

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

**Modelos de Previsão de Deterioração de Pontes Existentes:
Processos de Markov**

Por

Filipe José Nogueira Sobreiro

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Luís Armando Canhoto Neves

Lisboa

2011

Agradecimentos

Ao professor Luís Canhoto Neves, pela partilha de conhecimentos e pela constante disponibilidade em ajudar nas inúmeras dificuldades, que foram surgindo ao longo da elaboração da dissertação.

À Susana, pelo constante apoio prestado e por toda a paciência em suportar os meus momentos mais desgastantes e de maior pressão.

À minha família, por tudo o que têm feito por mim durante toda a vida e, porque sem eles, não teria sido possível atingir esta importante etapa.

Aos meus amigos, tanto aos que não estão ligados à engenharia civil, como aos que me acompanharam de perto na difícil caminhada que é frequentar este curso superior. Os momentos de camaradagem, descontração e amizade revelaram-se essenciais para a elaboração deste árduo trabalho.

Resumo

Nas últimas décadas, em grande parte dos países desenvolvidos, foi realizado um forte investimento na construção de infra-estruturas, nomeadamente pontes. Porém, grande parte destas estruturas apresentam actualmente sinais claros de deterioração, pelo que se torna fundamental investir na correcta gestão na manutenção das mesmas. Esta gestão é realizada com o auxílio de sistemas de gestão de pontes, que se encontram em constante aperfeiçoamento. Neste estudo, foram descritas as características destas ferramentas e exemplificados alguns dos actuais sistemas existentes.

O trabalho elaborado no âmbito desta dissertação, consiste fundamentalmente em desenvolver um modelo de previsão de deterioração futura de pontes existentes, recorrendo a processos de Markov. Esta metodologia é feita num âmbito probabilístico e para desenvolver o modelo, recorre a dados estatísticos de pontes semelhantes às que se pretendem analisar. Estes dados, dizem respeito a inspecções visuais realizadas às estruturas (estados de condição).

A evolução na deterioração pode ser controlada se forem planeadas intervenções de manutenção às estruturas da rede. Essas intervenções podem ser de carácter preventivo, adiando a deterioração, ou de carácter correctivo, melhorando o estado de condição. Foi estudada a influência de duas acções de manutenção numa rede viária de pontes: tratamento com silano (preventiva) e a acção de substituição (correctiva). Optimizaram-se estratégias de actuação destas acções por algoritmos genéticos e verificou-se, que na maioria das situações, a decisão de combinar as duas acções representa a melhor opção a tomar.

Palavras chave: Sistemas de gestão de pontes; processos de Markov; deterioração; inspecções; acções de manutenção; custos; algoritmos genéticos; optimização

Abstract

In the last decades, in most of the developed countries, a strong investment was made in creating infrastructures, including bridges. However, nowadays most of these structures show clear signs of deterioration, becoming essential to invest in a proper management of their maintenance. This management is accomplished with the aid of bridge management systems, that are constantly being improved. In this study, characteristics of these tools were described and some examples of the existing systems were exposed.

The work made in this dissertation, is primarily to develop a predicting model of further deterioration of existing bridges, using Markov processes. This methodology is a probabilistic framework and to develop the model, it is used statistical data of bridges similar to those that we pretend to analyze. This data, refers to visual inspections carried out for the structures (condition states).

The evolution in the deterioration can be controlled if maintenance actions planned to network structures were made. These actions, can be preventive, delaying the deterioration, or corrective, improving the condition state. It was also studied the influence of two maintenance actions on an highway bridges: treatment with silane (preventive) and replacement action (corrective). Maintenance strategies were optimized using genetic algorithms and it was verified that, in most situations, the decision to combine the two maintenances actions represents the best solution to take.

Keywords: Bridge management systems; Markov processes; deterioration; maintenance actions; costs; genetic algorithms; optimization

Simbologia e notações

Δt intervalo de tempo

Δt de actualização intervalo de tempo entre a data da última inspecção e a aplicação do modelo de deterioração

Δt_a intervalo de tempo entre aplicações de acções de manutenção

Δt_i intervalo de tempo cujo estado inicial entre observações é i

θ_i taxa probabilística de transição entre estados consecutivos

i taxa de inflação

m ordem superior a 1 de uma matriz markoviana

n número de intervalos de tempo Δt

n_i número de pontes cujo estado inicial é i

n_{ij} número de pontes que transitaram do estado i para o estado j

$p(t)$ vector probabilidades de estados de condição num determinado instante t

q razão de uma progressão geométrica

r taxa de desconto

t_{da} tempo de duração da aplicação da acção de manutenção

t_f instante final de tempo

t_i instante inicial de tempo

t_{pa} instante de tempo referente à primeira aplicação da acção de manutenção

t_m instante de tempo da aplicação do modelo de deterioração

t_n taxa de desconto nominal

- t_r taxa de desconto real
- t_{ui} instante de tempo da última inspeção realizada
- C_0 valor presente do custo total
- C_{alvo} estado de condição para o qual se pretende reabilitar a estrutura
- $C_{med}(t)$ estado de condição médio num determinado instante t
- C_{reab} estado de condição a partir do qual se reabilita a estrutura
- C_t valor do custo no instante t
- FD factor de desconto
- M número total de intervalos de tempo Δt
- N número total de pontes
- P matriz probabilística de Markov
- P_{ii} probabilidade de permanência no estado i
- P_{ij} probabilidade de transição do estado i para o estado j
- Q matriz intensidade
- T horizonte de tempo
- T_a número de anos necessários para que um conjunto de pontes transite de um determinado estado para o seguinte, segundo a opinião de peritos
- T_i tempo médio de permanência num estado de condição i antes de transitar para o estado seguinte
- V verosimilhança

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Simbologia e notações	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Generalidades e enquadramento	1
1.2 Objectivos	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Sistemas de Gestão de Pontes	5
2.1 Introdução	5
2.2 Sistemas de gestão de pontes e seus componentes	7
2.2.1 Componentes de um sistema de gestão de pontes	8
2.2.1.1 Inventário	8
2.2.1.2 Modelo de custos e deterioração	10
2.2.1.3 Modelo de optimização	12
2.2.1.4 modelo de actualização	13
2.3 Exemplos de sistemas de gestão de pontes	13

2.3.1	PONTIS	13
2.3.2	BRIDGIT	14
2.3.3	FinnRABMS	15
2.3.4	KUBA	16
2.3.5	DANBRO	16
2.3.6	GOA	19
2.4	Conclusões	20
3	Previsão do Desempenho	21
3.1	Introdução	21
3.2	Tipos de modelos de deterioração	21
3.3	Processos estocásticos: cadeias de Markov	22
3.4	Processos de Markov em tempo discreto	26
3.4.1	Estimativa da matriz probabilística de Markov P	26
3.4.2	Previsão do desempenho	27
3.5	Processo de Markov em tempo contínuo	31
3.5.1	Modelo de deterioração	32
3.5.1.1	Estimativa da matriz intensidade Q	33
3.5.1.2	Eficiência do modelo	39
3.5.1.3	Estimativa do tempo de permanência nos vários estados de condição	42
3.5.1.4	Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo	43
3.5.1.5	Aplicação do modelo de deterioração a uma rede de pontes	45
3.6	Conclusões	50
4	Efeito das Acções de Manutenção	53
4.1	Introdução	53
4.2	Tipos de acções de manutenção	53
4.2.1	Manutenção preventiva baseada no tempo	54
4.2.2	Manutenção correctiva baseada no tempo	57
4.2.3	Manutenção correctiva baseada no estado	60
4.3	Aplicação de acções de manutenção à rede viária	61
4.3.1	Análise à evolução do estado de condição médio	62
4.3.2	Análise à evolução dos diversos estados de condição	64
4.3.3	Custos das acções de manutenção durante o ciclo de vida	67
4.3.3.1	Análise dos custos de acções de manutenção aplicados à rede de pontes	69
4.4	Conclusões	72
5	Optimização de Estratégias de Manutenção	75

<i>ÍNDICE</i>	xi
5.1 Introdução	75
5.2 Algoritmos genéticos	75
5.3 Definição do problema de optimização	77
5.4 Análise dos resultados obtidos	78
5.5 Conclusões	83
6 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	85
6.1 Conclusões	85
6.2 Desenvolvimentos futuros	88
A Inventário utilizado na elaboração do modelo de deterioração	93
Bibliografia	101

Índice de Figuras

1.1	Fases do ciclo de vida de uma ponte. Baseado em Ryall (2001)	2
2.1	Colapso da Silver Bridge, 1967 (West Virginia Division of Culture and History, n.d)	6
2.2	Organização geral de um sistema de gestão de pontes (Poças, 2009)	8
2.3	Pormenor de uma estrutura em 3D com detecção de anomalias identificadas directamente pelo KUBA (Hajdin, 2008)	17
2.4	Estrutura do GOA (Santiago, 2005)	20
3.1	Andrei Markov (Infopédia. Porto Editora, 2003-2011)	22
3.2	Exemplo da deterioração de uma ponte ao longo de 80 anos	31
3.3	Estimativa do tempo de permanência em cada estado de condição	43
3.4	Evolução de P_{ij} para estado de condição inicial 1	43
3.5	Evolução de P_{ij} para estado de condição inicial 2	44
3.6	Evolução de P_{ij} para estado de condição inicial 3	44
3.7	Evolução de P_{ij} para estado de condição inicial 4	44
3.8	Previsão do desempenho da rede de pontes	50
4.1	Deterioração associada a manutenção preventiva baseada no tempo	54
4.2	Deterioração de uma ponte ao longo do tempo	55
4.3	Deterioração da ponte associada ao cenário de manutenção A1	55
4.4	Deterioração da ponte associada ao cenário de manutenção A2	57
4.5	Deterioração associada a manutenção correctiva baseada no tempo	57
4.6	Deterioração da ponte associada ao cenário de manutenção A3	58
4.7	Deterioração da ponte associada ao cenário de manutenção A4	59

