sum \Delta t_i$ é o somatório dos intervalos de tempo entre as inspecções, em que o estado inicial é i .

A taxa de transição $q_{ij}(t)$ pode ser limitada ou infinita. Para processos de Markov de estados finitos $q_j(t)$ é finito no entanto, isto pode não acontecer. Se $q_j(t) = \infty$ é dito que j é um estado instantâneo, ou seja, quando o processo chega a j salta imediatamente para outro estado.

Note-se que, a matriz intensidade Q satisfaz as seguintes condições [20, 41]:

- $q_{ii} = -\sum_{i \neq j} q_{ij}$, $i = 1, \dots, k$ em que k é o número total de estados de condição;
- $q_{ij} \geq 0$, $j - i = 1$;
- $q_{ij} = 0$, $i > j$;
- $q_{ij} = 0$, $j - i > 1$;
- $q_{ij} = 0$, $i, j = k$.

Tendo estimado a matriz Q , a matriz P é diferenciável para todo $t \geq 0$:

$$P'(t) = P(t)Q = QP(t) \quad (3.13)$$

E sabendo a condição inicial $P(0)=I$, é possível relacionar as grandezas taxas e probabilidades no encadeamento das cadeias de Markov recorrendo às equações de Kolmogorov, através da matriz exponencial 3.14 [33, 42]:

$$P(t) = e^{Qt} = I + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Q^n t^n}{n!} \quad (3.14)$$

O somatório pode ser calculado até um certo número de parcelas, dependendo do tipo de precisão que se pretende.

Estimativa do tempo de permanência em cada estado de condição

Nas cadeias de Markov em tempo contínuo os tempos de permanência nos diversos estados considerados são independentes. Depois de estimada a matriz de taxas de transição, Q , é possível estimar o tempo de permanência em cada um dos estados de condição através da expressão 3.15 [17]:

$$t_p = -\frac{1}{\theta_i} \quad (3.15)$$

Onde, $i=1,2, \dots, k-1$ corresponde aos estados de condição considerados.

Assim, é possível estimar qual é o estado de condição no qual uma secção de pavimento permanece mais tempo até transitar para o seguinte e qual é o estado de condição em que a mesma permanece menos tempo.

3.2.3 Verosimilhança

A adequabilidade de um modelo probabilístico, definido a partir de dados estatísticos, denomina-se de verosimilhança. No caso em estudo pretende-se, através dos valores de θ_i que constituem a matriz Q , calcular as probabilidades de transição que contribuem para o valor da verosimilhança e, assim, verificar a eficiência do modelo utilizado através desse processo, sendo o mesmo mais eficiente quanto menor for o valor da verosimilhança. O seu valor é calculado da seguinte forma [20, 41]:

$$V = \prod_{seccões=1}^N \prod_{transições=1}^M p_{ij} \quad (3.16)$$

Em que N é o número total de secções, M é o número total de intervalos de tempo (entre inspecções) para cada secção e p_{ij} é a probabilidade de transição do estado i para o estado j. Note-se que, se do registo de inspecções fizerem parte quatro datas de inspecção isso equivale a três intervalos de tempo e, portanto, $M=3$.

De forma a facilitar o cálculo desta função, transforma-se o produto num somatório através de propriedades logarítmicas, resultando na expressão 3.17 que se apresenta de seguida:

$$V = \sum_{seccões=1}^N \sum_{transições=1}^M \ln p_{ij} \quad (3.17)$$

Note-se que, o valor da verosimilhança é um valor negativo devido à função ser do tipo logarítmica de domínio $[0,1]$.

Estimativa da máxima verosimilhança

É possível maximizar a verosimilhança através da optimização computacional da matriz intensidade, Q . No entanto, os programas comerciais que permitem optimizar funções geralmente possuem rotinas de minimização e não de maximização, o que implica transformar o problema de maximização num problema de minimização. Por essa razão, sempre que seja abordada a problemática de optimização da verosimilhança, esta vai ser referida como um problema de minimização. Revela-se, então, importante optimizar o seu valor através da alteração dos parâmetros θ , de forma a que este seja o menor possível em termos absolutos e, conseqüentemente, o modelo utilizado seja o mais eficiente. Existem vários programas para resolver esta problemática, sendo que no presente trabalho se utilizou uma função pré-programada do *software MATLAB R2010a* denominada de *fmincon* [16].

3.3 Consideração da conservação de pavimentos

O aparecimento de fendilhamento nas superfícies dos pavimentos rodoviários é um fenómeno que os engenheiros enfrentam ao longo dos anos, uma vez que esta degradação é uma das principais causas de

deterioração dos mesmos. O fendilhamento é inevitável e, por essa razão, existem várias estratégias de conservação de pavimentos de forma a corrigir ou retardar o aparecimento/progressão do mesmo [40]. Serão, então, abordadas de seguida dois tipos de conservação de pavimentos: conservação correctiva e conservação preventiva.

3.3.1 Conservação preventiva com base no tempo

Neste tipo de conservação é necessário definir as seguintes variáveis temporais [26]:

- $T_{p,i}$ - tempo até à primeira aplicação da conservação;
- T_d - tempo de duração da aplicação da conservação;
- ΔT - intervalo de tempo entre aplicações de conservações.

Na Figura 3.2, é possível observar cada uma das variáveis definidas, no que respeita à conservação preventiva.

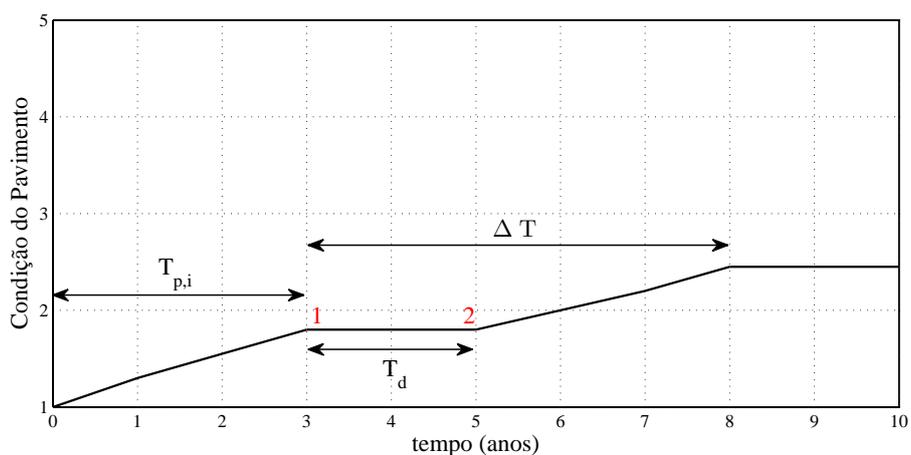


Figura 3.2: Evolução do estado de condição de um pavimento aquando a aplicação da conservação preventiva com base no tempo.

Para a aplicação deste tipo de conservação é necessário, em primeiro lugar, definir o valor de cada uma das variáveis e efectuar-se o cálculo da matriz P da rede.

O atraso, na evolução da condição do pavimento, que se verifica após a aplicação da conservação é calculado considerando que o vector de transição de estados, $p(t)$, não varia ao longo de T_d . Então, considerando os pontos 1 e 2 da Figura 3.2, é possível obter o estado de condição, no tempo de duração da aplicação da conservação, da seguinte forma:

$$p(t_2) = p(t_1) \times I = p(t_1) \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = p(t_1) \quad (3.18)$$

Onde:

$p(t_1)$ - vector de probabilidades de transição no ponto 1;

$p(t_2)$ - vector de probabilidades de transição no ponto 2;

I - matriz identidade;

3.3.2 Conservação correctiva com base no estado

As acções de conservação baseadas no estado têm associadas duas variáveis não temporais [26]:

- EC_i - estado de condição a partir do qual se deseja efectuar a acção de conservação;
- EC_f - estado de condição que se pretende atingir depois de efectuada a acção de conservação.

A evolução média das degradações de uma rede rodoviária ao longo do tempo, aquando a aplicação da conservação correctiva baseada no estado, traduz-se, numa primeira fase, numa curva crescente até atingir o estado de condição a partir do qual se estima aplicar a acção de conservação ou um estado próximo deste. Posteriormente, como este processo é contínuo uma vez que há sempre secções do pavimento a serem reabilitadas para EC_f , a rede tende a estabilizar num valor igual ou próximo do mesmo. Quando se está a referir a uma secção de pavimento da rede, a evolução do estado de condição médio do pavimento é mostrado, genericamente, na Figura 3.3.

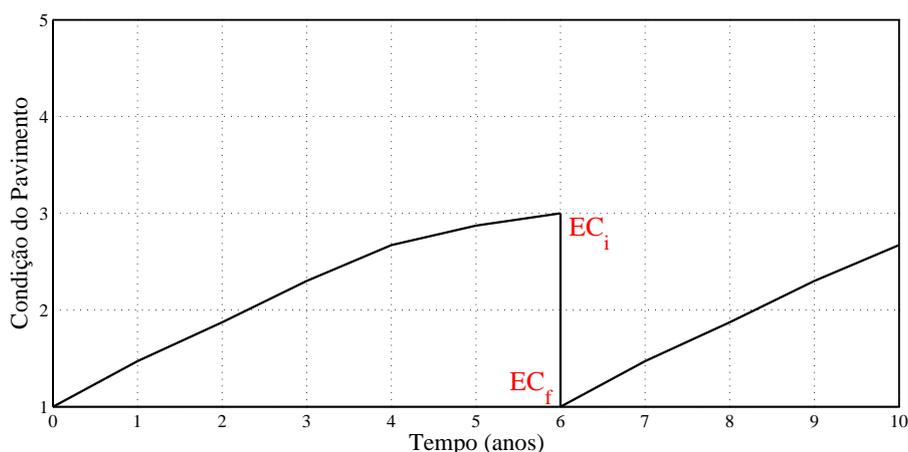


Figura 3.3: Evolução do estado de condição de um pavimento quando é aplicada a conservação correctiva com base no estado, com $EC_i = 3$ e $EC_f = 1$.

Capítulo 4

Caso de estudo

4.1 Objectivos

O presente capítulo apresenta um exemplo de aplicação de forma a validar as metodologias descritas no capítulo anterior. Desta forma, aplicando os processos de Markov, proceder-se-á à previsão do desempenho de um pavimento rodoviário e simular-se-á a aplicação das acções de conservação estudadas.

Inicialmente é feita uma revisão dos dados fornecidos, onde se apresenta a informação disponibilizada sobre os pavimentos rodoviários e onde se indicam as secções de pavimentos que são estudadas na presente dissertação.

Numa fase seguinte é efectuada uma análise dos dados disponibilizados e é feito o cálculo dos coeficientes de fendilhamento para cada secção. Seguidamente são definidos os estados de condição dos pavimentos rodoviários e, após a sua definição, aplicam-se as cadeias de Markov em tempo contínuo às secções estudadas.

Posteriormente, e utilizando os dados estimados na previsão do desempenho, são aplicadas as acções de conservação: preventiva com base no tempo e correctiva com base no estado. Posto isto, é mostrada a evolução da deterioração do pavimento ao longo do tempo após aplicação da referente acção de conservação.

Por último, são estimados custos para cada acção de manutenção com o intuito de comparar qual é a solução melhor a nível de custos e de benefícios.

4.2 Informação contida na base de dados

Na presente dissertação, foi utilizada, para a previsão do desempenho dos pavimentos rodoviários, uma base de dados real referente a um leque de secções de pavimentos flexíveis em Portugal.

Na Tabela 2.1 já foi descrita a informação que deve constar de uma base de dados. Esta informação será útil para a previsão do fendilhamento ao longo do tempo nas várias secções em estudo e, consequentemente, para a necessidade de intervenção nas mesmas.

Após a análise da base de dados disponibilizada para a realização da presente dissertação, concluiu-se que não podiam ser utilizadas todas as secções de pavimentos, uma vez que alguns dados relativos ao fendilhamento não foram considerados válidos por não se adequarem às metodologias estudadas.

Depois de efectuadas as alterações enunciadas, apresenta-se o inventário no Anexo A, Tabela A.1, juntamente com os dados relativos à sua extensão, largura, data da última inspecção e estados de condição correspondentes às datas de inspecção realizadas.

4.3 Análise de dados

No capítulo 2, Tabela 2.9, é descrita a forma como a EP contabiliza o fendilhamento, sendo esse o procedimento adoptado no presente trabalho. A título de exemplo, mostra-se o processo de cálculo para a obtenção do coeficiente de fendilhamento realizado para a secção 1, sendo que na Tabela 4.1 se encontram os dados fornecidos para a secção em estudo relevantes no cálculo da percentagem de fendilhamento.

Tabela 4.1: Dados relativos à secção de pavimento 1

Insp. 2003		Insp. 2007		Insp. 2010		Insp. 2012	
Extensão (km)	Gravidade						
19.67	0	13.14	0	2.47	0	1.59	0
0.05	1	2.53	1	0.39	1	0.72	1
0.00	2	2.87	2	7.31	2	6.19	2
0.00	3	1.19	3	9.56	3	11.23	3

Então, aplicando a expressão 2.6 do capítulo 2 e sabendo que a extensão total da secção é 19.72m e a largura é 8.65m, exemplifica-se o cálculo do coeficiente de fendilhamento para o ano de inspecção 2007 ($C_{f,2007}$):

$$C_{f,2007} = \frac{2.53 \times 0.5 + 2.87 \times 2 + 1.19 \times 19.72}{19.72 \times 8.75} = 0.10 \quad (4.1)$$

Os valores de coeficiente de fendilhamento para as datas de inspecção 2003, 2010 e 2012 são 0.00, 0.57 e 0.95, respectivamente.

Aplicando, agora, a expressão 2.6 às restantes secções estudadas, calculam-se os valores dos coeficientes de fendilhamento para as respectivas datas de inspecção. Estes coeficientes podem ser consultados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Caracterização do fendilhamento nas secções em estudo

Secção	Coeficientes de Fendilhamento (%)				
	$C_{t(ano\ const.)}$	$C_{t(2003)}$	$C_{t(2007)}$	$C_{t(2010)}$	$C_{t(2012)}$
1	0.00	0.00	0.10	0.57	0.95
2	0.00	0.04	0.31	0.41	0.63
3	0.00	0.03	0.08	0.33	0.42
4	0.00	0.00	0.07	0.99	0.99
5	0.00	0.03	0.04	0.15	0.22
6	0.00	0.00	0.09	0.73	0.74
7	0.00	0.02	0.09	0.43	0.89
8	0.00	0.00	0.01	0.05	0.27
9	0.00	0.17	0.60	0.65	0.73
10	0.00	0.01	0.08	0.37	0.39
11	0.00	0.33	0.82	0.06	0.09
12	0.00	0.01	0.90	0.71	0.1
13	0.00	0.11	0.02	0.48	0.51
14	0.00	0.00	0.46	0.83	0.91
15	0.00	0.01	0.28	0.29	0.46
16	0.00	0.00	0.22	0.35	0.42
17	0.00	0.16	0.32	0.46	0.67
18	0.00	0.00	0.01	0.03	0.28
19	0.00	0.02	0.14	0.53	0.87
20	0.00	0.25	0.55	0.89	0.98
21	0.00	0.25	0.17	0.66	0.88

Com base no indicador coeficiente de fendilhamento estabelecem-se estados de condição. Decidiu-se estabelecer cinco estados de condição e considerou-se que a progressão do fendilhamento ocorre quando 5% da superfície do pavimento está fendilhada.

A divisão dos estados de condição foi feita considerando que o estado de condição 1 (EC_1) corresponde à fase de iniciação do fendilhamento e, por essa razão, a percentagem associada ao mesmo é bastante reduzida, e que o estado de condição 5 (EC_5) corresponde a um pavimento com a maior parte da sua área fendilhada. Na Tabela 4.3 podem consultar-se as percentagens de fendilhamento que foram consideradas para definir os cinco estados de condição.

Tabela 4.3: Caracterização dos Estados de Condição

Estado de Condição	% de fendilhamento
1	0 - 5
2	5 - 25
3	25 - 50
4	50 - 75
5	75 - 100

4.3. ANÁLISE DE DADOS

Os estados de condição em que se encontram as secções de pavimentos estudadas, nas datas das respectivas campanhas de inspecção realizadas, encontram-se no Anexo A, Tabela A.1. Consultando essa Tabela, verifica-se que as secções 11, 12, 13 e 21 melhoram de estado de condição, o que pode indicar que foram efectuadas intervenções de conservação nas mesmas de modo a melhorá-las para estados inferiores.

Para efectuar a previsão do desempenho dos pavimentos rodoviários, interessa que os dados referentes às secções em estudo evoluam para níveis de degradação mais elevados à medida que o tempo avança. Por essa razão, o procedimento a efectuar, neste caso, é dividir cada uma das secções em causa em duas secções distintas, de forma a que cada subdivisão abranja, apenas, estados de condição que aumentem ou que se mantenham os mesmos com o avançar das datas de inspecção. Da base de dados é possível obter informação sobre a última operação de conservação efectuada a cada secção em estudo e portanto, sabe-se que nesse ano cada uma das secções se encontra no estado de condição 1. Assim, considere-se a título de exemplo a secção 21:

Tabela 4.4: Evolução dos estados de condição, secção 21

Secção	Instante (anos)	Estado de Condição
21	1995	1
	2003	3
	2007	2
	2010	4
	2012	5

É possível visualizar-se que na inspecção feita no ano 2007 a secção apresenta uma melhoria do estado de condição em relação à inspecção feita no ano 2003. Procede-se, então, à divisão da secção 21 como se pode observar na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Divisão da secção 21 em duas secções

Secção	Instante (anos)	Estado de Condição
21 _A	1995	1
	2003	3
21 _B	2007	2
	2010	4
	2012	5

Pela Tabela 4.5 conclui-se que a secção 21_A vai contribuir com duas datas de inspecção para os cálculos e a secção 21_B contribui com as restantes três.

O mesmo procedimento é aplicado às secções 11 e 13, isto é, também elas são divididas em duas secções. Já a secção 12 só vai contribuir para a previsão do desempenho futuro dos pavimentos rodoviários com as três primeiras datas de inspecção uma vez que a sua última campanha melhora de estado de condição. O inventário inicial, sem alterações, pode ser consultado no Anexo A, Tabela A.1. Depois de efectuadas

as alterações enunciadas em cima descritas, apresenta-se, no Anexo A, Tabela A.2, o inventário final a utilizar no trabalho.

4.4 Cadeias de Markov em tempo contínuo

Admitindo que os estados são todos não instantâneos e tendo em conta o inventário de secções de pavimentos que se encontra na Tabela A.2 do Anexo A, é possível estimar os valores das taxas de transição através da expressão 3.12, como se mostra de seguida:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0915 \\ 0.0794 \\ 0.1212 \\ 0.3333 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

E, conseqüentemente, a matriz de transição de estados Q tem a seguinte forma:

$$Q = \begin{bmatrix} -0.0915 & 0.0915 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0794 & 0.0794 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1212 & 0.1212 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.3333 & 0.3333 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Como foi visto no Capítulo 3, é possível, através da matriz de taxas de transição, encontrar a matriz de probabilidades de transição. Note-se que, a matriz Q é única e, por essa razão, para o mesmo inventário de secções de pavimento tem sempre os mesmos valores de taxas de transição. Desta forma, a única variável no cálculo da matriz P é Δt . Então, aplicando a equação de Chapman-Kolmogorov 3.14, para $\Delta t = 1$ ano, é possível estimar as probabilidades de transição para esse ano:

$$P_{\Delta t=1} = \begin{bmatrix} 0.9126 & 0.0840 & 0.0033 & 0.0001 & 0.0000 \\ 0 & 0.9237 & 0.0718 & 0.0040 & 0.0005 \\ 0 & 0 & 0.8858 & 0.0968 & 0.0174 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7165 & 0.2835 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Concluído o processo de cálculo da matriz probabilística P , proceder-se-á, agora, ao cálculo do valor da verosimilhança. Para isso, é necessário o historial de inspecções que se encontra no Anexo A, Tabela A.2, e a matriz Q da equação 4.3.

4.4.1 Estimativa da verosimilhança

Depois de estimada a matriz probabilística P torna-se necessário verificar a adequabilidade do modelo utilizado através do resultado da verosimilhança. De modo a exemplificar o cálculo do somatório do logaritmo da verosimilhança, explicar-se-á o processo de cálculo para a secção de pavimento 1, com quatro datas de inspecção. Na Tabela 4.6 podem consultar-se os estados de condição da secção de pavimento referida, nas respectivas datas de inspecção.

Tabela 4.6: Registo de inspecções das secções de pavimento 1.

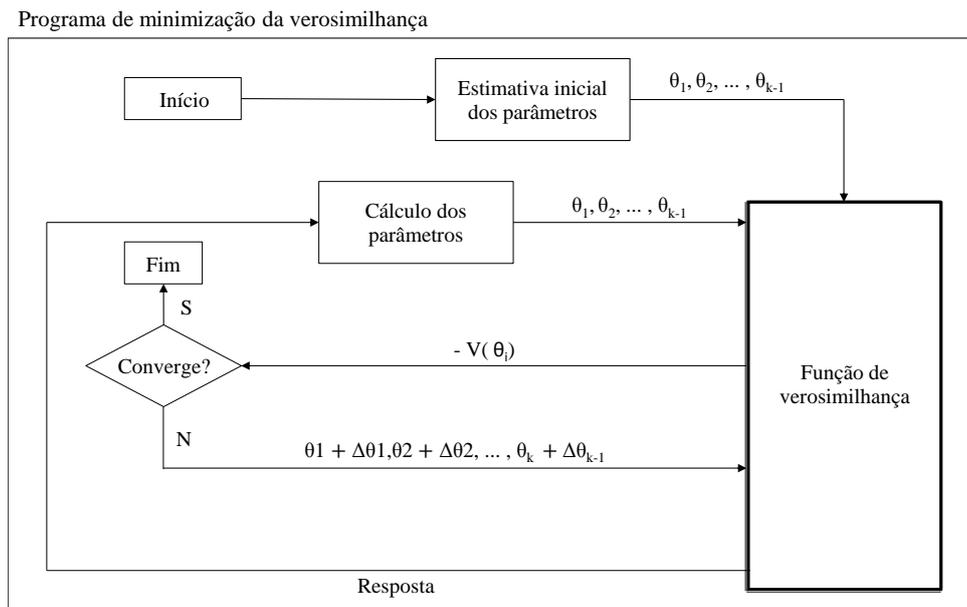
Secção	Estado de Condição				
	2000	Insp. 2003	Insp. 2007	Insp. 2010	Insp. 2012
1	1	1	2	4	5

Como já foi referido anteriormente, a matriz Q é única e encontra-se na expressão 4.3, sendo utilizada no cálculo das matrizes probabilísticas de Markov nas secções de pavimento exemplificadas de seguida. Assim, a única variável no cálculo da matriz probabilística é Δt . Então, para o cálculo do valor do somatório do logaritmo da verosimilhança é necessário calcular as matrizes probabilísticas para $\Delta t = 2, 3$ e 4 anos que são os intervalos de tempo decorrentes entre as datas de inspecção. Posteriormente, seleccionam-se os valores das matrizes correspondentes à transição de estado ocorrida, ou seja, para o primeiro caso, por exemplo, a data da última intervenção de conservação é 2000 e a primeira inspecção data de 2003 o que implica um $\Delta t = 3$. Então, encontrada a matriz $P_{\Delta t=3}$ o valor que entrará no somatório do logaritmo da verosimilhança é a posição p_{11} da matriz. No segundo caso pretende-se seleccionar o valor p_{12} da matriz $P_{\Delta t=4}$, no terceiro o valor o valor p_{24} da matriz $P_{\Delta t=3}$ e no quarto o valor p_{45} da matriz $P_{\Delta t=2}$.

Da mesma forma como foi exemplificado para a secção de pavimento 1, é aplicado o mesmo procedimento para todas as secções estudadas e efectuado o somatório de todos os valores de p_{ij} de forma a encontrar o valor do somatório do logaritmo da verosimilhança, sendo o mesmo $V = -106.0659$.

4.4.2 Maximização da verosimilhança

Depois de estimado o valor da verosimilhança, pretende-se nesta secção, através de uma função pré-programada, encontrar um valor para o mesmo parâmetro que seja mais próximo de zero, ou seja, um valor optimizado. Para isso é preciso utilizar uma rotina de cálculo que permita variar os valores θ da matriz Q de forma a minimizar o valor da verosimilhança em termos absolutos. Tendo em conta os princípios enunciados no capítulo 3, apresenta-se na Figura 4.1 o esquema exemplificativo da rotina desenvolvida para a resolução do problema.



$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{k-1}$ - Parâmetros a otimizar.

$V(\theta)$ - Escalar obtido da função de verossimilhança.

Figura 4.1: Fluxograma do programa de maximização da verossimilhança desenvolvido.

Definiu-se a função de verossimilhança, equação 3.17, como "função objectivo" com a finalidade de minimizar o escalar que essa função retorna. Este processo é iterativo e tem como base a variação dos parâmetros θ_i .

Na aplicação desta função é necessário ter em conta a forma da matriz Q , expressão 3.11, e a segunda condição associada à mesma. É, também necessário, como foi referido anteriormente, estabelecer restrições:

- fornecer uma estimativa inicial dos valores de θ_i ;
- limitar os valores de θ_i entre 0 e 1.

O modelo de minimização calcula o escalar da função objectivo através da estimativa inicial dada ao programa. Se o valor não convergir é efectuada uma nova estimativa dos parâmetros a identificar, como ilustrado na Figura 4.1. Este procedimento é realizado até que a diferença entre dois resultados provenientes de duas iterações consecutivas seja inferior a uma constante previamente definida ou seja atingido o número máximo de iterações, também previamente definido.

Como já foi referido, para a resolução do problema de minimização utilizou-se a função pré-programada *fmincon*. Esta função pretende encontrar o valor mínimo de uma função não-linear de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial.

Como foi referido é necessário, em primeiro lugar, fornecer uma estimativa inicial dos valores de θ_i . Sabendo que esses valores têm que variar entre 0 e 1 e uma vez que já foi encontrada uma solução

aproximada da matriz Q , utilizou-se, para este problema, os valores da expressão 4.2 como estimativa inicial para a otimização.

Então, aplicando a função de minimização do programa *MATLAB (R2010a)* "*fmincon*", obtém-se os seguintes valores de θ_i :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1621 \\ 0.3305 \\ 0.2640 \\ 0.3618 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Aplicando, agora, as propriedades da matriz Q apresentadas no capítulo 3, resulta:

$$Q = \begin{bmatrix} -0.1621 & 0.1621 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.3305 & 0.3305 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.2640 & 0.2640 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.3618 & 0.3618 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A matriz da expressão 4.6 corresponde à matriz óptima do problema. Uma vez encontrados os valores óptimos é, então, possível calcular, aplicando o método da máxima verosimilhança, o valor do somatório do logaritmo da verosimilhança que traduz a melhor eficiência do modelo. O valor estimado para este parâmetro é, então, $V = -87.7283$. Na Figura 4.2 apresenta-se a evolução do valor de verosimilhança ao longo das iterações realizadas, sendo possível visualizar que ocorreram 17 iterações.