4.8	Deterioração da ponte associada aos cenários de manutenção A5 e A6	61
4.9	Deterioração média da rede de pontes sem acções de manutenção e com aplicação separada dos cenários Silano e Substituição	62
4.10	Deterioração média da rede de pontes sem acções de manutenção e com aplicação da combinação dos cenários de manutenção de Silano e Substituição	64
4.11	Evolução das probabilidades de estados de condição sem intervenção de acções de manutenção	65
4.12	Evolução das probabilidades de estados de condição com aplicação da acção de manutenção de silano	65
4.13	Evolução das probabilidades de estados de condição com aplicação da acção de manutenção de substituição	66
4.14	Evolução das probabilidades de estados de condição com aplicação da combinação das acções de manutenção de silano e substituição	66
4.15	Variação do factor de desconto ao longo do tempo	68
4.16	Custos acumulados ao longo do tempo relativamente à acção de manutenção silano	70
4.17	Custos acumulados ao longo do tempo relativamente à acção de manutenção de substituição	71
4.18	Custos acumulados ao longo do tempo relativamente à combinação de acções de manutenção de silano e substituição	72
5.1	Custos totais descontados para as diversas estratégias de manutenção	79
5.2	Ilustração da deterioração média sem acções de manutenção e com a aplicação as estratégias de manutenção A1,A2 e A3	81
5.3	Ilustração da deterioração média sem acções de manutenção e com a aplicação das estratégias de manutenção B1,B2 e B3	81
5.4	Ilustração da deterioração média sem acções de manutenção e com a aplicação das estratégias de manutenção C1,C2 e C3	82
5.5	Ilustração da deterioração média sem acções de manutenção e com a aplicação das estratégias de manutenção D1,D2 e D3	83

Índice de Tabelas

2.1	Exemplo de classificação da deterioração de um elemento em aço com sistema de pintura (Kelley, 2007)	11
3.1	Exemplos de alguns intervalos de tempo para $q = 2$	28
3.2	Previsão do estado da ponte ao longo de 20 anos	29
3.3	Exemplo de uma ponte com quatro inspecções	34
3.4	Divisão da Ponte A da Tabela 3.3 em duas pontes	34
3.5	Exemplo de uma ponte com três inspecções	34
3.6	Divisão da Ponte B da Tabela 3.5 em duas pontes	34
3.7	Exemplo de pontes pertencentes ao inventário utilizado para a elaboração do modelo de deterioração (Anexo A)	35
3.8	Exemplo de duas pontes do inventário com respectivas inspecções e intervalos de tempo	37
3.9	Lista de pontes em que foi aplicado o modelo de deterioração	46
3.10	Exemplo de duas pontes da Tabela 3.9	47
4.1	Cenários associados a manutenções preventivas baseadas no tempo	55
4.2	Cenários associados a manutenções correctivas baseadas no tempo	58
4.3	Cenários associados a manutenções correctivas baseadas no estado	60
4.4	Cenários de manutenção aplicáveis à rede de pontes	62
4.5	Custos acumulados totais referentes aos diversos cenários de manutenção	72
5.1	Cenários de manutenção utilizados na optimização uni-objectivo	78
5.2	Resultados das variáveis de optimização e do custo total acumulado para diferentes estratégias de manutenção	79

A.1 Inventário com classificações atribuídas a pontes obtidas na realização de ins-
pecções 93

Capítulo 1

Introdução

1.1 Generalidades e enquadramento

As pontes são estruturas que permitem efectuar a ligação entre pontos separados por meios aquáticos, facilitando o acesso de pessoas, veículos rodoviários e ferroviários e canalizações. Quando separados por meios secos, tomam a designação de viadutos. O projecto de uma ponte varia de acordo com a sua função, com as condições geológicas e ambientais onde a ponte venha a ser construída, com os tipos de materiais a aplicar e com os recursos financeiros disponíveis para a construção (Ryall, 2001).

Todavia, quaisquer que sejam os materiais aplicados ou a solução estrutural adoptada, os sinais de degradação tanto a nível de aparência como a nível de segurança, mais cedo ou mais tarde acabam por emergir. Existem inúmeros factores que podem contribuir para essa degradação, como os tipos de materiais utilizados, a qualidade da construção, o dimensionamento estrutural, a intensidade de tráfego a que a ponte está sujeita e problemas naturais relacionados com o meio ambiente, erosão, sismos ou cheias (Ryall, 2001).

Para além disso, a evolução no campo da modelação de estruturas e a cada vez melhor optimização do dimensionamento estrutural, fez com que se construíssem pontes com coeficientes de segurança cada vez mais baixos. Esta evolução na engenharia, resulta em pontes de última geração com uma tendência muito maior para evidenciar deterioração do que, por exemplo, pontes de alvenaria construídas há alguns séculos (Neves, 2005).

No entanto, o estado de condição das pontes deve permanecer dentro de limites aceitáveis ao longo da sua vida útil. A importância da durabilidade e conservação das pontes, acompanhada pela crescente expansão do sector da reabilitação e reforço estrutural, tem-se vindo a acentuar nos últimos tempos (Neves, 2005). O impacte económico e social que obras de arte de tal envergadura representam num país, exige uma cuidada abordagem a

soluções que visem uma correcta gestão ao longo dos seus ciclos de vida (Figura 1.1). As pontes representam o tipo de infra-estruturas de maior peso económico numa rede viária rodoviária, significando cerca de metade do valor patrimonial (PIARC, 2004).

Segundo Woodward *et al.* (2001), os principais objectivos da gestão de pontes por ordem de importâncias são as seguintes:

1. Garantir a segurança de todos os utilizadores da rede viária e de terceiros;
2. Assegurar um determinado nível de serviço de cada ponte;
3. Assegurar a conservação do património a longo prazo.

Deste modo, para uma correcta gestão, é crucial que o destino das verbas disponíveis a operações de manutenção seja feito de forma optimizada e consciente. Esta gestão, é feita cada vez mais recorrendo a sistemas de gestão de pontes, que auxiliam os responsáveis pela tomada de decisões no que diz respeito às acções de manutenção deste tipo de obras. Essas acções de manutenção, procuram atrasar a deterioração da ponte ou melhorar o seu estado de condição (Neves, 2005).

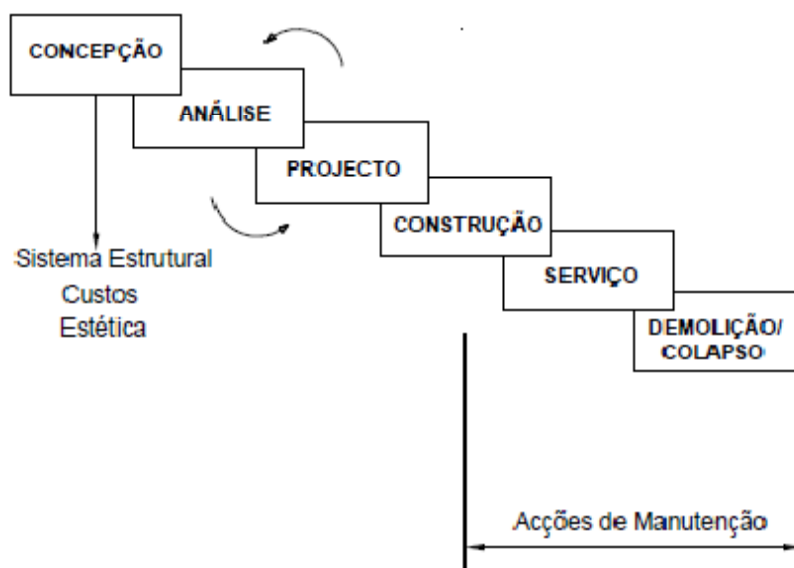


Figura 1.1: Fases do ciclo de vida de uma ponte. Baseado em Ryall (2001)

Para uma adequada gestão de uma rede viária, é fundamental prever o desempenho futuro das respectivas pontes. Se o gestor de pontes tiver na sua posse dados credíveis sobre o futuro estado de condição das pontes e dos seus elementos, pode compreender a evolução da degradação que as estruturas irão sofrer ao longo dos respectivos ciclos de vida, permitindo-lhe tomar decisões mais consistentes e fundamentadas.

Desde há alguns anos, técnicas matemáticas têm vindo a ser introduzidas nos sistemas de gestão de modo a permitir a modelação da deterioração futura das pontes. Esta modelação é feita num âmbito probabilístico, permitindo para qualquer intervalo de tempo estimar as probabilidades dos vários cenários de condição das estruturas (Neves, 2005, 2008). Para realizar este estudo, são utilizados processos estocásticos denominados processos de Markov. Na previsão futura do estado de condição, alguns sistemas de gestão de pontes no mundo já utilizam, correntemente, este tipo de processos mas, em Portugal, ainda se procuraram desenvolver modelos de Markov que sejam suficientemente capazes de integrar um sistema de gestão para a análise de uma rede viária (Neves, 2008).

No âmbito dos sistemas de gestão de pontes, o mais importante na previsão da deterioração futura através de processos de Markov, é a possibilidade de se poder controlar a ocorrência e evolução dessa deterioração, através do planeamento de acções de manutenção futuras. A intervenção dessas acções, fornece um prognóstico de resposta à evolução do estado de condição e aos custos que a sua introdução representa. Se um modelo matemático contiver estas parcelas de previsão do desempenho natural de uma rede pontes, previsão do efeito de acções de manutenção na deterioração das estruturas e nos custos do ciclo de vida, é possível otimizar estratégias de manutenção que satisfaçam as exigências do dono de obra e do gestor de pontes.

1.2 Objectivos

O objectivo desta dissertação é desenvolver e implementar um algoritmo que permita prever e otimizar o desempenho de pontes existentes ao longo do seu ciclo de vida. Este tema tem vindo a ganhar um maior relevo, devido à expansão do mercado da reabilitação e reforço estrutural e da consciência de que as obras de grande envergadura, como pontes, necessitam de um acompanhamento efectivo durante a sua vida útil. Esse acompanhamento é auxiliado com o recurso a sistemas de gestão de pontes.

O presente estudo, visa principalmente elaborar modelos de previsão da deterioração de um conjunto de pontes existentes, que possam integrar esses sistemas. Essa modelação é probabilística e recorre aos processos markovianos para a sua execução. Para tal, é simulada uma situação real em que são considerados dados estatísticos sobre a degradação passada de pontes semelhantes, com a finalidade de reproduzir estocasticamente essa degradação. Estes dados estatísticos, dizem respeito exclusivamente à avaliação visual dada às estruturas, por parte dos inspectores. Assim, o objectivo passa por aplicar o modelo elaborado a um conjunto de pontes existentes, estudando a evolução do seu desempenho futuro.

A criação de um modelo de deterioração é uma mais valia para o gestor, pois auxilia-o

no planeamento de acções de manutenção a pontes de uma rede viária. Neste trabalho, são explicados os tipos de acções de manutenção aplicáveis e a sua modelação no âmbito da metodologia de Markov e, de forma a simular uma análise realista, são sugeridas acções de manutenção aplicáveis ao ciclo de vida da rede viária utilizada. Pretende-se ainda, compreender o impacte que estas acções representam na deterioração das estruturas e avaliar o custo económico relacionado com as suas aplicações.

Por fim, tendo em conta os factores referidos, efectua-se um estudo de optimização de estratégias de manutenção recorrendo a algoritmos genéticos, com o objectivo de obter o custo total mínimo acumulado e impondo determinados limites ao estado de condição dos elementos.

Todo o processo matemático deste estudo é elaborado com recurso ao software MatLab[®] (Higham e Higham, 2005).

1.3 Estrutura da dissertação

Esta Dissertação foi estruturada, sumariamente, do seguinte modo:

No capítulo 1 são feitas considerações gerais sobre o tema em estudo e apresentados os objectivos da elaboração da dissertação;

No capítulo 2 são apresentadas as funcionalidades e objectivos dos sistemas de gestão de pontes e ainda descritos os principais sistemas existentes;

No capítulo 3 são desenvolvidos modelos probabilísticos de previsão do estado de condição futuro de pontes existentes;

No capítulo 4 é estudado o impacte de acções de manutenção na deterioração de pontes existentes, bem como os custos associados;

No capítulo 5 são optimizadas estratégias de manutenção sugeridas no capítulo 4.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, sendo também propostos desenvolvimentos futuros nesta área.

Capítulo 2

Sistemas de Gestão de Pontes

2.1 Introdução

Durante o século XX, principalmente nos países mais desenvolvidos, foram realizados fortes investimentos na construção de redes de transportes e desenvolvimento de infra-estruturas rodoviárias, que cobrissem as necessidades de uma época em constante evolução (Neves, 2008). Esse crescimento rápido e arrojado, culminou nas últimas décadas numa certa desintegração dessas redes viárias e, já no final da década de 60, foi identificada a necessidade de otimizar estratégias de manutenção e reabilitação deste tipo de infra-estruturas, nomeadamente pontes (Scherer e Glagola, 1994).

Essa preocupação, tornou-se bem mais evidente após o colapso da Silver Bridge sobre o rio Ohio, na Virgínia Ocidental em Dezembro de 1967, que resultou na perda de 46 vidas humanas e 9 feridos (Figura 2.1). O acidente deveu-se à rotura de um cabo de suspensão provocada por uma fissura de 2mm, situação que seguramente teria sido detectada se uma inspeção adequada tivesse ocorrido previamente (Lichtenstein, 1993).

O acontecimento de Silver Bridge teve um grande impacte na opinião pública e, no início da década de 70, o governo norte-americano promoveu então o desenvolvimento e implementação do *National Bridge Inspection Standards* (NBIS), por parte da *Federal Highway Administration* (FHWA), cuja função era catalogar e registar num inventário as especificações referentes às inspecções realizadas em todas as infra-estruturas rodoviárias públicas (Elbehairy, 2007).

Todavia, segundo Neves (2005, 2008), a função do NBIS era somente informar as autoridades sobre o estado de condição das pontes do território nacional e as necessidades que estas exigiam em termos de acções de manutenção, sendo dada pouca utilidade à informação recolhida e sem ser efectuada uma análise a longo prazo. O NBIS, nunca



Figura 2.1: Colapso da Silver Bridge, 1967 (West Virginia Division of Culture and History, n.d)

foi designado para ser uma ferramenta de suporte à análise e otimização de tomada de decisões na manutenção e conservação de pontes.

Na década de 1980, com o desenvolvimento exponencial da informática e o aparecimento de computadores de grande capacidade de processamento e de gestão de informação, começou a surgir a oportunidade de criação de sistemas de gestão de pontes em formato electrónico, com sistemas de optimização e de decisão. Inicialmente, os sistemas de gestão não eram mais do que inventários com armazenamento de informação, sobre inspecções realizadas e acções de manutenção a realizar a curto prazo. A partir deste avanço tecnológico, foi possível criar uma base de dados bastante mais extensa e com um processamento de informação mais rápido (Neves, 2008; Ryall, 2001).

A facilidade da gestão da informação introduzida, possibilitou a previsão do desempenho futuro de pontes com optimização de acções de manutenção a aplicar à rede viária que, numa análise custo benefício, possibilitasse a solução mais económica. Esta aliança da evolução informática e dos sistemas de gestão de pontes, foi inicialmente usada para as redes de pontes norte-americanas, sendo mais tarde adaptadas às redes europeias, com as necessárias alterações referentes a cada rede (Neves, 2008).

Seria um erro crasso e com consequências óbvias, se as pessoas responsáveis continuassem a ignorar e a negligenciar os problemas de fundo das pontes, relacionados com a durabilidade a longo prazo e a manutenção que todas elas necessitam ao longo da sua vida útil. Presentemente, têm havido desenvolvimentos em todo o mundo que assegurem que, pelo menos na próxima geração de pontes, estas não deteriorem a uma velocidade tão

preocupante e que sejam suficientemente duráveis para suportar todas as adversidades a que estejam sujeitas no seu ciclo de vida (Ryall, 2001). Esses desenvolvimentos passam por conseguir criar sistemas de gestão cada vez mais capazes, detalhados, fiáveis e eficientes, no sentido de constituírem uma poderosa ferramenta de apoio no que à segurança da sociedade civil diz respeito.

No presente capítulo, é apresentado o estado da arte de sistemas de gestão de pontes, procurando-se explicar quais as suas funções, descrever os seus componentes e como estes podem auxiliar os gestores ou as entidades responsáveis pelas redes viárias. São também descritos alguns dos sistemas de gestão de referência no mundo, com uma breve descrição e indicação das particularidades de cada um. São eles os sistemas norte americanos PONTIS (Thompson, 1993a) e BRIDGIT (Hawk e Small, 1998), o sistema finlandês FinnRABMS (Soderqvist e Veijola, 1998), o sistema suíço KUBA (Hajdin, 2008) e o sistema Dinamarquês DANBRO (Andersen, 1990). A realidade portuguesa no que a este tema diz respeito também é abordada, relativamente ao sistema de gestão actualmente utilizado em Portugal, o GOA (Mendonça *et al.*, 2006).

2.2 Sistemas de gestão de pontes e seus componentes

Um sistema de gestão de pontes pode-se definir como uma ferramenta que auxilia os gestores de pontes e as entidades responsáveis na optimização de políticas de decisão de uma rede viária, relativamente ao planeamento de acções de manutenção, tendo em consideração os objectivos a longo prazo e os recursos disponíveis (Elbehairy, 2007). O objectivo do uso de um sistema de gestão desta natureza, passa sempre pela maximização dos benefícios e minimização do custo do ciclo de vida.

Para que um sistema de gestão funcione com eficiência, este tem de incluir a maior quantidade de informação possível. Essa informação sob a forma de *inputs*, deve ser extremamente rigorosa e consistente, pois só assim se podem exigir do sistema resultados igualmente fidedignos. Contudo, um sistema de gestão é mais do que uma colecção de factos, o seu propósito é analisar, combinar e processar *inputs* de gestão, engenharia e factores económicos e determinar, criteriosamente, as melhores acções a serem aplicadas à rede viária, durante um longo período de tempo. A quantidade de informação vai depender do tamanho e da complexidade do sistema (Elbehairy, 2007; Ryall, 2001).

O tipo de análise efectuado nos sistemas de gestão de pontes, pode ser definido em dois planos distintos: uma análise direccionada para a gestão da rede viária na globalidade (*network level*) e outra destinada ao tratamento de cada ponte em particular (*project level*) (Almeida *et al.*, 2009).

Na Figura 2.2 ilustra-se resumidamente o processo de actuação de um sistema de gestão

de pontes.