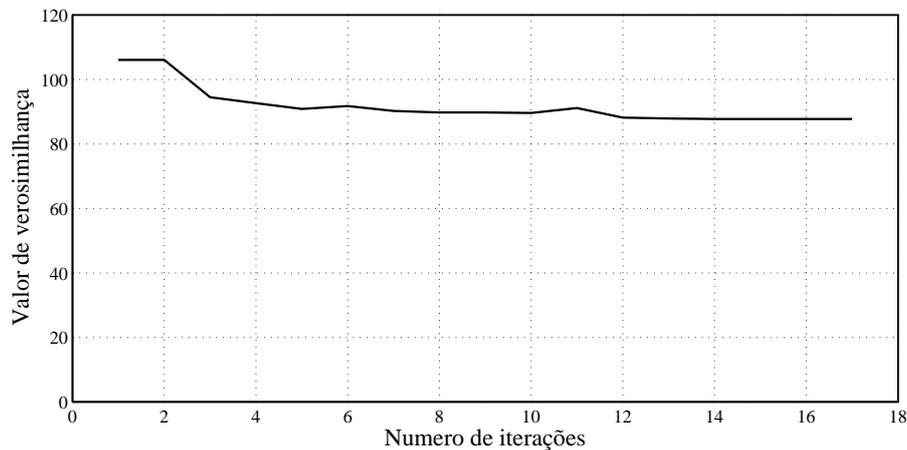


Figura 4.2: Evolução da verosimilhança.

4.4.3 Avaliação do ajustamento do modelo

Uma vez que se obteve um valor de verosimilhança não nulo, pretende-se avaliar de que forma é que a matriz de probabilidades deduzida, a partir dos valores de θ_i que optimizam a primeira, se aproxima à transição de estados observada no inventário do Anexo A.

Os dados referentes aos estados de condição dos pavimentos que se encontram no inventário apresentado no Anexo A, correspondem a inspecções visuais realizadas e, portanto, são acontecimentos reais ($p_{ij} = 1$). Tendo em conta que, o modelo é mais eficiente quanto menor for o valor da verosimilhança, implica que um valor de verosimilhança nulo corresponda a uma situação idêntica à real, não sendo, no entanto, uma situação possível pois, para isso, o cálculo do somatório do logaritmo da verosimilhança teria que ser 1 pois $\ln(1) = 0$.

Para isso é necessário, como ponto de partida, consultar o inventário de secções e contabilizar o número de secções que, após cada intervalo de tempo entre inspecções, se encontra em cada um dos estados de condição. Posteriormente, faz-se o mesmo cálculo para o modelo utilizado com o objectivo de comparar ambos os resultados. Através da consulta do inventário chegou-se, então, à Figura 4.3:

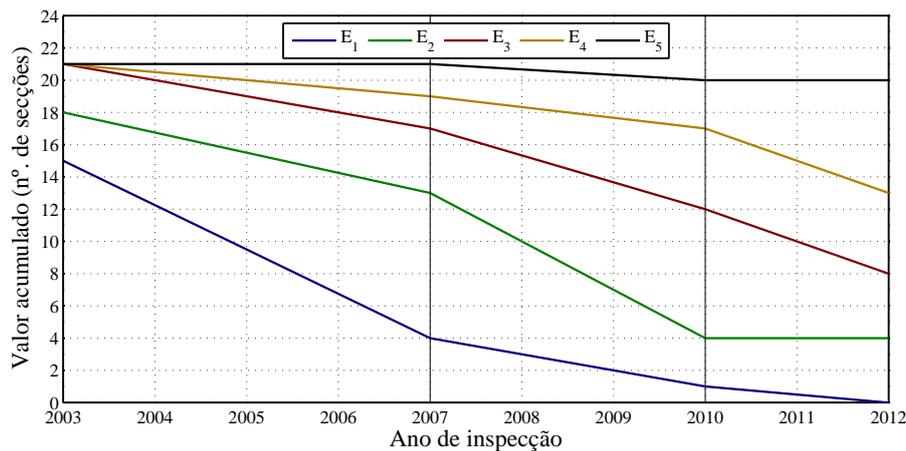


Figura 4.3: Contabilização do número de secções em cada estado de condição após cada data de inspecção, obtida através da consulta do inventário,

Para efectuar a mesma contabilização mas para o modelo optimizado é necessário calcular as matrizes P de cada uma das secções presentes no inventário, para os intervalos de tempo das respectivas inspecções. Posteriormente, é efectuado um somatório de uma linha de cada matriz P , sendo que a linha que entra no somatório depende da transição dos estados de condição da secção respectiva, mais concretamente do último estado da transição. De uma forma mais simplificada, para uma transição de i para j num intervalo de tempo Δt , selecciona-se a linha j da matriz $P_{\Delta t}$.

É importante referir que as matrizes calculadas na presente secção são diferentes das matrizes calculadas em 4.4.1 uma vez que a matriz intensidade Q utilizada nesta secção é a matriz óptima, como já foi referido anteriormente. O procedimento é, então, efectuado para todas as secções do inventário sendo, depois, possível chegar aos valores dos números de estados de condição, após cada um dos intervalos de tempo:

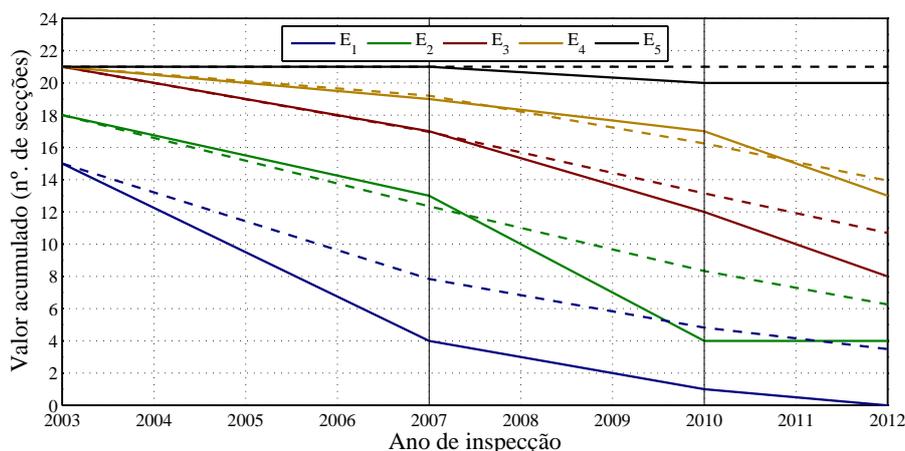


Figura 4.4: Comparação da contabilização do número de secções, em cada estado de condição à data de cada inspecção, dos valores observados e dos valores obtidos do modelo.

Na Figura 4.4 é ilustrado, a cheio o número de secções contabilizado directamente a partir da base de dados e a tracejado o número de secções contabilizado a partir do modelo, utilizando o procedimento descrito anteriormente. Ambas as contabilizações correspondem aos diferentes estados de condição considerados e à data de cada uma das inspecções realizadas.

Após a análise dos resultados, conclui-se que existem alguns desajustamentos em relação aos valores observados, principalmente no número de secções que se encontra no estado de condição 1. Contudo, no geral, pode concluir-se que existe um bom ajustamento do modelo à realidade. Os desajustamentos que existem podem dever-se ao facto de se ter utilizado uma base de dados real em que o número de secções não seja suficientemente vasto para permitir um melhor ajustamento e onde não se pode controlar a precisão com que os dados foram obtidos.

4.4.4 Evolução das probabilidades de transição

É possível conhecer a evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo, partindo do seu estado inicial, de forma a prever o desempenho futuro de um pavimento. Para isso, interessa a matriz intensidade Q , apresentada no presente capítulo, e da expressão 3.14 presente no capítulo 3. A evolução das probabilidades de transição será feita recorrendo à matriz Q da expressão 4.6.

A análise da evolução das probabilidades foi efectuada para um período de 20 anos e fez-se variar o estado de condição inicial de uma secção de pavimento. Considera-se como estágio inicial os estados EC_1 , EC_2 , EC_3 e EC_4 , sendo de seguida ilustradas as evoluções de probabilidades para os valores da matriz Q encontrados através da optimização da verosimilhança.

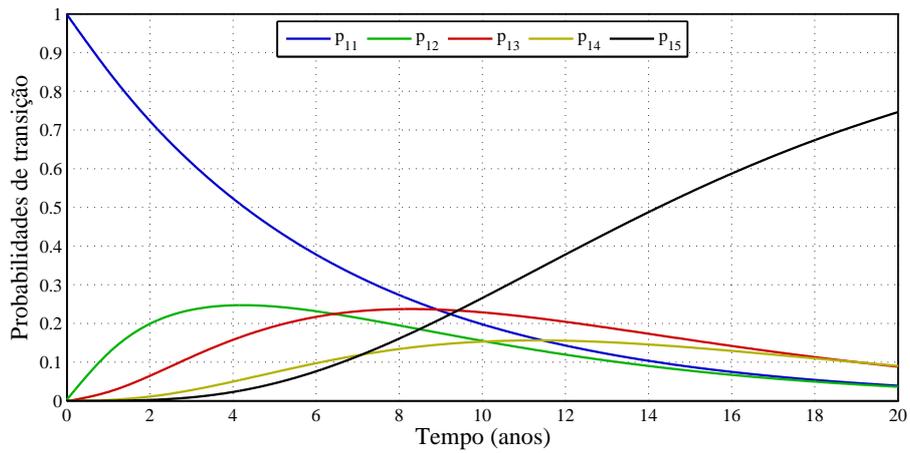


Figura 4.5: Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo para o estado de condição inicial 1.

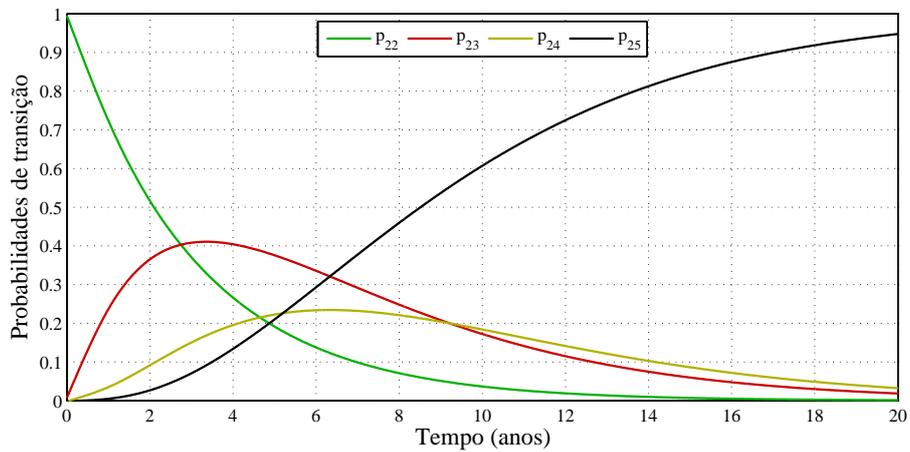


Figura 4.6: Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo para o estado de condição inicial 2.

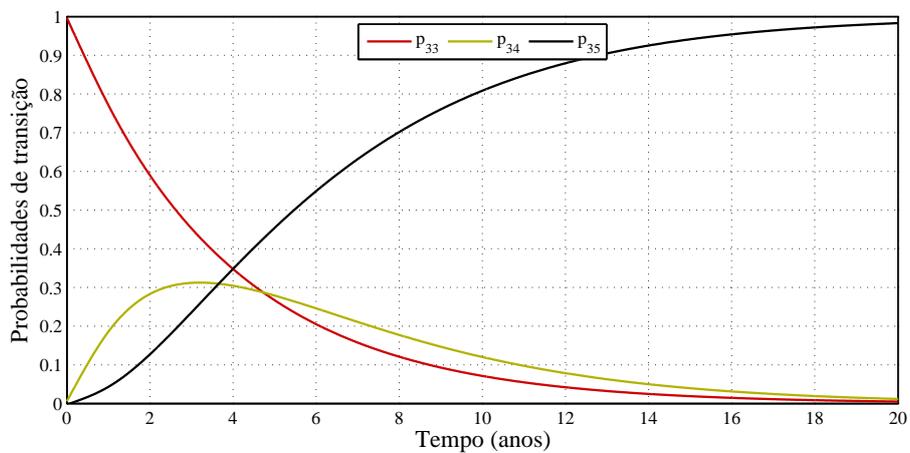


Figura 4.7: Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo para o estado de condição inicial 3.

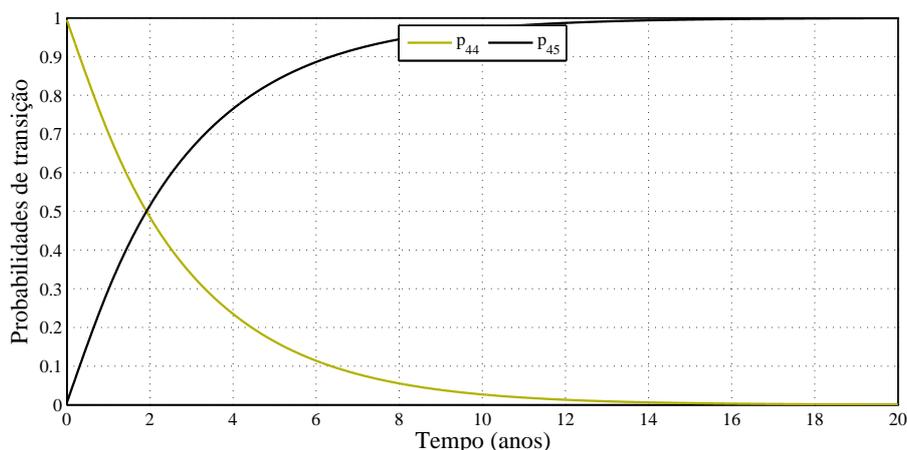


Figura 4.8: Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo para o estado de condição inicial 4.