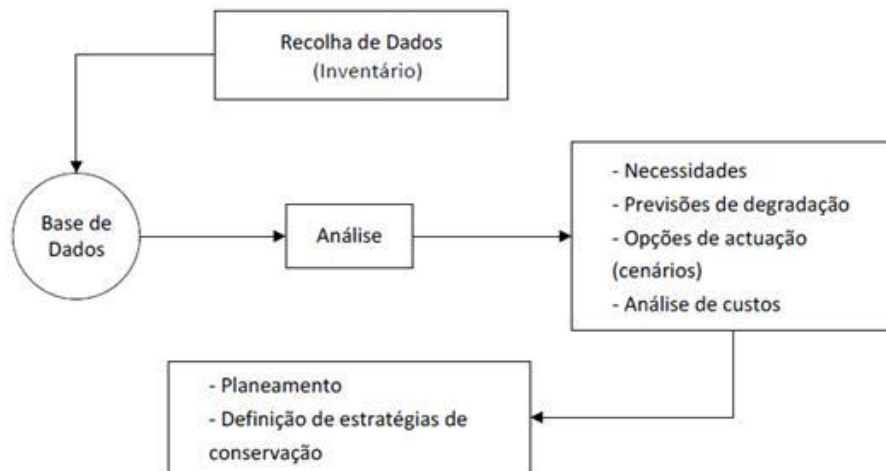


Figura 2.2: Organização geral de um sistema de gestão de pontes (Poças, 2009)

2.2.1 Componentes de um sistema de gestão de pontes

A estrutura de um sistema de gestão de pontes varia de sistema para sistema. Alguns sistemas, não possuem mais do que unidades básicas de inventariado sobre as estruturas pertencentes à sua rede viária. Outros mais complexos e detalhados, possuem funcionalidades que permitem uma abordagem mais abrangente.

De acordo com AASHTO (1993), um avançado sistema de gestão, de um modo geral, deve ter quatro módulos básicos: inventário, modelo de custos e deterioração, modelo de optimização e modelo de actualização.

2.2.1.1 Inventário

Sem um inventário, a construção de um sistema de gestão de pontes seria impossível. O inventário serve de base para o desenvolvimento de todos os outros componentes, sendo sempre o primeiro passo no desenvolvimento de qualquer sistema (Demetrios e Zhao, 2007; Neves, 2008). Consiste numa base de dados, correntemente em suporte informático, que arquiva e concentra toda a informação relativa a todas as pontes pertencentes a uma rede de infra-estruturas, como identificação, características da estrutura e resultados de inspecções e acções de manutenção (Neves, 2008). Essa informação é armazenada ao longo do ciclo de vida das pontes, de forma a reproduzir um registo histórico.

O nível de detalhe de um inventário basicamente, diz respeito à quantidade de informação armazenada, relativa a cada ponte. No entanto, mesmo existindo uma credível e

considerável quantidade de informação armazenada, se esta não for utilizada, simplesmente vai originar uma sobrecarga ao desempenho do sistema, o que indica que a selectividade da informação é fundamental (Demetrios e Zhao, 2007).

Inspecções

O núcleo de uma base de dados de inventário é construído em redor de um registo de inspecções. Os relatórios de inspecções incluem a identificação das anomalias detectadas e a classificação do estado de condição, podendo eventualmente avaliar o impacte que teve determinada acção de manutenção previamente aplicada (Neves, 2008). As inspecções podem-se dividir nas seguintes categorias:

Inspecções de Rotina - Realizadas em operações de limpeza e manutenção, entre períodos curtos de um ou dois anos, por pessoal não especializado e baseadas quase exclusivamente na observação visual. O objectivo passa por detectar danos ou defeitos de maior impacte visual, numa perspectiva de acompanhamento do desenrolar do estado da ponte, sendo apenas elaborado um relatório se forem de facto encontradas irregularidades que o justifiquem (Neves, 2008; Pfeil, 2004);

Inspecções Principais - Inspecções realizadas normalmente em períodos de cinco ou seis anos por engenheiros civis especializados e com experiência em manutenção de pontes (Neves, 2008). São mais detalhadas que as inspecções de rotina, pois são realizadas de forma visual mas a curta distância e, podem requerer complementarmente, o uso de equipamento especializado para pequenos testes *in situ* em situações, entre outras, de concentração de cloretos, recobrimento ou carbonatação (Ryall, 2001). Após o início da vida útil de cada ponte e quando há uma alteração significativa na estrutura como reforço, mudança do sistema estrutural ou expansão da obra, também é realizada uma inspecção deste tipo (Pfeil, 2004; Ryall, 2001). Neste tipo de inspecções, o inspector deve identificar e registar num relatório rigoroso os detalhes construtivos e defeitos que revelem determinada patologia, bem como classificar consoante critérios de índices padronizados, o estado de condição de cada elemento da ponte (Neves, 2008; Ryall, 2001). Este relatório, pode ainda incluir indicações para que seja realizado uma inspecção especial ou uma reparação de carácter mais urgente;

Inspecções Especiais - São inspecções realizadas por pessoal altamente qualificado, que usualmente surgem na sequência de uma inspecção principal quando esta assim o recomenda, ou seja, quando durante uma inspecção periódica é encontrado um problema que cause preocupação tal, ao ponto de se exigir uma avaliação muito deta-

lhada de uma zona específica da estrutura ou da estrutura (Neves, 2008; Pfeil, 2004; Woodward *et al.*, 2001)

Inspecções Excepcionais - As inspecções excepcionais são realizadas mediante determinadas situações extraordinárias como por exemplo (Ryall, 2001):

- Ao ser detectado um problema preocupante em pontes similares
- Necessidade de realizar uma inspecção sub aquática que exija equipamento e pessoal especializado em mergulho
- Inundações
- Incêndios
- Derrocadas
- Colisões acidentais
- Actividade sísmica

Acções de manutenção

Os registos de acções de manutenção a pontes de uma rede viária, são dados fundamentais no inventariado de um sistema de gestão. Estes registos, fornecem ao gestor a natureza das acções de manutenção que foram realizadas e exactamente quanto foi gasto na conservação das pontes. Os cenários de actuação possíveis que o gestor de rede viária pode tomar são os seguintes (Ryall, 2001):

- Não intervenção
- Manutenção e reparações correntes
- Reabilitação e reparações profundas
- Demolição e substituição
- Abandono

2.2.1.2 Modelo de custos e deterioração

A deterioração é uma degradação a longo prazo, levando a uma redução gradual no desempenho de uma ponte e evidenciando o declínio do seu estado de condição (Deshmukt, 2006). Prever o futuro estado de condição de pontes, é um importante factor na determinação do tipo acções de manutenção que uma rede viária deve receber. Um processo que efectua estas previsões adequadamente a cada rede é denominado modelo de deterioração.

Associado a um modelo de deterioração, está associado uma significativa incerteza e, as respostas que estes produzem, são projecções baseadas em longos registos de índices de condição de pontes, com características e condições semelhantes. Estes índices de condição, usualmente discretos, são obtidos aquando da realização de inspecções de carácter visual, avaliando individualmente o estado de condição de cada elemento da estrutura, ou seja o nível de deterioração apresentado, sendo padronizados segundo o sistema de gestão de pontes em causa. Segundo Neves (2008), o índice global da estrutura é obtido através das classificações individuais que cada elemento da ponte recebe e pode ser dado como a média ponderada dos índices de vários elementos, o índice do elemento mais deteriorado, ou uma combinação entre a média dos vários elementos e o valor mínimo dos elementos críticos. O índice de avaliação do estado de condição, é o único indicador sobre o estado da estrutura e dos seus elementos, com base no qual o gestor toma decisões no que diz respeito à realização de acções de manutenção. Na Tabela 2.1, é demonstrado um exemplo da classificação de um elemento estrutural.

Tabela 2.1: Exemplo de classificação da deterioração de um elemento em aço com sistema de pintura (Kelley, 2007)

Índice de condição	Descrição
1	Não há evidência de corrosão activa e o sistema de pintura é eficiente, encontrando-se a funcionar de modo a proteger a superfície do metal.
2	Existe pouca ou nenhuma corrosão activa. Observa-se ferrugem na superfície ou começo de formação. O sistema de pintura pode encontrar-se riscado, a descascar, ou a demonstrar outras evidencias de desgaste do sistema de pintura, mas sem expor o metal.
3	A existência de ferrugem na superfície do material é prevalectente. Pode haver exposição do metal mas não há corrosão activa que cause perda da secção.
4	Podem haver sinais de corrosão, mas qualquer perda de secção devido à corrosão activa ainda não justifica a análise estrutural de qualquer elemento ou da ponte.
5	A corrosão causou perda de secção e pode ser suficiente para justificar uma análise estrutural que verifique o impacte sobre os estados limites últimos e de utilização de cada elemento da ponte.

De acordo com Neves (2008) e Deshmukt (2006), devido à grande incerteza que afecta os factores que influenciam o estado de condição futuro das pontes, como a idade da ponte, tipo de estrutura, qualidade da construção, condições ambientais ou nível de tráfego, a grande maioria dos sistemas de gestão usam modelos probabilísticos para prever as taxas de deterioração futura das pontes. Esses modelos são de natureza estocástica e recorrem, na maioria dos casos, a processos markovianos em cadeia para estimar os seus resultados. A metodologia markoviana é descrita em pormenor no capítulo 3.

Tendo em conta a previsão do desempenho realizada, esta componente tem também como função, estabelecer os custos das acções de manutenção a aplicar (Neves, 2008). Estes custos são sempre deliberados consoante os recursos financeiros disponíveis e as prioridades orçamentais.

2.2.1.3 Modelo de optimização

O modelo de optimização é considerado o cérebro de um sistema de gestão de pontes. Consiste num algoritmo que determina a estratégia de manutenção menos dispendiosa para as acções de manutenção da rede viária, considerando a situação presente e os resultados provenientes da análise da deterioração e dos custos. A optimização é definida consoante as preferências do gestor das pontes e dos recursos financeiros disponíveis, conciliadas com as preferências do dono de obra (Neves, 2008).

De acordo com Woodward *et al.* (2001) e Demetrios e Zhao (2007), a optimização usualmente é realizada do “topo para a base”, ou seja, é privilegiada a análise ao nível da rede viária (*network level*) e só eventualmente depois se recorre à análise de uma ponte em particular (*project level*). Esta situação, justifica-se, devido ao facto de a primeira abordagem ter grande influência em questões políticas e económicas e a segunda ser uma abordagem com mais especificidade para questões técnicas.

A metodologia central de um modelo de optimização é então estabelecer as prioridades na tomada de decisões sobre as pontes de toda a rede, tendo em consideração os desempenhos actuais dos elementos, a previsão futura do desempenho, o custo do ciclo de vida com acções de manutenção, o nível de serviço desejado, a importância patrimonial e social e os custos inerentes às limitações impostas aos utilizadores da ponte, devido a acções de manutenção ou deterioração excessiva (Demetrios e Zhao, 2007; Neves, 2008).

Segundo Neves (2008), o modelo de optimização procura a melhor solução que satisfaça o binómio custo/desempenho na resolução dos seguintes problemas:

- Determinar a estratégia de manutenção que, com um custo médio mínimo, garanta um nível mínimo do desempenho das estruturas da rede viária;

- Determinar a estratégia de manutenção que, usufruindo da totalidade do orçamento disponível, conduza ao máximo desempenho da rede viária.

2.2.1.4 modelo de actualização

Este módulo tem como função alterar e actualizar os três módulos anteriores, consoante novos resultados recolhidos de inspecções, acções de manutenção, modelação de deterioração, análise de custos, ou alteração de prioridades na optimização de resultados (Neves, 2008).

2.3 Exemplos de sistemas de gestão de pontes

2.3.1 PONTIS

O PONTIS foi desenvolvido pela *Federal Highway Administration* (FHWA), em conjunto com o Departamento de Transportes do Governo, surgindo em 1992 a sua primeira versão comercial (actualmente encontra-se na versão 5.0) (Thompson, 1993b). Foi o primeiro software completo a ser desenvolvido para sistemas de gestão de pontes e, nos dias que correm, é provavelmente o sistema mais avançado do mundo (Woodward *et al.*, 2001). É usado em 39 estados norte americanos sendo as excepções mais notáveis, os estados de Nova York e da Pensilvânia (Thompson *et al.*, 1998; Woodward *et al.*, 2001).

Este programa, foi concebido como ferramenta de apoio à gestão de infra-estruturas como pontes, túneis e condutas e abrange o processo completo da gestão, com a inclusão de componentes de inventário, modelo de previsão de deterioração futura e modelo de optimização de acções de manutenção (Thompson *et al.*, 1998).

Para a modelação da deterioração ao longo do tempo, são usados os modelos probabilísticos baseados nos processos de Markov e é empregue uma abordagem do “topo para a base” (da rede para a ponte) na optimização de estratégias, privilegiando a optimização dos processos de decisão à rede de pontes, antes de tratar os projectos individuais (Thompson *et al.*, 1998; Thompson, 1993b).

De acordo com Thompson *et al.* (1998), o PONTIS possui uma ferramenta de planeamento de projectos, em que todos estes projectos são hierarquizados consoante o rácio custo/benefício, proveniente de uma análise de custos detalhada. Os que apresentarem custos abaixo das disponibilidades orçamentais previstas, são seleccionados. Os restantes, são relegados para análises futuras, quando se efectuar novamente o processo de hierarquização.

O modelo de optimização do PONTIS actua em duas vertentes distintas. Uma, é a de proceder à conservação e melhoria do estado de condição das pontes através de acções de

manutenção, outra é a de proceder a medidas que procurem garantir determinado nível de serviço às estruturas (Woodward *et al.*, 2001).

Um dado de relevo que ocorre nos sistemas de gestão norte americanos, como o caso do PONTIS, é que na sua abordagem estatística a atribuição de índices de condição (escala de 0 a 9) é destinada aos componentes em que a ponte é dividida, são eles tabuleiro, superestrutura, subestrutura e a envolvente. Inicialmente, aquando da inspecção, a classificação do estado de condição é atribuída individualmente aos elementos que constituem cada uma das componentes referidas e, só depois, é feita a conversão para o estado de condição de cada componente. Este esquema de avaliação pode ser um pouco generalizado, correndo o risco de conduzir a alguma falta de rigor no campo da análise (Bevc *et al.*, 1999).

De acordo com Woodward *et al.* (2001), os elementos de uma ponte são considerados como totalmente independentes da respectiva ponte, sendo agrupados em secções de componentes sujeitas a condições semelhantes. Quando se pretende determinar as taxas de deterioração dos componentes, tendo em consideração a informação de um grande número de pontes, podem haver pormenores ou factores específicos que liguem os componentes às respectivas pontes e que a negligência da sua não documentação, pode conduzir a resultados pouco fiáveis em determinadas circunstâncias.

2.3.2 BRIDGIT

O BRIDGIT, criado em 1985, foi desenvolvido nos Estados Unidos da América em conjunto pela *National Engineering Technology Corporation* (NETC) e pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), encontrando-se actualmente implementado nos estados de Maine, Washington e Luisiana (Hawk, 1999).

É um sistema de gestão bastante parecido com o PONTIS na sua estruturação, modelação e capacidades. A grande diferença existente entre os dois sistemas, reside no facto do BRIDGIT fazer uma abordagem de optimização da “base para o topo” (da ponte para a rede), ao contrário do que sucede no PONTIS, permitindo analisar preferencialmente o ciclo de vida de cada ponte individualmente. Esta situação pode ser vantajosa se se tratarem de redes viárias com um pequeno grupo de pontes, até porque o BRIDGIT é um software mais lento do que o PONTIS (Demetrios e Zhao, 2007; Hawk e Small, 1998).

Outra diferença que importa salientar, é que o BRIDGIT tem a vantagem de conseguir distinguir elementos estruturais e os seus sistemas de protecção. Por exemplo, num elemento metálico com a sua pintura de protecção, a degradação da pintura pode ser analisada em separado do elemento, sendo possível analisar posteriormente a influência da degradação da pintura na degradação do metal. A deterioração de cada elemento e de cada sistema de protecção é, com base nos dados armazenados no arquivo do inventário,

estimada segundo modelos markovianos. (Hawk, 1999).

No BRIDGIT, a otimização do custo do ciclo de vida é feito para um horizonte de 20 anos, sendo consideradas as sequências ótimas de acções e o período ótimo para cada acção, de modo a determinar os benefícios e os custos para o usuário (Pastor *et al.*, 2000; Woodward *et al.*, 2001).

Tal como referido para o caso do PONTIS, o esquema de avaliação das estruturas por índices de condição no BRIDGIT segue a mesma metodologia, inserindo-se no esquema adoptado nos E.U.A pela NBIS.

De acordo com Demetrios e Zhao (2007), este sistema de gestão possui também um ferramenta muito útil, “E se”, que analisando o atraso na aplicação de uma acção a uma ponte em particular, determina se este atraso vai poupar ou gastar mais dinheiro no que diz respeito ao ciclo de vida da estrutura.

2.3.3 FinnRABMS

O departamento da *Roads and Waterways Administration* (RWA) na Finlândia, criou em 1986 o sistema de gestão de pontes que, nos dias que correm, gere a rede de pontes do seu território (Soderqvist e Veijola, 1998).

Este sistema de gestão fornece informação distinta ao nível da rede global e ao nível da ponte singular (Soderqvist e Veijola, 1998). A gestão ao nível da rede é usada pela administração central do país e ao nível da ponte é usada por regiões específicas (Kahkonen e Marshall, 1990).

Gestão ao nível da rede viária - Procura um nível óptimo de equilíbrio entre as pontes da rede viária. Entende que as pontes devem ter um estado de condição que satisfaça as exigências de segurança e de serviço, dentro de uma viabilidade financeira sustentada. São utilizados modelos probabilísticos de Markov na previsão da deterioração das estruturas (Soderqvist e Veijola, 1998).

Gestão ao nível da ponte singular - A análise ao nível da ponte em particular, usa os resultados provenientes do gestão ao nível da rede viária global para elaborar informação específica. Deste modo, o gestor pode elaborar um plano de acção a curto e a longo prazo relativamente à ponte em causa, podendo também, usar a sua experiência para estabelecer prioridades. Ao nível da ponte singular, a previsão do desempenho é realizada de um modo determinístico (Soderqvist e Veijola, 1998).

Na Finlândia, o processo de optimização engloba um índice de reparação que estabelece a hierarquização dos trabalhos mais urgentes, a realizar na preservação do estado das

estruturas. Para obter este índice, é tido em consideração a avaliação do estado de cada elemento, a classe das deficiências e a urgência da reparação (Soderqvist e Veijola, 1998).

2.3.4 KUBA

Na Suíça foi criado pela Autoridade Federal de Estradas, um sistema de gestão de pontes denominado KUBA. É um programa baseado no PONTIS, pelo que existem bastantes semelhanças entre ambos. Possui quatro componentes identificadas como o KUBA-DB, KUBA-MS, KUBA-RP e KUBA-ST (Hajdin, 2008).

O KUBA-DB (*Data Base*), gere o inventário de todas as informações relativas às estruturas como características, inspecções e acções de manutenção realizadas, servindo de base para os outros componentes do sistema. O KUBA-MS (*Management System*), utiliza modelos de deterioração de Markov, sendo o módulo encarregue de otimizar os processos de decisão, relativos às infra estruturas da rede viária Suíça. O componente KUBA-RP (*Reporting*), permite a consulta e elaboração de relatórios de todos os dados e resultados de análises provenientes do sistema. O KUBA-ST (*Special Transports*), é uma ferramenta que avalia a capacidade de uma ponte ou de várias pontes suportarem a passagem de veículos especiais, como veículos de peso tal, que excedem os limites esperados. O KUBA-ST não é um programa que avalia a segurança de pontes sujeitas a veículos especiais, o que este faz, é representar um filtro que permita a avaliação da capacidade de uma ponte para receber ou não este tipo de veículo (Hajdin, 2008).