Através da análise dos gráficos apresentados nas Figura 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 é possível retirar algumas conclusões:

- Das quatro figuras mencionadas é possível verificar que as probabilidades de transição em que o i é menor que o estado inicial considerado não surgem nos gráficos. Isto deve-se à forma da matriz P , ou seja, por não se considerar que existem ações de conservação aplicadas ao longo do tempo.
- É fácil de visualizar, também, que, em todas as figuras, as probabilidades de transição em que o $j < 5$ e $i \neq j$ têm uma tendência natural para aumentar a probabilidade de transição até um dado ponto no tempo, sendo que após esse ponto decrescem progressivamente, aproximando-se de zero. Isto acontece porque, com o passar do tempo, vai aumentando a probabilidade de o pavimento passar para o estado seguinte.
- Quando $i=j$, a probabilidade de um pavimento se manter no mesmo estado, ao longo do tempo, é continuamente decrescente. Sendo, isto, traduzido por uma curva decrescente em todo o seu domínio.
- Para um mesmo i , à medida que o j aumenta, as probabilidades de transição têm o ponto de inflexão mais tarde no tempo, como se pode observar na Figura 4.5, a curva P12 em comparação com a curva P13 ou P14. Isto acontece porque, uma secção de pavimento que se encontre inicialmente no estado 1, passa em primeiro lugar para o estado 2 antes de passar para o estado 3 ou estado 4.
- Quando $j=5$ verifica-se, em todos os gráficos, que existe um contínuo aumento da sua probabilidade. Isto deve-se ao facto do estado de condição 5 ser o mais gravoso e, por essa razão, os resultados tendem a convergir para esse valor.
- Não se efectua esta análise para o estado de condição inicial 5 uma vez que esse é o último estado considerado e, portanto, não é possível haver uma evolução a partir desse estado.

4.4.5 Tempo de permanência nos diferentes estados de condição

É possível estimar o tempo de permanência em cada estado de condição através da expressão 3.15, capítulo 3, e tendo a matriz Q da expressão 4.6. Os valores das taxas de transição utilizadas neste cálculo, bem como os valores resultantes de tempo de permanência encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Valores estimados do tempo de permanência

Taxas de transição		Tempo de permanência (anos)	
θ_1	- 0.1621	EC_1	6.2
θ_2	- 0.3305	EC_2	3.0
θ_3	- 0.2640	EC_3	3.8
θ_4	- 0.3618	EC_4	2.8

Analisando a informação da Tabela 4.7, é de notar que uma secção de pavimento do inventário de inspecções permanece por mais tempo no estado de condição 1 do que noutra qualquer estado, ou seja, uma secção que inicialmente se encontre no estado de condição 1 demora mais tempo a passar para outro estado de condição mais grave do que qualquer outra secção que inicialmente se encontre num outro estado de condição mais avançado. O estado de condição 4 é o que corresponde a um menor tempo de permanência o que quer dizer que, as secções de pavimento que cheguem a este estado de condição, rapidamente evoluem para o estado de condição mais gravoso.

É de notar que, o estado de condição 1 corresponde ao estado de iniciação do fendilhamento, sendo natural ser o estado com um maior tempo de permanência. Já os restantes estados dizem respeito à fase de progressão do mesmo.

Através da análise do tempo de permanência em cada estado de condição, torna-se mais evidente perceber a altura mais indicada para a realização de inspecções visuais às secções de pavimento, pois permite perceber o tempo estimado em que cada estado de condição permanece o mesmo antes de avançar para o seguinte.

Os dados relativos ao tempo de permanência em cada estado de condição podem ser traduzidos num gráfico do tipo da Figura 4.9, onde é possível visualizar as duas etapas de evolução do fendilhamento.

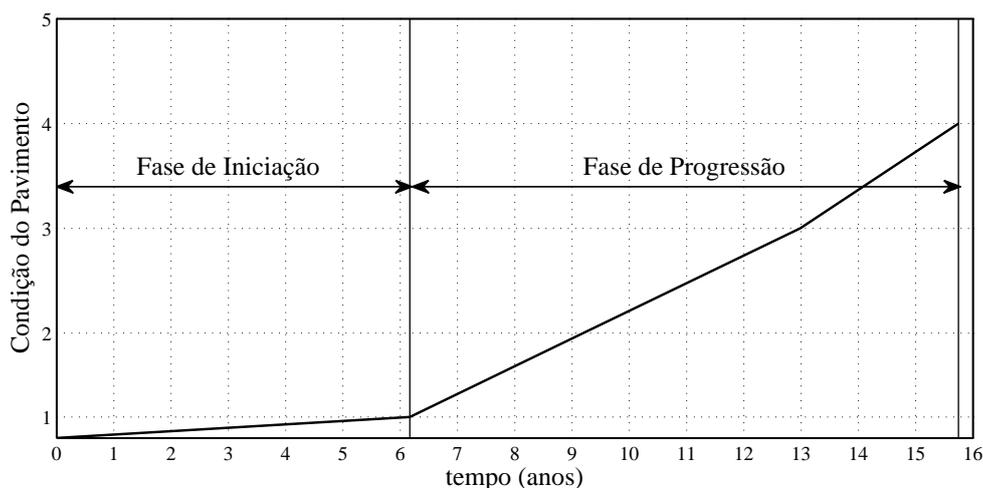


Figura 4.9: Evolução do fendilhamento tendo em conta o tempo de permanência nos diversos estados de condição.

Comparando a Figura 4.9 e a Figura 2.4 da secção 2.4, percebe-se que os resultados encontrados de tempo de permanência são resultados coerentes com o que acontece na realidade. Veja-se, para isso, a comparação de ambas as fases das figuras na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Comparação das fases de fendilhamento.

Figura	Fase de iniciação (Anos)	Fase de progressão (Anos)
2.4	0 - 5	5 - 15
4.9	0 - 6.2	6.2 - 15.8

Note-se que, na definição dos estados de condição considerou-se o estado 1, fase de iniciação, a variar entre o valor 0% e o valor 5% do coeficiente de fendilhamento e interrompemos a fase de progressão do fendilhamento no estado 4 uma vez que não se estimaram valores de tempo de permanência para o estado 5. Por essa razão, na ilustração 4.9, o primeiro estado não apresenta uma linha recta com valor de coeficiente de fendilhamento constante como acontece na Figura 2.4.

4.5 Previsão do desempenho de uma rede rodoviária

Na presente secção, pretende-se efectuar o estudo da evolução dos estados de condição da rede rodoviária da Tabela A.2 do Anexo A sem aplicação de acções de conservação em comparação com o desenvolvimento dos estados de condição ao longo do tempo considerando intervenções de conservação. Para isso é necessário definir uma data a partir da qual se quer efectuar a previsão do desempenho e definir o período de tempo que se quer estudar para, posteriormente, ser aplicado o processo de Markov.

O inventário de secções de pavimentos utilizado é idêntico ao do Anexo A, Tabela A.2 no entanto, são apenas necessários os dados relativos aos estados de condição correspondentes à última data de inspecção

e as respectivas datas para cada secção. O inventário relativo aos dados mencionados pode ser consultado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Inventário utilizado na evolução dos estados de condição

Secção	Condição	Data	Secção	Condição	Data
1	5	3 / Julho / 2012	12	5	4 / Dezembro / 2007
2	4	14 / Dezembro / 2012	13_A	2	4 / Fevereiro / 2003
3	3	25 / Março / 2012	13_B	4	12 / Outubro / 2012
4	5	26 / Novembro / 2012	14	5	10 / Junho / 2012
5	2	16 / Novembro / 2012	15	3	17 / Dezembro / 2012
6	4	1 / Fevereiro / 2012	16	3	18 / Janeiro / 2012
7	5	19 / Abril / 2012	17	4	6 / Dezembro / 2012
8	2	1 / Março / 2012	18	2	12 / Novembro / 2012
9	4	31 / Outubro / 2012	19	5	30 / Agosto / 2012
10	3	10 / Novembro / 2012	20	5	24 / Maio / 2012
11_A	5	16 / Setembro / 2007	21_A	3	22 / Setembro / 2003
11_B	2	9 / Agosto / 2012	21_B	5	9 / Abril / 2012

Tendo os dados da Tabela 4.9, pretende-se, agora, efectuar a actualização dos estados de condição, referentes a cada secção, para a data considerada como presente. Considerando, então, que a data a partir da qual se quer efectuar a previsão do desempenho é no dia 2 de Setembro de 2013, há que perceber qual a evolução da deterioração do pavimento desde a data da última inspecção até ao presente. É importante referir que tendo cada uma das secções uma data relativa à última inspecção diferente, o processo a aplicar na actualização é o processo de Markov em tempo contínuo. Contudo, a partir da data em que se quer efectuar a previsão do desempenho dos pavimentos o processo de Markov é aplicado em tempo discreto uma vez que os intervalos de tempo para os quais se quer realizar o estudo são, também eles, valores discretos.

Então, em primeiro lugar, calcula-se, para cada secção, o $\Delta T_{presente}$ da seguinte forma:

$$\Delta T_{presente} = t_a - t_i \quad (4.7)$$

Onde, $\Delta T_{presente}$ é o intervalo de tempo, em anos, que passou entre a data da última inspecção, t_i , e a data actual, t_a .

Depois de encontrado o $\Delta T_{presente}$ para cada secção em estudo, aplica-se a fórmula 3.14, em que a matriz intensidade Q é a da expressão 4.6 uma vez que esta aproxima de forma realista os valores do inventário. Daqui, resulta uma matriz de transição de estados actualizada para cada secção em estudo e, desta forma, é possível calcular a evolução do estado de condição médios de um pavimento ao longo do tempo.

Para uma melhor compreensão do que foi explicado anteriormente, segue-se um exemplo prático, para a secção 15, do procedimento de cálculo, sendo apresentado na Tabela 4.10 os dados referentes à mesma.

Tabela 4.10: Dados referentes à secção 15.

Secção	Condição	Data
15	3	17 / Dezembro /2012

Secção de pavimento 15

Para a secção de pavimento 15, o $\Delta T_{presente}$ toma o seguinte valor:

$$\Delta T_{presente} = \frac{(17/Dez./2012) - (2/Set./2013)}{365} = 0.71 \text{anos} \quad (4.8)$$

Tendo o valor de $\Delta T_{presente}$, é possível calcular a matriz de transição de estados da secção, como se mostra seguidamente:

$$P_{\Delta T_{presente}=0.71} = \begin{bmatrix} 0.9371 & 0.0611 & 0.0017 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0 & 0.9452 & 0.0525 & 0.0021 & 0.0002 \\ 0 & 0 & 0.9175 & 0.0733 & 0.0092 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7893 & 0.2107 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Para a mesma secção sabe-se, ainda, que o vector de probabilidades de transição, em relação ao estado de condição em que o pavimento se encontra, terá a seguinte forma:

$$p_{t,15} = [0, 0, 1, 0, 0] \quad (4.10)$$

O estado de condição médio obtém-se, então, da seguinte forma:

$$EC_{méd,15} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0] \times P_{\Delta t} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Em que, $P_{\Delta T}$ é a matriz de probabilidades de transição do ano para o qual se está a efectuar o cálculo.

4.5.1 Sem considerar acções de conservação

O processo de cálculo demonstrado anteriormente é, agora, aplicado a todo o inventário da Tabela 4.9 de forma a obter a evolução do estado de condição médio da rede ao longo de um período de tempo de 20 anos. Na Figura 4.10 é possível observar esta evolução.

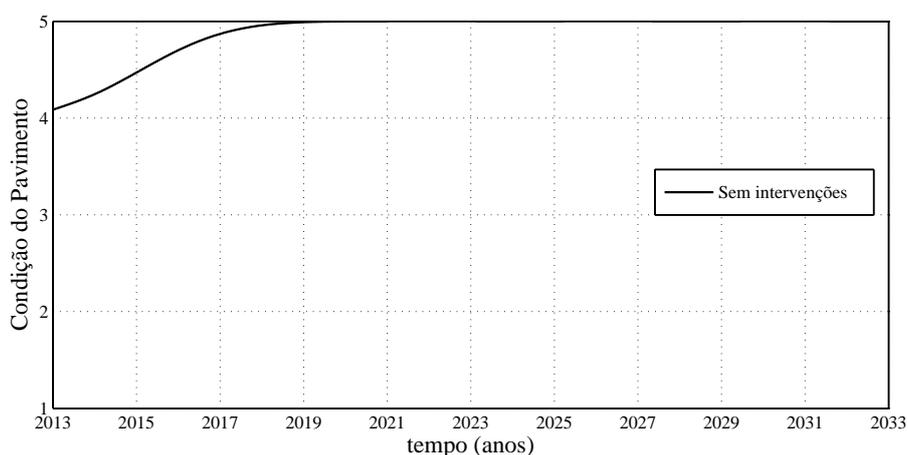


Figura 4.10: Evolução do estado de condição médio da rede ao longo do tempo.

Através da Figura 4.10 é possível observar que o estado de condição médio inicial para a rede de estradas é bastante elevado, 4.1 aproximadamente, o que é naturalmente esperado uma vez que observando o inventário utilizado nota-se que, no geral, as secções de pavimento se encontram bastante deterioradas. Este estado tem um aumento contínuo até que ao fim de aproximadamente 6 anos atinge o estado mais gravoso, ou seja a partir deste ponto a evolução estagna no valor máximo de deterioração. É, então, notável a necessidade de intervenção urgente na rede.