No módulo da optimização da relação custo/benefício, o KUBA permite a análise de cenários de manutenção com e sem restrições de orçamento. É ainda possível alterar manualmente a ordem das intervenções de acordo com a vontade do gestor, sendo que estas alterações resultam num recalculer dos custos inerentes (Hajdin, 2008).

Segundo Hajdin (2008), a versão 5.0 do KUBA já possui a capacidade de tratar informação relativamente a túneis e, futuramente, as versões 5.x já deverão ter inovado a ponto de conseguirem representar estruturas rodoviárias em três dimensões. A inovação desta característica, não está sobretudo na representação visual das estruturas em 3-D, mas sim porque também permite a recolha e identificação de anomalias, como corrosão ou fissuração, identificáveis directamente pelo software no ecrã (Figura 2.3).

2.3.5 DANBRO

O DANBRO é desde a sua implementação, até aos dias que correm, o sistema de gestão de pontes utilizado na Dinamarca. (Andersen, 1990).

De acordo com Das (1999), este sistema organiza-se em módulo de inventario, módulo

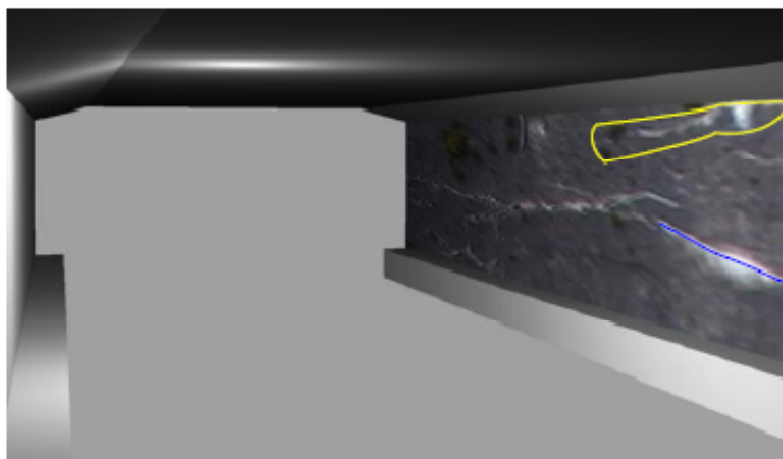


Figura 2.3: Pormenor de uma estrutura em 3D com detecção de anomalias identificadas directamente pelo KUBA (Hajdin, 2008)

de inspecção, módulo de optimização de acções de manutenção, orçamentação a longo prazo, catálogo de preços relativo às tarefas de manutenção das estruturas e ainda um módulo de gestão de transportes especiais. Esta gestão de transportes especiais é realizada com a atribuição de uma classe a cada ponte e a cada tipo de veículo.

Segundo Woodward *et al.* (2001), relativamente aos processos de optimização, o DANBRO é um sistema mais simples do que o PONTIS, pois se este último usa dois módulos de optimização distintos (como referido em 2.3.1), o DANBRO concilia num único módulo de optimização de medidas de actuação. Este módulo, abrange a melhoria e conservação das estruturas e a garantia do nível de serviço. Ainda no módulo de optimização, Woodward *et al.* (2001) refere que o Danbro é um software mais direccionado para uma análise à rede de pontes no seu conjunto, apesar de incorporar informação para uma análise mais particular das estruturas.

Uma particularidade do sistema DANBRO, é que há alguns anos foi desenvolvida uma plataforma denominada DANBROweb, que tem um funcionamento completamente *online* na *World Wide Web* (WWW), permitindo que todas as partes envolvidas na gestão da rede viária, possam aceder à mesma base de dados, através de um *login* e de uma *password* (Lassen, 2003).

Usualmente num sistema de gestão, as opções avançadas de optimização de acções de manutenção a longo prazo e análise do custo do ciclo de vida, só estão acessíveis a alguns especialistas na gestão das pontes. Já os módulos de inventariado e registo de diversas informações na base de dados, estão disponíveis a um número muito superior de pessoas, com distinta formação sobre o assunto. Por isso, o DANBROweb procura ser um sistema de gestão mais flexível e prático, no sentido de ser usado na globalidade por diferentes tipos de utilizadores da gestão de infraestruturas, desde que estes possuam as devidas

credenciais de acesso (Lassen, 2003).

O DANBROweb é uma ferramenta que tem vantagens e desvantagens. Algumas delas podem ser as seguintes (Lassen, 2003):

Vantagens:

- Através do acesso à Internet, todas as pessoas devidamente credenciadas podem aceder à mesma base de dados em qualquer parte do mundo, onde quer que estas se encontrem;
- Possibilita a atribuição de diferentes níveis de permissão de utilização;
- Os utilizadores podem ler todos os dados disponibilizados no servidor, com a possibilidade de alterar e adicionar nova informação à base de dados;
- Permite arquivar ficheiros em vários formatos como documentos em Word, Excel, Cad e até fotografias e documentos digitalizados em scanner;
- Uma vez que o DANBROweb é um sistema totalmente online, este é compatível com diversos sistemas operativos, não sendo necessária a instalação previa de nenhum programa;
- Garante uma actualização automática da versão do software, sempre que uma nova versão seja criada.

Desvantagens:

- A qualidade de acesso ao programa, está dependente da velocidade de ligação à Internet e do servidor;
- Uma grande quantidade de informação, pode conduzir igualmente a um acesso mais lento ao programa;
- Apesar dos critérios de credenciação, o facto de várias pessoas de diferente formação poderem introduzir e actualizar informação, pode conduzir ao aparecimento de incorrecções no sistema;
- Pelo facto de ser um sistema totalmente *online*, há sempre o risco associado à perda de dados ou corrupção dos ficheiros arquivados, podendo-se quebrar a confidencialidade de determinadas informações.

2.3.6 GOA

Em Portugal, tal como em muitos países, o assunto da gestão de pontes só teve maior impacto e dimensão aquando da ocorrência de uma tragédia que envolvesse a perda de vidas humanas. Neste caso, foi o acidente da ponte de Entre-os-Rios em 2001, que despontou as atenções dos responsáveis do governo e dos engenheiros civis na área da conservação de pontes, tendo-se desde então vindo a constatar claros desenvolvimentos no sentido de oferecer uma gestão de qualidade da rede viária portuguesa (Neves, 2008).

A BETAR, uma empresa portuguesa, desenvolveu um sistema de gestão denominado GOA (Gestão de Obras de Arte), que actualmente encontra-se implementado em inúmeras concessionárias e entidades portuguesas (Mendonça, n.d):

- EP - Estradas de Portugal, S.A.
- REFER, EPE
- Brisa
- Auto-Estradas do Atlântico
- Vialitoral
- Viaexpresso
- Aenor- Auto Estradas do Norte
- LusoScut - Beiras Litoral e Alta
- LusoScut - Costa de Prata
- Câmara Municipal de Lisboa

Na qualidade de sistema de gestão de pontes, o GOA tem resumidamente os seguintes objectivos (Mendonça, 2002; Neves, 2008):

- Inventariar de forma consistente e pormenorizada os dados relativos a todas as estruturas da rede viária, mantendo a base de dados sempre actualizável a novas informações;
- Registar resultados de inspecções como o estado de conservação ou a extensão dos danos e planear acções de inspecção e manutenção futuras;
- Estimar e orçamentar, de um modo simples, custos de acções de manutenção;

- Hierarquizar intervenções consoante os recursos financeiros disponíveis.

A Figura 2.4 ilustra sinteticamente a estruturação de como está articulado o sistema GOA.



Figura 2.4: Estrutura do GOA (Santiago, 2005)

Segundo Neves (2008), o GOA não faz modelação da deterioração futura do estado das pontes. Esta matéria é uma área ainda por explorar em Portugal, sendo o maior entrave, a limitada quantidade de registos históricos disponíveis, relativamente às características e desempenho das estruturas (Neves, 2006).

2.4 Conclusões

No decorrer deste capítulo, foi abordada a história e o desenvolvimento dos sistemas de gestão de pontes ao longo do tempo, até aos dias que correm. Descreveram-se os componentes que geralmente constituem um sistema de gestão e abordaram-se alguns dos sistemas de referência a nível mundial, bem como o sistema de gestão actualmente utilizado em Portugal. Mencionaram-se as principais características e particularidades de cada um e verificou-se que dos sistemas de gestão tratados, todos eles utilizam processos de Markov para previsão da deterioração futura. Porém, também se viu que em Portugal ainda não se efectua modelação do desempenho futuro de pontes, sendo precisamente nessa área que se insere o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

Capítulo 3

Previsão do Desempenho

3.1 Introdução

O presente capítulo centra-se na previsão do desempenho futuro de pontes existentes, recorrendo a processos matemáticos de Markov. São abordados os processos discretos e contínuos no tempo. No processo de Markov discreto no tempo, é explicada a sua metodologia e tratado um exemplo concreto para melhor compreensão de todo o procedimento.

O processo contínuo no tempo é o tema em principal destaque, com a elaboração de um modelo de deterioração. É simulada uma situação real, usando um inventário de pontes com registos de inspecções que indicam estados de condição. Esses dados são usados para prever probabilisticamente o desempenho de pontes actuais, com características semelhantes às do inventário utilizado. Os resultados provenientes deste estudo, são a base para o desenvolvimento dos capítulos 4 e 5.

3.2 Tipos de modelos de deterioração

De acordo com Lounis e Madanat (2002) e Mishalani e Madanat (2002), existem dois tipos de modelos deterioração em processos de estados discretos: modelos baseados no tempo e modelos baseados no estado. Os modelos baseados no tempo, são modelos de deterioração que prevêem a probabilidade do intervalo de tempo que uma ponte demora a efectuar uma transição de estado de condição. É necessário para a sua formulação a recolha de dados históricos, relativamente aos intervalos de tempo observados entre inspecções que indicaram transição de estado. Exemplos de modelos de deterioração baseados no tempo foram elaborados e desenvolvidos por Mishalani e Madanat (2002) e Mauch e Madanat (2001), no entanto, este tipo de modelos não serão desenvolvidos no presente trabalho.

Segundo Lounis e Madanat (2002) e Mishalani e Madanat (2002), os modelos baseados no estado são modelos de deterioração que, num processo markoviano em cadeia, prevêem a probabilidade de uma determinada ponte manter o seu estado de condição ou transitar de estado, num intervalo de tempo fixo Δt . São modelos baseados no estado que serão desenvolvidos ao longo deste capítulo.

3.3 Processos estocásticos: cadeias de Markov

Os processos estocásticos têm sido utilizados para a modelação da deterioração de infra-estruturas ao longo do tempo como, pontes, estradas ou esgotos, devido ao carácter aleatório que é inerente a um processo de deterioração (Elbehairy, 2007; Kobayashi *et al.*, 2010; Morcous, 2006).

O processo estocástico mais recorrentemente utilizado é o processo de Markov em cadeia ¹. Este simula a evolução do estado de conservação das pontes, sendo de extrema importância para a elaboração de um sistema de gestão de qualidade (Elbehairy, 2007; Neves, 2006; Yang *et al.*, 2009).



Figura 3.1: Andrei Markov (Infopédia. Porto Editora, 2003-2011)

Num modelo baseado no estado, se forem considerados 5 estados de condição discretos, então é possível elaborar uma matriz probabilística de Markov P , com dimensão 5×5 e que toma o seguinte aspecto:

¹Cadeia de Markov é o nome do processo estocástico em homenagem ao Professor Andrei A. Markov (Figura 3.1). Markov nasceu a 14 de Junho de 1856 em Riazan na Rússia e faleceu a 20 de Julho de 1922 em São Petersburgo, Rússia. Desenvolveu trabalhos no âmbito da análise numérica, teoria da aproximação e convergência de séries, mas é particularmente recordado pela elaboração das cadeias de Markov, que estaria na base do desenvolvimento dos processos estocásticos e suas aplicações (Ching e Ng, 2005; Infopédia. Porto Editora, 2003-2011).

$$P_{\Delta t} = \begin{array}{c} \text{Estado} \\ E1 \\ E2 \\ E3 \\ E4 \\ E5 \end{array} \begin{array}{ccccc} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\begin{array}{ccccc} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ 0 & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{55} \end{array} \right] \end{array} \quad (3.1)$$

Em que, se o intervalo de tempo for por exemplo de 2 anos, então P_{ij} é a probabilidade de determinada ponte que no presente se encontra no estado de condição i , após 2 anos, transitar para o estado j e P_{ii} é a probabilidade de no período homólogo de tempo, a ponte permanecer no estado de condição inicial. Matematicamente estes dois acontecimentos expressam-se nas equações 3.2 e 3.3 (Baik *et al.*, 2006; Frangopol *et al.*, 2004; Kallen, 2009; Monika, 2005; Morcous, 2006).

A probabilidade de um elemento transitar do estado i num tempo inicial para o estado j num tempo Δt é:

$$P_{(\Delta t)ij} = P_r(X_{\Delta t} = j | X_0 = i) \quad (3.2)$$

e analogamente, a probabilidade de um elemento permanecer no estado i num tempo Δt é:

$$P_{(\Delta t)ii} = P_r(X_{\Delta t} = i | X_0 = i) \quad (3.3)$$

estando a matriz P sujeita às seguintes condições (Madanat *et al.*, 1995; Morcous *et al.*, 2010):

1. $0 \leq P_{ij} \leq 1$ com i e $j = 1, 2, \dots, k$ sendo k o numero total de estados de condição
2. $P_{ij} = 0$ para $i > j$
3. $\sum_j^k P_{ij} = 1$ com $i = 1, 2, \dots, k$

O ponto 2 indica que, na previsão do desempenho futuro, se está a considerar um modelo deterioração de Markov em que, uma ponte estando num determinado nível de condição, deteriora naturalmente sem melhorar o seu estado, ou seja, considera-se que a ponte não estará submetida a nenhuma operação de manutenção entre a período de tempo Δt estipulado.

Um outro aspecto a ter em consideração nas matrizes de Markov é o facto das transições de estado serem sempre de um passo. Isto é, mesmo que para uma matriz P com determinado Δt , ocorra probabilisticamente uma transição do estado 1 para o estado 3, isso significa porém que, antes de se atingir o fim do respectivo intervalo de tempo, a ponte terá entretanto passado pelo estado de condição 2, por um determinado período de tempo.

As matrizes de primeira ordem de Markov são, desde há inúmeros anos, utilizadas em modelos de deterioração devido às suas propriedades:

1. Os estados de condição são discretos, ou seja, aquando das inspecções são atribuídas classificações ao estado das pontes com números inteiros e igualmente espaçados, numa gama de valores que depende do sistema de gestão de pontes em causa e que, por exemplo, pode ir de 1 (ponte em perfeito estado de condição) a 5 (ponte excessivamente deteriorada) (Morcoux *et al.*, 2010; Thompson e Johnson, 2005);
2. Os modelos são probabilísticos e não determinísticos isto é, sabendo que o processo de deterioração das pontes é de natureza estocástica, qualquer que seja o estado da ponte ou de um conjunto de pontes no presente, a previsão do desempenho futuro segue uma distribuição de probabilidades, enquanto num modelo determinístico o estado de condição das pontes é assumido com sendo um valor certo, ou seja, que a ponte se deteriora de acordo com uma função (Ng e Moses, 1999; Scherer e Glagola, 1994; Thompson e Johnson, 2005);
3. É possível introduzir um elevado número de elementos no modelo, pois trata-se de um processo de fácil utilização que pode ser executado computacionalmente (Morcoux, 2006);
4. As matrizes de primeira ordem de Markov são resultantes de processos estocásticos que gozam de uma importante propriedade, denominada “falta de memória”. Esta propriedade indica que o desempenho futuro da ponte depende apenas do estado de condição inicial e não dos seus registos passados (Cesare *et al.*, 1992; Monika, 2005; Morcoux, 2006; Morcoux *et al.*, 2010; Ng e Moses, 1998, 1999; Scherer e Glagola, 1994; Thompson e Johnson, 2005; Yang *et al.*, 2009). Devido a esta situação, surgem três pressupostos importantes:
 - Este tipo de matrizes usa probabilidades de transição constantes, pois são formuladas para uma variação temporal fixa, em que dependem apenas do intervalo de tempo entre inspecções, não dependendo do tempo decorrido no estado de condição inicial ou da idade da ponte. É por isso denominado processo estacionário ou processo independente do tempo. (Baik *et al.*, 2006; Bortot *et al.*, 2006; Cesare *et al.*, 1992; Hegazy *et al.*, 2004; Kallen e Van Noortwijk, 2006; Lounis e Madanat, 2002; Madanat

et al., 1997; Morcoux *et al.*, 2010; Ng e Moses, 1966, 1998; Robelin e Madanat, 2007). Serem matrizes constantes reflecte-se, por exemplo, no facto de uma matriz P com $\Delta t = 2$ anos ser sempre a mesma matriz, independentemente de ser aplicada entre o ano 0 e o ano 2 da ponte, ou de ser aplicada entre o ano 8 e 10.

- Para a previsão do futuro do desempenho da ponte não são considerados os estados de condição relativos ao passado (independente de estados anteriores), apenas importa o estado de condição da ponte no presente e, por isso, as matrizes de Markov são de primeira ordem (Baik *et al.*, 2006; Madanat *et al.*, 1997; Morcoux, 2006; Morcoux *et al.*, 2010; Ng e Moses, 1966; Robelin e Madanat, 2007).
- O tempo para o qual o processo transita de estado ou permanece no mesmo, segue uma distribuição exponencial (processo contínuo no tempo) ou geométrica (processo discreto no tempo) (Ng e Moses, 1998, 1999; Yang *et al.*, 2009).

A propriedade de “falta de memória” de Markov é de relevante importância tendo em conta que, ao ser desnecessário fornecer dados relativamente a estados de condição anteriores ou à idade dos elementos, é possível ultrapassar a dificuldade relativamente às pontes com várias décadas de existência, em que não existem registos de inspecções realizadas ou que ao existirem, são em número insuficiente. Ao abrigo desta propriedade, é possível prever no futuro o desempenho de todas as pontes que se encontram nestas circunstâncias (Thompson e Johnson, 2005).

Sabendo o vector probabilidades $p(t_i)$, relativo aos vários estados de condição num instante inicial t_i e, estando na posse de uma matriz $P_{\Delta t}$ que reproduza convenientemente a deterioração da estrutura em causa ao longo do respectivo intervalo de tempo, é possível prever o desempenho futuro para um instante final t_f , obtendo o vector probabilidades de estados de condição $p(t_f)$ (Scherer e Glagola, 1994):

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

sendo, $\Delta t = t_f - t_i$ em que t_f e t_i representam o instante final e inicial respectivamente

Um vector probabilidades genérico para um determinado instante t , toma portanto a seguinte forma:

$$p(t) = \begin{matrix} & E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\right. & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 \end{matrix} \quad (3.5)$$

em que o valor p_i , corresponde à probabilidade da estrutura se encontrar no estado i , no instante t .