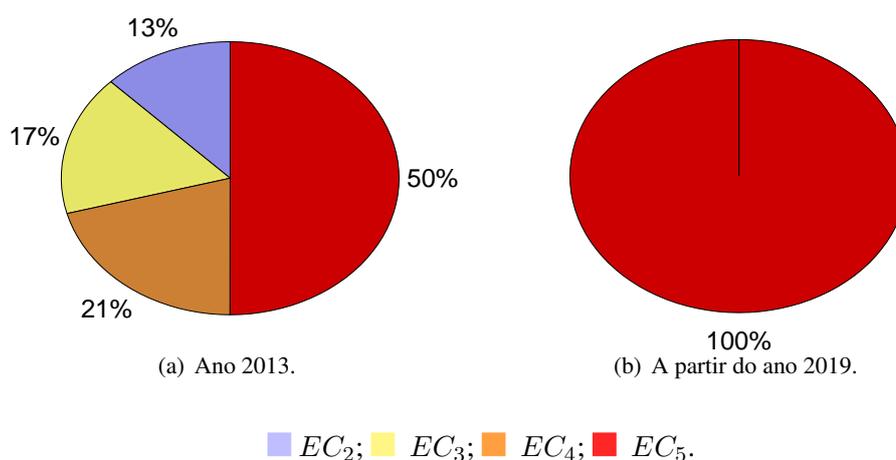


Figura 4.11: Ilustração do número de secções em cada estado de condição, na data início e a partir de 6 anos de previsão, quando não são aplicadas estratégias de conservação.

A Figura 4.11 apresenta o número de secções de pavimento que se encontra em cada um dos estados de condição para o ano de início (4.11(a)) e fim (4.11(b)) da previsão. É possível observar, através da figura, que, no ano inicial, não há nenhuma secção no estado de condição 1 e que o número de secções nos estado 4 e 5 corresponde a 71% da rede. Tendo em conta o estado de deterioração elevado da rede logo no início da previsão, é natural que ao fim de 20 anos todas as secções se encontrem no estado de condição 5, como se observa na Figura 4.11(b).

Na secção que se segue será efectuada a previsão do desempenho considerando acções de conservação a fim de comparar o seu efeito na rede e verificar qual das opções é mais eficaz.

4.5.2 Considerando acções de conservação

Quando são aplicadas acções de conservação, a evolução dos estados de condição progride mais lentamente ao longo do tempo. O estudo que se irá efectuar agora, diz respeito ao mesmo inventário, Tabela 4.9, e irá ser comparado aos resultados da Figura 4.10.

Para elaborar este estudo, é necessário seleccionar estratégias de conservação preventiva e correctiva. Decidiu-se estudar a evolução dos estados de condição de uma rede de estradas com aplicação de revestimento superficial como conservação preventiva e como conservação correctiva decidiu-se considerar um reforço dos pavimentos.

Na Tabela 4.11, podem consultar-se as estratégias de conservação que irão ser consideradas como medidas preventivas e correctivas:

Tabela 4.11: Dados referentes às acções de conservação.

Acção	Estratégia	$T_{p,i}$	T_d	ΔT	EC_i	EC_f
Preventiva com base no tempo	A	5	3	4	-	-
	B	-	-	-	3	1
		-	-	-	4	1
Correctiva com base no estado	C	-	-	-	5	1
		-	-	-	4	1
	-	-	-	5	1	

Relembrando a definição das variáveis da Tabela 4.11:

- $T_{p,i}$ - tempo até à primeira aplicação da conservação;
- T_d - tempo de duração da aplicação da conservação;
- ΔT - intervalo de tempo entre aplicações de manutenções.
- EC_i - estado de condição a partir do qual se deseja efectuar a acção de conservação;
- EC_f - estado de condição que se pretende atingir depois de efectuada a acção de conservação.

Conservação da rede no ano de início da previsão

Tendo em conta o estado médio da rede na data inicial de previsão, torna-se necessário aplicar uma estratégia de conservação correctiva logo nesse ano, uma vez que a maioria das secções se encontram no estado 4 e 5. Então, numa fase inicial, irá proceder-se à aplicação das estratégias B e C da Tabela 4.11. Ao aplicar estas estratégias à rede, deixam de existir, para a estratégia B secções no estado 3,4 e 5, e, para a estratégia C secções no estado 4 e 5.

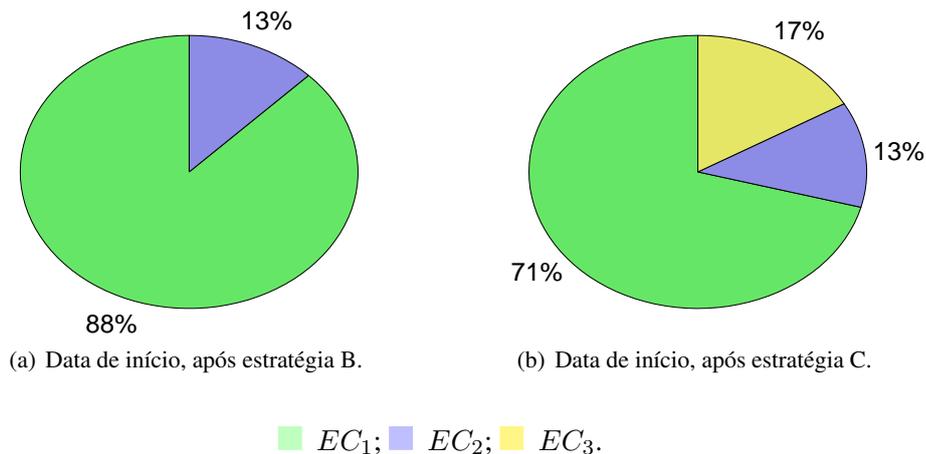


Figura 4.12: Ilustração do número de secções em cada estado de condição.

Como se pode observar pela Figura 4.12, após a aplicação das duas estratégias de conservação o estado da rede melhora drasticamente, em comparação com a Figura 4.11(a). Após a aplicação da estratégia C, Figura 4.12(a), 88 % das secções da rede passam para o estado 1, uma vez que era essa a percentagem de secções que se encontrava nos estados 3,4, e 5 antes de serem conservadas, e 13% da rede manteve-se no estado 2, pois a estratégia de conservação B implica que as secções que estejam no estado 2 não sofram qualquer tipo de conservação. Observando, agora, a Figura 4.12(b), é visível que, comparando com a Figura 4.12(a), o seu estado é ligeiramente pior. Isto deve-se ao facto de a estratégia de manutenção C não aplicar nenhuma técnica de conservação às secções que se encontrem no estado de condição 3. No entanto, a estratégia de conservação C implica sempre uma melhoria do estado de condição médio da rede bastante acentuada.

Depois da aplicação das estratégias de conservação B e C na data de início da previsão, irão, agora, ser aplicadas todas as estratégias de conservação, descritas na Tabela 4.11, para um período de 20 anos.

Conservação correctiva - Estratégias B e C

Irá, agora, proceder-se à aplicação das estratégias de manutenção B e C para um horizonte de 20 anos. O critério adoptado na aplicação destas estratégias de conservação baseia-se no seguinte princípio: conservar as secções de pavimento que se encontrem no estado de condição EC_i . Desta forma, adapta-se o programa elaborado para a previsão do desempenho futuro da rede sem considerar acções

de conservação, de forma a transferir para o estado de condição EC_f todas as secções de pavimento que atinjam o estado EC_i . Então, na Figura 4.13 pode observar-se a previsão do desempenho da rede para as estratégias B e C, para o horizonte estudado, e apresenta-se, ainda, a curva de evolução da deterioração da rede sem qualquer estratégia de conservação.

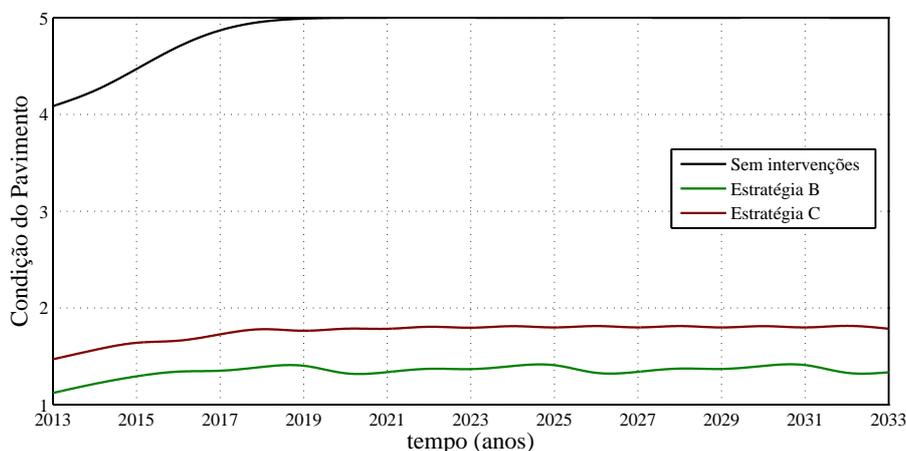
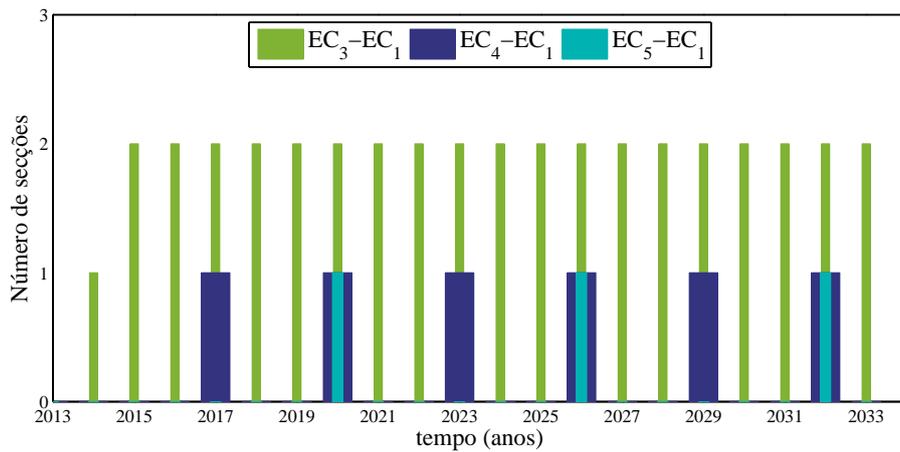


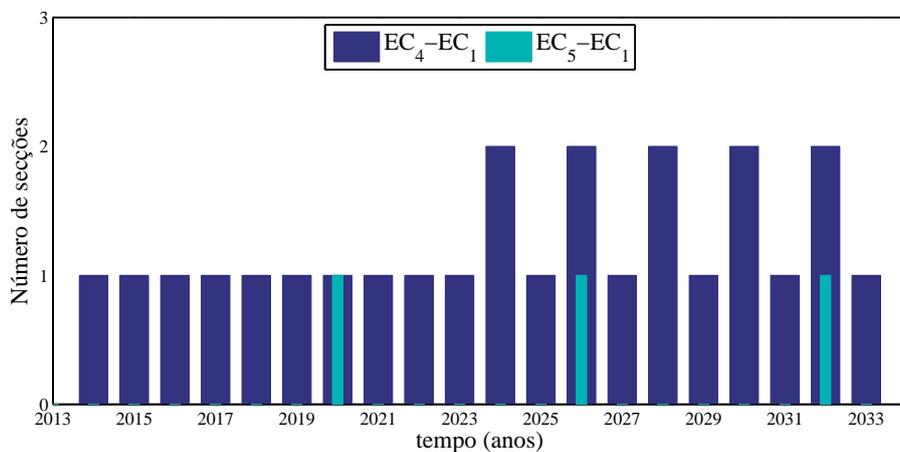
Figura 4.13: Evolução do estado médio da rede após aplicação das estratégias de conservação B e C.

Como se pode verificar, pela Figura 4.13, para qualquer um dos cenários de conservação estudados, o estado de condição médio da rede melhora consideravelmente. Esta constatação pode ser facilmente explicada observando a Figura 4.11(a). Aqui, é possível visualizar que, antes de ser aplicada qualquer tipo de acção de conservação, existiam 12 secções no estado 5, 5 secções no estado 4 e 4 secções no estado 3. É importante referir, também, que não existia nenhuma secção com estado de condição 1 no início da previsão. Aplicando as estratégias de conservação B e C, Figura 4.12, passaram a existir 21 secções no estado 1 e 0 no estado 3, 4 e 5, para a primeira situação, e, para a segunda situação, passaram a existir 17 secções no estado 1 e 0 no estado 4 e 5. Desta forma, o estado da rede, na data inicial, diminui de 4.1 para 1.12 e 1.47 para estratégia B e C, respectivamente. Uma outra observação que se pode fazer desta figura, é o facto de em ambos os cenários, a partir do sexto ano de previsão aproximadamente, a curva de deterioração começar a estabilizar num valor inferior ao estado 2. Isto acontece porque sempre que existe alguma secção num estado igual ou superior a EC_i aplica-se a acção de conservação e a mesma passa a ter um estado igual a EC_f . É de referir, também, que, apesar das curvas estabilizarem, oscilam entre valores muito próximos uma vez que, só se considera que existe uma secção de pavimento quando o seu valor é igual ou superior a 0.5. Assim, existem sempre valores superiores a 0 no vector que representa os estados de condição nas posições 3, 4 e 5, na primeira situação, e nas posições 4 e 5, na segunda situação, ainda que os mesmos nunca sejam superiores a 0.5.

Apresenta-se, agora, na Figura 4.14 a previsão do número de secções que terão que se reabilitar, por ano, para cada uma das situações consideradas, uma vez que atingem estados de condição superiores aos estipulados. O facto de surgirem secções com estados de condição superiores ao considerado como estado limite prende-se com a forma da matriz probabilística P que permite que haja um ou mais saltos entre transições e não apenas a transição para o estado imediatamente a seguir, isto é, para o Δt em estudo (1 ano) as secções podem transitar mais do que um estado.



(a) Número de operações de conservação correspondentes à Estratégia B.



(b) Número de operações de conservação correspondentes à Estratégia C.

Figura 4.14: Ilustração do número de secções que foram conservadas, por ano, para os dois cenários considerados.

Após os 20 anos considerados na previsão do desempenho o número de secções em cada estado de condição pode ser consultado na Figura 4.15. É possível visualizar que o número de secções que se encontram no estado 1 diminui ligeiramente e, conseqüentemente, aumentam as que se encontram nos restantes estados. Tendo em conta que, como já se viu, a partir do ano de previsão 6 o estado médio da rede estabiliza, isto implica que a partir dessa data os números de secções em cada estado de condição sejam muito próximo dos valores da referida figura.

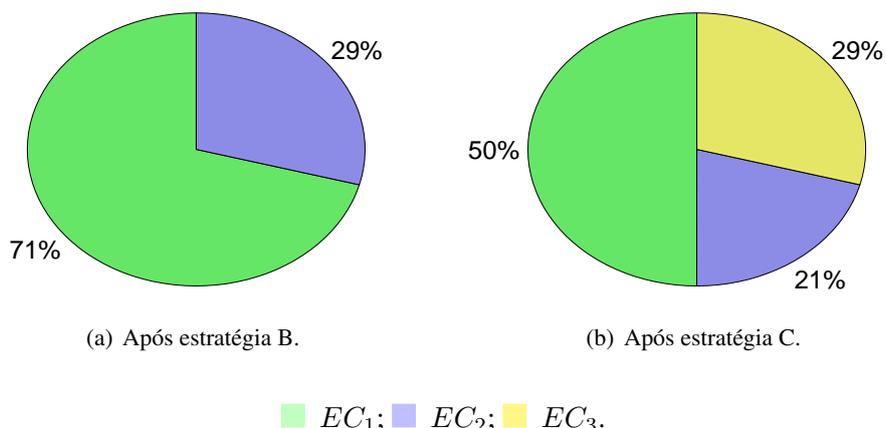


Figura 4.15: Ilustração do número de secções em cada estado de condição, após aplicação das estratégias B e C no último ano de previsão.

Conservação preventiva - Estratégia A

Tendo em conta que a conservação preventiva apenas é utilizada para impedir a progressão da deterioração do pavimento durante um certo período de tempo, dependente da técnica utilizada, decidiu-se optar pela estratégia de conservação B na data de início da previsão. Isto porque, como já se viu na Figura 4.10, o estado médio da rede nesta data é muito avançado o que implica que grande parte das secções apresente um estado de condição superior a 3, não fazendo sentido aplicar-se uma acção de conservação preventiva nestes casos. Assim, o estado de condição médio da rede, na data de início da aplicação da previsão do desempenho futuro da rede, passa a ser 1.12.

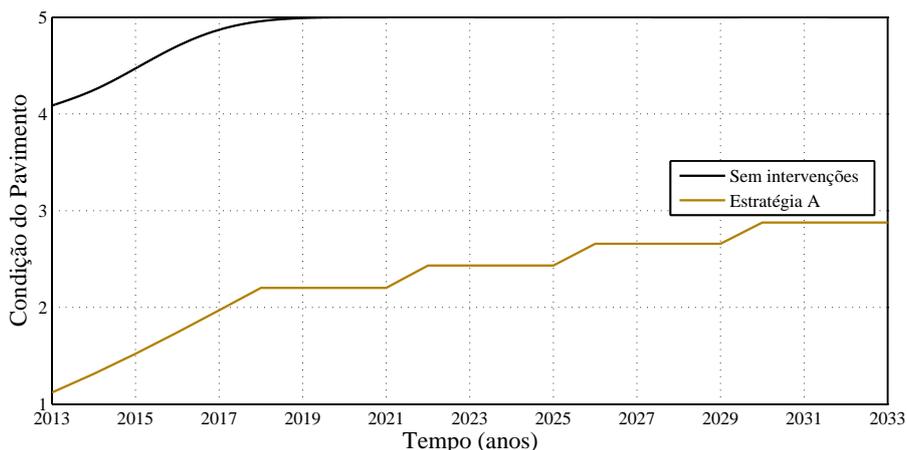


Figura 4.16: Evolução do estado médio da rede após aplicação da estratégia de conservação A.

Através da Figura 4.16 é possível visualizar que, no final da previsão, com este tipo de acção de conservação o estado de condição médio da rede não chega ao estado 3, o que comparado com o estado

de condição médio da rede quando não se efectua qualquer tipo de intervenção de conservação é bastante mais baixo.

Na Figura 4.17 é ilustrado o número de intervenções efectuadas, durante o período de previsão, sendo que todas as secções recebem o mesmo número de intervenções.

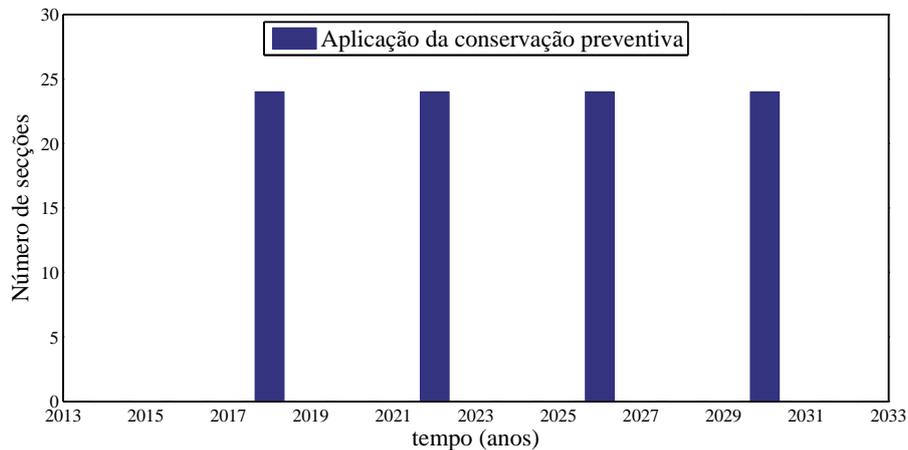


Figura 4.17: Ilustração do número de conservações correspondentes à Estratégia A, por ano, aplicadas às 24 secções.

Discussão de resultados

- Comparando os dois tipos de acção de conservação, Figura 4.13 e 4.16, é possível visualizar que ao fim do período analisado o estado atingido pela aplicação da estratégia A, 2.8, é maior que o estado atingido quando se aplica as estratégias de conservação B e C, inferior a 2 em ambas as situações. Contudo, devido à discrepância de custos que cada uma das acções implica não se pode concluir, apenas a partir dos gráficos apresentados, qual é a acção de conservação mais vantajosa. Uma vez que, como já foi discutido no capítulo 2, a escolha da estratégia de conservação a aplicar depende dos custos e benefícios da mesma.
- Comparando, agora, as mesmas figuras com a previsão da deterioração quando não é aplicada qualquer acção de conservação, pode-se visualizar que ambas as acções contribuem para um atraso na evolução do fendilhamento, pois ambas as previsões com aplicação de conservação têm valores de estado de condição bastante menores do que a previsão sem aplicação de conservação, o que já era esperado uma vez que logo no ano 2013, inicio da previsão, se decidiu aplicar estratégias de conservação do tipo correctivas.

4.5.3 Evolução de cada estado de condição

Depois de efectuada a análise da evolução do fendilhamento para a rede rodoviária através do estado de condição médio, é importante efectuar essa análise para cada um dos estados de condição considerados, de forma a perceber de que modo estes evoluem. Na Figura 4.18 pode observar-se a evolução dos estados de condição ao longo deste período quando não são efectuadas intervenções nas secções.

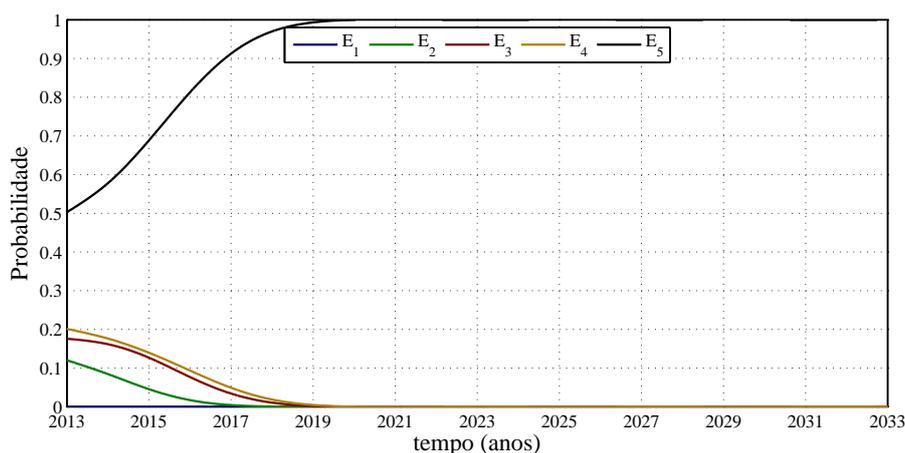


Figura 4.18: Evolução dos estados de condição sem aplicação de acções de conservação

Da análise da Figura 4.18 é possível observar que:

- apenas existe evolução dos estados 2, 3, 4 e 5. Isto deve-se ao facto de, no inventário apresentado na Tabela 4.9, não existirem secções no estado de condição 1, ou seja, todas as secções de pavimento, na data da última inspecção realizada, estavam em estados superiores a 1 e, portanto, não existe evolução do mesmo.
- como esperado, todos os estados de condição se iniciam num valor superior a zero. Isto porque o estado de condição médio é, aproximadamente 4.1, o que corresponde ao vector de probabilidades $[0 \ 0.1199 \ 0.1745 \ 0.2005 \ 0.5051]$.
- a evolução dos estados de condição 2,3 e 4 realiza-se de forma decrescente, sendo que ao fim de 6 anos, aproximadamente, os valores tendem a aproximar-se de zero, uma vez que com o avançar do tempo, a deterioração do pavimento tem uma tendência natural de aumentar.
- o estado de condição 5 é o único estado que apresenta uma curva de evolução crescente, uma vez que, com o passar do tempo e com o aumento da deterioração dos pavimentos, as probabilidades dos estados de condição 2, 3 e 4 vão sendo transferidas para este estado.

Irá ser agora mostrado nas Figura 4.19 e Figura 4.20 a evolução dos estados de condição, para o horizonte em estudo, quando é aplicada a conservação correctiva para ambos os cenários considerados. Na primeira figura verifica-se que os estados 3, 4 e 5 têm uma probabilidade quase nula uma vez que se considerou que qualquer secção que chegue a um destes estados é conservada para o estado 1. Assim, é natural haver um crescimento da probabilidade da rede se encontrar no estado 2 enquanto que a probabilidade de se

encontrar no estado 1 diminui ao longo do tempo. Ambas as curvas de probabilidades tendem a estabilizar a partir de um certo tempo. Em relação à segunda figura, o processo de raciocínio é o mesmo. Mas, neste caso, como se quer conservar todas as secções com estado médio igual ou superior a 4, as curvas correspondentes aos estados 4 e 5 apresentam uma probabilidade quase nula. Já as curvas referentes aos estados 2 e 3 apresentam um crescimento até à sua estabilização, sendo que o estado 3 estabiliza, naturalmente, num estado superior à curva representante do estado 2. Em relação à probabilidade da rede se encontrar no estado 1, assim como se verificou na Figura 4.19, esta diminui ao longo do tempo até estabilizar.

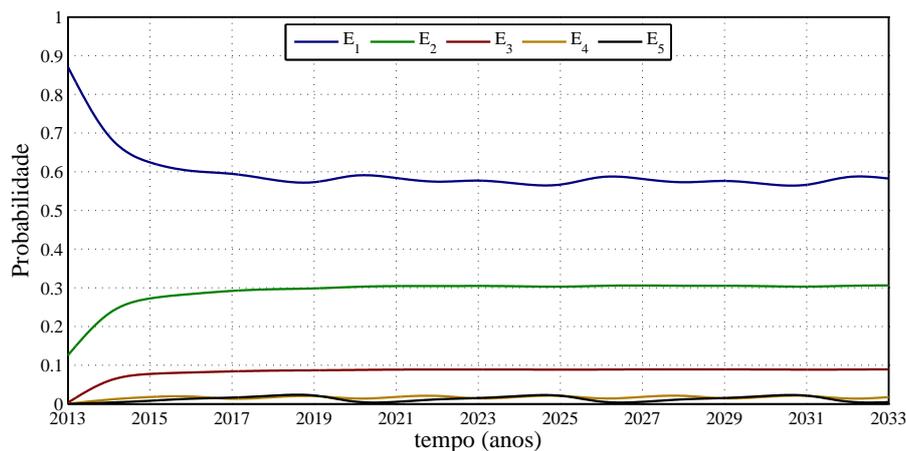


Figura 4.19: Evolução dos estados de condição com aplicação da Estratégia B.

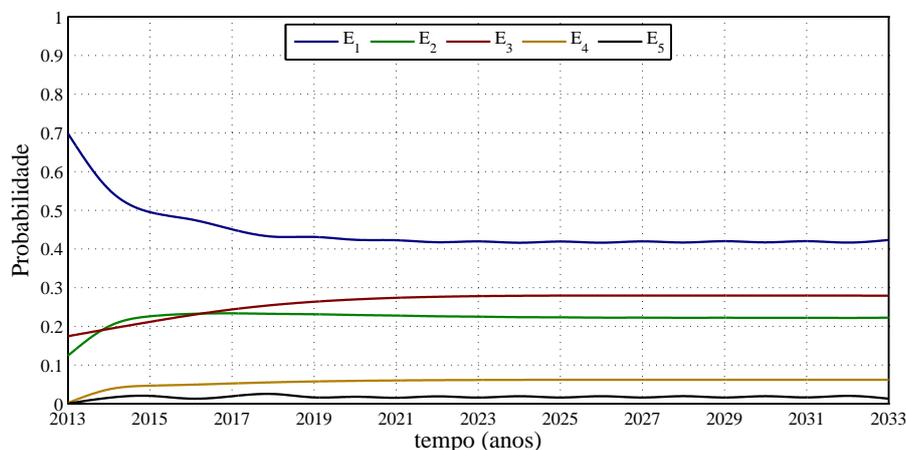


Figura 4.20: Evolução dos estados de condição com aplicação da Estratégia C.

Por último, resta analisar a evolução dos estados de condição quando é aplicada a conservação preventiva. Note-se que esta acção de conservação pode ser explicada, de uma forma simplificada, pelo congelamento do estado de condição durante um certo período de tempo considerado e que seja adequado ao tipo de conservação preventiva aplicado.

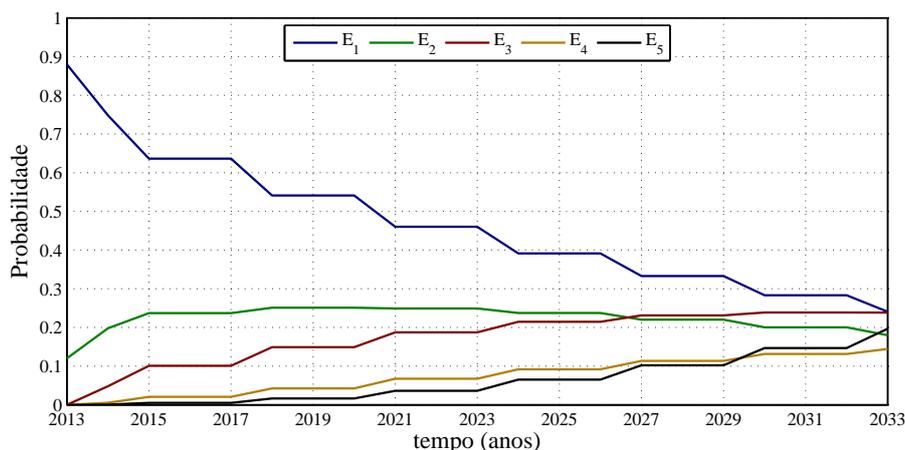


Figura 4.21: Evolução dos estados de condição com aplicação da Estratégia A.

Analisando a Figura 4.21 pode concluir-se que, analogamente à Figura 4.18, a probabilidade da rede se encontrar no estado de condição 5 vai aumentando gradualmente. Já a probabilidade da rede se encontrar no estado 3, 4 e 5 tem uma tendência inicial para aumentar até que ao fim de algum tempo começa a diminuir o seu valor. Como o período de análise para esta acção de conservação foi de apenas 15 anos, só é possível visualizar o que foi afirmado anteriormente para o estado 2. Por último, resta analisar o comportamento do estado de condição 1, que como esperado, evolui sempre de forma decrescente.

4.6 Análise dos custos de aplicação das acções de conservação

Para comparar os diferentes cenários de conservação abordados, é necessário avaliar os custos associados aos mesmos. Nas Figuras 4.13 e 4.16 pode-se concluir que, apesar de nos três casos em que se aplicam acções de conservação o estado de condição ser bastante inferior à situação em que não se efectua conservação do pavimento, na estratégia A obtém-se um estado superior ao das estratégias B e C. Logo, facilmente se assume que as medidas correctivas são mais eficazes. No entanto, devido às restrições orçamentais, não é possível atender apenas às melhorias funcionais mas sim tentar combinar da melhor forma os custos e os benefícios das mesmas. Então, serão agora analisadas, em termos de custos, as estratégias de conservação consideradas.

Primeiramente, é apresentado, nas Tabelas 4.12 e 4.13, um resumo do tipo e número de intervenções efectuadas e o número de secções afectadas pelas mesmas para as três estratégias de conservação estudadas. Sendo que a primeira tabela se refere ao ano zero e a segunda aos restantes anos da previsão.

Tabela 4.12: Tabela de resumo do tipo de intervenções e do número de secções afectadas para o ano 2013.

Conservação correctiva		
Estratégia	Tipo de intervenção	Número de secções
A e B	$EC_3 - EC_1$	4
	$EC_4 - EC_1$	5
	$EC_5 - EC_1$	12
C	$EC_4 - EC_1$	5
	$EC_5 - EC_1$	12

Tabela 4.13: Tabela de resumo do número intervenções e do número de secções afectadas durante o período de previsão.

Estratégia	Conservação correctiva		Estratégia	Conservação preventiva	
	Tipo de intervenção	Nº. de secções		Nº. de intervenções	Nº. de secções
B	$EC_3 - EC_1$	39	A	4	24
	$EC_4 - EC_1$	6			
	$EC_5 - EC_1$	3			
C	$EC_4 - EC_1$	35			
	$EC_5 - EC_1$	3			

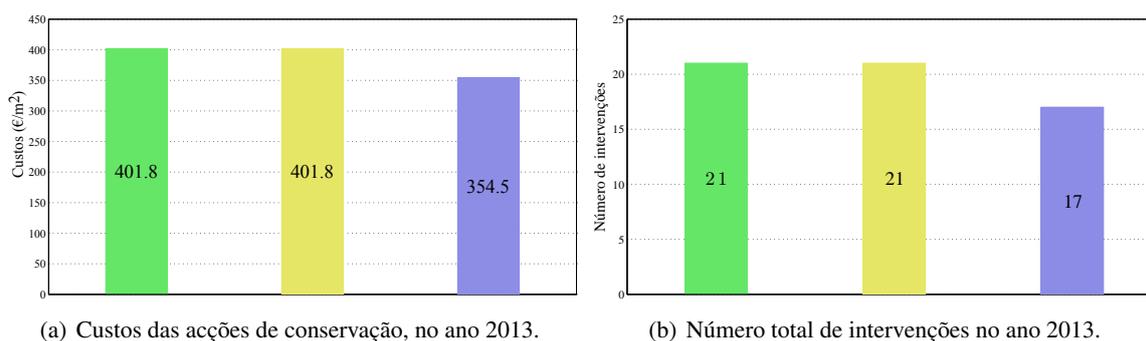
É necessário, agora, estudar os custos associados a cada tipo de estratégia, para o ano 2013 e durante o período de previsão. Considerou-se um custo associado a cada tipo de intervenção tendo em conta a agressividade da mesma, sendo que os valores considerados para cada uma podem ser consultados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Custos associados aos tipos de intervenções [32].

Intervenções	Descrição	Custo (€/m ²)
1	Não fazer nada	0
2	Recuperação superficial	4.45
3	Reforço leve	11.81
4	Reforço médio	18.87
5	Reforço forte	21.68

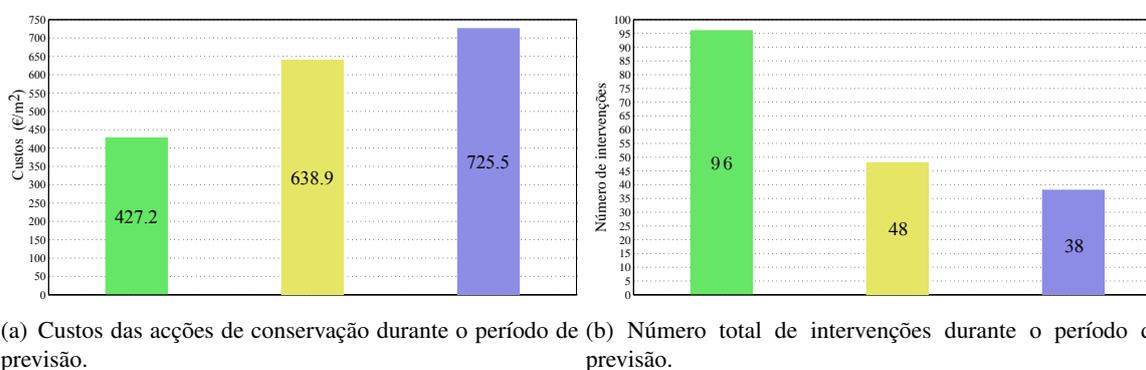
É importante referir, ainda, que os custos finais apresentados neste trabalho para as acções de conservação não incluem a taxa de actualização, uma vez que o que se pretende é comparar as estratégias de conservação utilizadas de forma a compreender qual terá custos mais elevados e mais baixos, não interessando apresentar os custos finais das respectivas acções.

4.6. ANÁLISE DOS CUSTOS DE APLICAÇÃO DAS ACÇÕES DE CONSERVAÇÃO



■ Estratégia A; ■ Estratégia B; ■ Estratégia C;

Figura 4.22: Ilustração dos custos e do número de intervenções das acções de conservação na data de início.



■ Estratégia A; ■ Estratégia B; ■ Estratégia C;

Figura 4.23: Ilustração dos custos e do número de intervenções das acções de conservação para um horizonte de 20 anos.

Tabela 4.15: Custo total das estratégias de conservação.

Estratégia	Custo Total (€/m²)
A	829.0
B	1040.6
C	1080.0

Na Figura 4.22 pode observar-se que, para as estratégias consideradas no presente trabalho, na data de início da previsão, a estratégia de conservação com custos mais baixos é a estratégia C, 354.5 €/m², que também é a estratégia que coincide com o número de intervenções mais baixo, 17. As estratégias de conservação A e B têm ambas o mesmo custo, 401.8 €/m², e o mesmo número de intervenções iniciais, 21, uma vez que na data de início se adoptou a mesma estratégia de conservação para ambas. Isto prende-se com o facto de as estratégias A e B incidirem sobre as secções que têm um estado médio

superior a 3 e a estratégia C incidir, apenas, nas secções que se encontram num estado médio superior a 4. Apesar de as duas primeiras terem custos mais elevados, no ano 2013, permitem um estado médio da rede de 1.12 que é menor que o estado médio obtido através da estratégia de conservação C, 1,47.

Pela Figura 4.23(a) pode concluir-se que do ponto de vista dos custos de conservação a estratégia A é a mais rentável e a estratégia C é a mais dispendiosa. Esta conclusão já era esperada uma vez que no capítulo 2 foi visto que a conservação preventiva, quando aplicada no devido tempo, implica custos mais baixos. Contudo, como se pode observar através da Figura 4.23(b), quanto menos agressiva for a acção de conservação mais vezes tem que ser aplicada, uma vez que a técnica utilizada não permite um melhoramento do pavimento a longo prazo. Apesar disso, a estratégia A, como é aplicada em curtos períodos de tempo, não permite que o pavimento degrade muito o seu estado e, devido ao seu custo reduzido, mesmo tendo que ser aplicada 96 vezes durante o período de previsão, tem um custo de 427.2 €/m² que ainda está bastante longe do valor da estratégia C mais branda, 725.5 €/m².

Observando a Tabela 4.15 nota-se a discrepância de custos entre a estratégia A e as restantes. O que, no caso deste trabalho, permite concluir que a estratégia A é a que melhor se adapta ao modelo utilizado. Pois permite estados de condição relativamente baixos e custos muito menores.

É então perceptível que desde o momento em que se conclui a construção de um pavimento, se deve ter logo a preocupação de o conservar. No caso em estudo, se for estipulado um plano de conservação preventiva os custos de aplicação da mesma irão ser muito menores do que qualquer outra medida adoptada.

Neste caso, como se verificou, se não houver nenhum plano de conservação e o pavimento se degradar até um estado em que já não seja rentável a aplicação da conservação preventiva terá que se utilizar uma técnica mais agressiva que, conseqüentemente, irá implicar custos mais elevados.

No entanto, a avaliação de estratégias também deve atender aos custos de utilizador, o que não foi possível introduzir nesta análise e que poderá afectar a comparação entre as estratégias consideradas. Tendo em conta que cada estratégia tem um estado médio ao longo do tempo e final diferentes, isso poderá ser um dos factores a influenciar os custos de utilizador.

Capítulo 5

Considerações finais

5.1 Conclusões

A principal preocupação da presente dissertação prendeu-se com o desenvolvimento de um modelo probabilístico de previsão do desempenho de uma rede de estradas, tendo como suporte uma base de dados real relativa a inspecções visuais. O modelo de previsão teve como base os processos de decisão de Markov. De forma a melhorar o desempenho do pavimento foram aplicadas acções de conservação com o intuito de observar a sua influência no atraso da progressão do fendilhamento ao longo do tempo.

O estudo da previsão do desempenho de pavimentos pode ser efectuado com recurso a modelos determinísticos ou probabilísticos. Contudo, o fendilhamento é um tipo de degradação que acarreta muita incerteza associada à sua evolução. Tendo os métodos probabilísticos mecanismos que contabilizam essa incerteza, a sua utilização nesta temática torna-se muito vantajosa.

A utilização de modelos probabilísticos, mais especificamente das cadeias de Markov, requer a quantificação do fendilhamento em estados de condição. Assim, torna-se imperativo utilizar uma base de dados para elaborar a previsão futura de uma rede de pavimentos. A base de dados utilizada no desenvolvimento do presente trabalho apresenta dados que permitem calcular o coeficiente de fendilhamento, tendo sido utilizado o mesmo método que a EP utiliza para definir esse índice. Este método permite definir estados de condição para cada secção.

A metodologia utilizada permite obter matrizes probabilísticas para intervalos de tempo entre inspecções periódicos (tempo discreto) e para intervalos de tempo diferentes (tempo contínuo). Estas matrizes servem de base para o estudo do desempenho futuro dos pavimentos rodoviários, permitindo perceber a evolução média do seu estado de condição durante um período de tempo definido.

É importante referir a optimização da verosimilhança realizada. Esta revelou-se de grande importância uma vez que, como foi mostrado, permitiu encontrar uma matriz probabilística P que se aproxima mais da realidade e, assim, permite reproduzir de forma mais correcta a previsão do estado de condição médio da rede.

Ao efectuar o cálculo do tempo de permanência conseguiu-se obter, graficamente, a evolução do fendilhamento ao longo do tempo em função do estado de condição. Isso permitiu comprovar a

fiabilidade do método utilizado uma vez que foi possível comparar os resultados encontrados neste trabalho com referências bibliográficas, sendo que os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

Verificou-se, também, que ao efectuar a previsão do desempenho futuro de uma rede rodoviária torna mais fácil a elaboração de estratégias de conservação, pois permite mais facilmente estimar o tipo e o número de aplicações das acções de conservação e avaliar o estado da rede ao longo do tempo.

Por último, mesmo que de forma simplificada, foi possível estimar o custo associado a alguns tipos de estratégias de conservação. Conclui-se, de maneira bastante satisfatória, que ao aplicar-se acções de conservação desde muito cedo, em vez de deixar o pavimento chegar a estados de degradação bastante avançados, reduz drasticamente os custos despendidos em intervenções de conservação.

Em suma, o trabalho efectuado revelou-se de grande relevância para a gestão de pavimentos, uma vez que o programa desenvolvido, no *software MATALAB R2010a*, pode ser adaptado a qualquer rede de estradas sobre a qual se queria efectuar uma previsão do desempenho. Sendo, ainda, possível simular estratégias de conservação a aplicar à rede de forma a perceber de que forma irão afectar a evolução futura das degradações. Existe, então, uma grande potencialidade deste tipo de medidas como ferramenta para os SGP, embora seja possível melhorar, encontrando-se na secção seguinte algumas sugestões.

5.2 Perspectivas para desenvolvimentos futuros

Como continuação deste estudo sugere-se a aplicação das metodologias utilizadas no presente trabalho às restantes degradações dos pavimentos, sendo recomendada a utilização de uma base de dados com um leque de secções mais vasto. Seria, também, de grande utilidade definir os estados de condição através de mais parâmetros uma vez que o coeficiente de fendilhamento apenas contabiliza a área fendilhada e, como foi visto no capítulo 2, é possível contabilizar o fendilhamento através do comprimento da fenda e da dimensão da sua abertura.

Um outro aspecto que se encontra directamente relacionado com o desenvolvimento desta dissertação é a durabilidade das técnicas de conservação. Em Portugal, existem poucos dados referentes a esta temática pelo que seria de grande utilidade a elaboração de um estudo aprofundado, com recolha de dados de concessionárias nacionais, a fim de elaborar um documento detalhado para consulta.

Com a finalidade de melhorar a comparação entre estratégias de conservação, deviam ser avaliados os custos de utilizador que dependem directamente do estado em que o pavimento se encontra e que afectam os custos das estratégias de conservação.

Uma outra análise importante a realizar será a de optimização dos custos. Em que, através da análise das estratégias de conservação consideradas com base num modelo de previsão, é possível avaliar os seus custos e benefícios. Para isso terá que se cruzar os dados relativos aos custos e os referentes aos tempos de aplicação das acções de conservação de forma a encontrar o valor de custo mais baixo mas que seja, de certa forma, aceitável do ponto de vista do desempenho dos pavimentos.

Existem outros métodos probabilísticos de previsão do desempenho futuro de pavimentos rodoviários. Dentro dos processos de Markov existem, para além dos utilizados na presente dissertação, os processos de Markov não homogéneos no tempo. Existem, ainda, métodos que avaliam uma dada degradação

através de uma regressão logística simples utilizando uma regressão com uma ou mais variáveis explicativas, como acontece nos modelos do tipo Probit e Logit.

Bibliografia

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. *Pavement Management Guide*, 2001. Washington, D.C.
- [2] Antunes, L. *Eficiência e Durabilidade de Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos*. http://www.lnec.pt/organizacao/dnir/acursoCRPR/selecao_tecnicas_anexo.pdf).
- [3] Antunes, L. *Conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários: Selecção de técnicas de conservação e reabilitação de pavimentos*. Curso Fundec/Lnec, 2005. LNEC.
- [4] Antunes, L., Baptista, F. e Fontul, S. *Conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários: Exigências funcionais e estruturais de pavimentos rodoviários*. Curso Fundec/Lnec, 2005. LNEC.
- [5] Asphalt Paving Association of Iowa. *Chapter 7, Pavement Management*. http://www.apai.net/cmdocs/apai/designguide/Chapter_7B.pdf.
- [6] Association Internationale Permanente des Congres de la Route. *Dictionnaire Technique Routier*. UNESCO, 1990.
- [7] Bekheet, W., Helali, K., Li, Y., Cheetham, A., and Stanciu, D. *Comparison between Probabilistic and Deterministic Pavement Management Analysis: A Case Study for Arizona DOT*. 7th International Conference on Managing Pavement Assets, 2008.
- [8] Caroff, G., Layerle, E., Caignec, H., and Spagnol, A. *Manuel de conception des chaussées d'autoroutes*. Scetauroute, direction technique, 1994.
- [9] Daleiden, J. *Evaluation of the AASHTO Design Equations and Recommended Improvements*. Strategic Highway Research Program, 1994.
- [10] Delaware T2 Center, University of Delaware. *Flexible Pavement Maintenance and Repair Techniques*. www.ce.udel.edu/dct/T2/T2TechnicalBriefs/Tech%20Topic%20-%20Streets%20-%20Pavement%20Maintenance.pdf.
- [11] Encyclopedia.com. *Markov, Andrei Andreevich*, 2008. <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830902828.html>.
- [12] Estradas de Portugal. *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários. Vol. 2, Gestão da Conservação*, 2008. Almada.
- [13] Estradas de Portugal. *Sistema de Gestão de Pavimentos. Manual de Utilização*, 2009. Almada.

- [14] Federal Highway Administration. *Pavement Distress Identification Manual*, 2006-2009. NPS Road Inventory Program.
- [15] Hicks, G., Seeds, S., and Peshkin, D. *Selecting a Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements*. Washington State Department of Transportation, 2000.
- [16] Higham, D. and Higham, N. *MATLAB Guide*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.
- [17] Jackson, C. Multi-state models for panel data: The msm package for R. *Journal of Statistical Software*, 38(8), 2011.
- [18] Júnior, D. and Júnior, V. *Conceitos e Simulação de Cadeias de Markov*. Universidade Federal de Goiás. Brasil.
- [19] Johnson, A. and Snopl, P. *Best Practices Handbook on Asphalt Pavement Maintenance*. Minnesota Technology Transfer Center / LTAP Program Center for Transportation Studies, University of Minnesota, 2000.
- [20] Kalbfleisch, J. and Lawless, J. The analysis of panel data under a markov assumption. *Journal of the American Statistical Association*, 80(392):863–871, 1985.
- [21] Li, Z. *A probabilistic and adaptive approach to modeling performance of pavement infrastructure*. Master's thesis, University of Texas.
- [22] Litzka, J., Leben, B., La Torre, F., Weninger-vycudil, A., Antunes, M., Kokot, D., Mladenovic, G., Brittain, S. and Viner, H. *The way forward for pavement performance indicators across Europe, Final Report*. European cooperation in the field of scientific and technical research, Julho 2008. www.cost.esf.org.
- [23] Meneses, S. and Ferreira, A. *Implementação de um Sistema de Gestão da Conservação de Pavimentos para o Município de Oliveira do Hospital*. IV Congresso Rodoviário Português, 2006.
- [24] N. D. Lea International Ltd. *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4*, 1995. RETA 5549-REG Highway Development and Management Research.
- [25] Nebraska Department of Roads. *Pavement Maintenance*, 2002.
- [26] Neves, L. and Frangopol, D. Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges. *Reliability Engineering and System Safety*, 89(2):185–198, 2005.
- [27] Ng, S.K. and Moses, F. Bridge deterioration modeling using semi-markov theory. *Structural Safety and Reliability*, 14(3):342–351, 1998.
- [28] OCDE. *Infrastructure*. www.oecd.org/sti/transport/roadtransportresearch/1859501.pdf.
- [29] Ontario Hot Mix Producers Association. *The ABCs of Pavement Preservation*. <http://www.asphaltinstitute.org/dotAsset/8e8c07c3-9ef9-4214-b2aa-adf48c5aa79d.pdf>, 2004.
- [30] Ortiz-García, J., Costello, S., , and Snaith, M. Derivation of transition probability matrices for pavement deterioration modeling. *Journal of Transportation Engineering*, 132(2):141–161, 2006.

- [31] Pereira, P. and Miranda, V. *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Universidade do Minho, Braga, 1999.
- [32] Picado-Santos, L., Ferreira, A., Pereira, F., and Azevedo, M. *A avaliação de estratégias no âmbito do sistema de gestão de pavimentos da EP*. IV Congresso Rodoviário Português, 2006.
- [33] Privault, N. *Notes on Markov Chains*. <http://www.ntu.edu.sg/home/nprivault/MAS328/MAS328.pdf>, 2012.
- [34] Quaresma, L. *Dimensionamento de Pavimentos Novos, Conservação e Reforço de Antigos Pavimentos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1989. Lisboa.
- [35] Quaresma, L. *Apontamentos de transportes*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [36] Ramalho, A. *Novos Desafios para a Actividade Rodoviária - Novo Paradigma da Estradas de Portugal*. 7º Congresso Rodoviário Português, 2013. Lisboa.
- [37] Schacke, I. and Iarsen, H. *Pavement maintenance management systems in OECD countries*. 2nd North American Pavement Management Conference, 1987. Canada.
- [38] Silva, R. *Contribuição para o desenvolvimento de modelos de previsão de fendilhamento de pavimentos rodoviários*. Master's thesis, FCT-UNL.
- [39] Smadi, O., Hans, Z., and Maze, T. *Iowa Pavement Management Program Database: Integration and Delivery*. Centre for Transportation Research and Education, 1999.
- [40] Smith, K. and Romine, A. *Materials and Procedures for Sealing and Filling Cracks in Asphalt-Surfaced Pavements*. Strategic Highway Research Program, 1993.
- [41] Sobreiro, F. *Modelos de Previsão de Deterioração de Pontes Existentes: Processos de Markov*. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [42] Stewart, W. *Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation: The Mathematical Basis of Performance Modeling*. Princeton University Press, 2009.
- [43] Surendrakumar, K., Prashant, N., and Mayuresh, P. Application of markovian probabilistic process to develop a decision support system for pavement maintenance management. *International Journal of Scientific e Technology Research*, 2(8):225–303, 2013.
- [44] Universidade de Lisboa. *Andrei Andreyevich Markov*. <http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2002/icm105/markov.htm>.
- [45] Vitillo, N. *Pavement Management Systems Overview*. Department of Transportation. New Jersey.
- [46] Yang, J. *Road Crack Condition Performance Modeling Using Recurrent Markov Chains And Artificial Neural Networks*. Master's thesis, University of south Florida.

Anexo A

Inventário utilizado no desenvolvimento do trabalho

Tabela A.1: Inventário das secções disponibilizadas com os respectivos estados de condição obtidos

Secção	Extensão [m]	Largura [m]	Última conservação (Estado 1)	Estados de Condição			
				Insp. 2003	Insp. 2007	Insp. 2010	Insp. 2012
1	19,728	8,65	2000	1	2	4	5
2	15,518	6,00	2001	1	3	3	4
3	7,509	6,03	2000	1	2	3	3
4	9,538	6,00	2002	1	2	5	5
5	16,195	6,01	1999	1	1	2	2
6	9,951	9,61	2000	1	2	4	4
7	6,695	6,04	2002	1	2	3	5
8	8,298	6,17	1999	1	1	2	2
9	2,804	7,59	1993	2	4	4	4
10	4,300	6,00	1995	1	2	3	3
11	14,065	6,20	1996	3	5	2	2
12	5,556	7,04	1990	1	5	4	2
13	11,167	6,02	1995	2	1	3	4
14	2,733	6,00	2002	1	3	5	5
15	11,578	7,34	1997	1	3	3	3
16	7,430	7,16	1997	1	2	3	3
17	7,208	6,00	1995	2	3	3	4
18	3,810	5,00	1990	1	1	1	2
19	18,660	6,00	2001	1	2	4	5
20	4,521	7,00	1994	3	4	5	5
21	2,723	6,00	1995	3	2	4	5

Tabela A.2: Inventário das secções utilizadas com os respectivos estados de condição obtidos

Secção	Extensão [m]	Largura [m]	Última conservação (Estado 1)	Estados de Condição			
				Insp. 2003	Insp. 2007	Insp. 2010	Insp. 2012
1	19,728	8,65	2000	1	2	4	5
2	15,518	6,00	2001	1	3	3	4
3	7,509	6,03	2000	1	2	3	3
4	9,538	6,00	2002	1	2	5	5
5	16,195	6,01	1999	1	1	2	2
6	9,951	9,61	2000	1	2	4	4
7	6,695	6,04	2002	1	2	3	5
8	8,298	6,17	1999	1	1	2	2
9	2,804	7,59	1993	2	4	4	4
10	4,300	6,00	1995	1	2	3	3
11 _A	14,065	6,20	1996	3	5	-	-
11 _B	14,065	6,20	1996	-	-	2	2
12	5,556	7,04	1990	1	5	-	-
13 _A	11,167	6,02	1995	2	-	-	-
13 _B	11,167	6,02	1995	-	1	3	4
14	2,733	6,00	2002	1	3	5	5
15	11,578	7,34	1997	1	3	3	3
16	7,430	7,16	1997	1	2	3	3
17	7,208	6,00	1995	2	3	3	4
18	3,810	5,00	1990	1	1	1	2
19	18,660	6,00	2001	1	2	4	5
20	4,521	7,00	1994	3	4	5	5
21 _A	2,723	6,00	1995	3	-	-	-
21 _B	2,723	6,00	1995	-	2	4	5