Para obter o estado de condição médio, basta multiplicar o vector probabilidades pelo vector coluna dos estados de condição:

$$C_{med}(t) = p(t) \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.4 Processos de Markov em tempo discreto

Os modelos markovianos de previsão do desempenho de alguns sistemas de gestão de pontes, são discretos no tempo, isto é, ao longo do tempo as probabilidades de transição seguem uma distribuição geométrica com unidades de intervalos equidistantes e inteiros, sendo esta sequência uma progressão geométrica de razão q . A probabilidade de permanência no mesmo estado ou de transição de um estado para outro, é alterada ao longo de múltiplos intervalos discretos, que correspondem a múltiplas matrizes probabilísticas de Markov. Estes intervalos podem ser por exemplo de um ano ou dois anos, se corresponderem ao tempo periódico de inspecções realizadas às estruturas, cujos resultados serviram para elaborar as referidas matrizes (Frangopol *et al.*, 2004; Morcous e Lounis, 2006; Scherer e Glagola, 1994; Yang *et al.*, 2009).

3.4.1 Estimativa da matriz probabilística de Markov P

Como já referido, num sistema de gestão as pontes são avaliadas em função dos resultados das inspecções visuais realizadas aos seus elementos, sendo estabelecida uma classificação discreta em termos de índice de condição. A taxa de deterioração das estruturas é modelada usando processos de Markov e determinada usando uma análise estatística de dados históricos, relativamente a estados de condição de pontes semelhantes que foram observados durante as várias inspecções realizadas ao longo do tempo (inventário). Deste modo, a elaboração de um modelo de previsão da deterioração futura de uma ponte, vai reflectir o desempenho da deterioração passada do inventário de pontes adoptado (Hegazy *et al.*, 2004; Lounis e Vanier, 1998; Neves, 2006).

Se o intervalo de tempo entre inspecções de pontes for periódico e constante, a matriz P para esse intervalo específico, pode facilmente ser estimada mediante técnicas como, o método do valor esperado ou método da optimização não linear, o método sugerido por

Thompson e Johnson (2005) e ainda o método correntemente mais utilizado, denominado por método da previsão da percentagem.

Este método permite estimar de forma simples as probabilidades de transição em tempo discreto, sendo optimizada uma matriz probabilística de Markov P para um determinado intervalo de tempo e com base em inspecções realizadas periodicamente para o mesmo período. Para que seja gerada uma matriz P de qualidade, é necessário que o historial de inspecções forneça um vasto leque de pontes com registos de, pelo menos, duas inspecções consecutivas e com estados de condição diversificados. A estimativa da matriz P segue então a seguinte formulação (Kallen, 2009; Morcous, 2006; Ng e Moses, 1966):

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (3.7)$$

em que, a probabilidade P_{ij} de uma ponte transitar do estado i para o estado j , é o quociente entre o número de pontes que transitaram do estado i para o estado j (n_{ij}) e o número de pontes cujo estado inicial era i (n_i). A equação 3.7 é análoga para o cálculo da probabilidade de permanência de estado, num determinado intervalo de tempo.

Deste modo, a deterioração das pontes pode ser prevista para o mesmo intervalo de tempo do registo de inspecções, usando o modelo construído.

3.4.2 Previsão do desempenho

A partir de uma matriz markoviana com determinado Δt , é possível obter matrizes de Markov semelhantes, mas para intervalos de tempo superiores e múltiplos da razão de progressão geométrica q , com valor igual ao Δt da matriz inicial. A partir de uma matriz P com intervalo de tempo $\Delta t_{inicial}$, a matriz P final que se pretenda obtém-se genericamente do seguinte modo:

$$P_{\Delta t_{final}} = (P)^n_{\Delta t_{inicial}} \quad (3.8)$$

sendo $\Delta t_{final} = n \times \Delta t_{inicial}$ e n o número de intervalos de tempo Δt

Mediante o resultado de uma inspecção feita no presente, é possível prever ao longo do tempo para $\Delta t_{inicial}$, a probabilidade da respectiva ponte permanecer no estado em que foi avaliada, ou de transitar do actual estado de condição para os demais estados. Obtém-se genericamente do seguinte modo (Baik *et al.*, 2006; Lounis e Vanier, 1998; Morcous, 2006; Morcous *et al.*, 2010; Ng e Moses, 1966, 1998):

$$p(t_{(q \times n)}) = p(t_i) \times (P)^n_{\Delta t_{inicial}} \quad (3.9)$$

em que $q \times n$, representa o tempo final (t_f) de previsão do desempenho.

Veja-se a título de exemplo, uma matriz probabilística de Markov P com $\Delta t = 2$ anos:

$$P_{\Delta t=2} = \begin{bmatrix} 0,85 & 0,05 & 0,04 & 0,035 & 0,025 \\ 0 & 0,8 & 0,15 & 0,03 & 0,02 \\ 0 & 0 & 0,85 & 0,09 & 0,06 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

A partir desta matriz com $\Delta t = 2$ anos, podem-se obter matrizes de Markov para intervalos de tempo múltiplos da razão da progressão geométrica q que, neste caso, é 2 pois o Δt da matriz markoviana inicial é de 2 anos. É, portanto, possível obter matrizes P por exemplo para $\Delta t = 2,4,6,8$ e 10 anos, em que n representa a contabilização do número de intervalos de tempo Δt (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Exemplos de alguns intervalos de tempo para $q = 2$

Δt	2	4	6	8	10
n	1	2	3	4	5

Obtenha-se, a partir da equação 3.8 e a título de exemplo, a matriz probabilística de Markov com $\Delta t = 6$ anos ($n=3$) através da matriz da equação 3.10, com $\Delta t_{inicial} = 2$:

$$P_{\Delta t=6} = (P)_{\Delta t=2}^3 = \begin{bmatrix} 0,6141 & 0,1021 & 0,1055 & 0,0943 & 0,0840 \\ 0 & 0,5120 & 0,3064 & 0,0995 & 0,0821 \\ 0 & 0 & 0,6141 & 0,2068 & 0,1791 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7290 & 0,2710 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,85 & 0,05 & 0,04 & 0,035 & 0,025 \\ 0 & 0,8 & 0,15 & 0,03 & 0,02 \\ 0 & 0 & 0,85 & 0,09 & 0,06 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^3 \quad (3.11)$$

Onde, por exemplo, o valor 0,3064 representa a probabilidade da ponte estando no estado 2, passado 6 anos transitar para o estado 3.

Considere-se agora que determinada ponte obtém a classificação E1 aquando de uma inspecção e que, portanto, se encontra em perfeitas condições :

$$p(t_i) = \begin{matrix} & E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\right. & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (3.12)$$

Note-se que, o vector da equação 3.12, diz respeito à probabilidade de um acontecimento certo, ou seja 100%, pois foi determinado um estado de condição específico numa inspecção.

Considerando a matriz da equação 3.10 e o vector probabilidades da equação 3.12, determine-se probabilisticamente através da equação 3.9 o estado da ponte para, por exemplo, $\Delta t = 2, 4, 6, \dots 18, 20$ anos, surgindo os resultados demonstrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Previsão do estado da ponte ao longo de 20 anos

Ano	E1	E2	E3	E4	E5	Estado de condição previsível
0	1	0	0	0	0	-
2	0,85	0,05	0,04	0,035	0,025	1,335
4	0,7224	0,0825	0,0755	0,0664	0,0532	1,6452
6	0,6141	0,1021	0,1055	0,0943	0,0840	1,932
8	0,5220	0,1124	0,1295	0,1189	0,1172	2,1968
10	0,4437	0,1161	0,1478	0,1403	0,1521	2,4411
12	0,3771	0,1151	0,1608	0,1586	0,1884	2,6662
14	0,3206	0,1109	0,1690	0,1738	0,2257	2,8732
16	0,2725	0,1047	0,1731	0,1863	0,2634	3,0634
18	0,2316	0,0973	0,1738	0,1959	0,3014	3,2379
20	0,1969	0,0895	0,1716	0,2029	0,3391	3,3979

Observando a Tabela 3.2, em particular a coluna E1, é fácil constatar que, tendo a ponte inicialmente sido avaliada com o estado de condição 1, a cada ano que passa a probabilidade desta se manter nesse mesmo nível de condição, vai naturalmente decrescendo. Relativamente à coluna referente ao estado de condição previsível, esta demonstra singularmente o estado de condição médio que se prevê para a ponte a cada dois anos decorridos.

Cada uma das linhas da Tabela 3.2 exibida, diz respeito à previsão do desempenho para determinado ano. Por exemplo, para o ano 8, sendo $q = 2$ e considerando $n = 4$, o estado previsto da ponte $p(t_8)$ obtém-se por:

$$p(t_8) = p(t_0) \times (P)_{\Delta t=2}^4 \quad (3.13)$$

ou seja,

$$p(t_8) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0,85 & 0,05 & 0,04 & 0,035 & 0,025 \\ 0 & 0,8 & 0,15 & 0,03 & 0,02 \\ 0 & 0 & 0,85 & 0,09 & 0,06 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^4 = \begin{bmatrix} 0,52 \\ 0,11 \\ 0,13 \\ 0,12 \\ 0,12 \end{bmatrix}^T \quad (3.14)$$

Pode-se obter o mesmo resultado usando outros vectores iniciais. Por exemplo, em vez de usar o vector referente ao ano 0, pode-se usar como vector inicial o vector referente ao ano 6, se este já tiver sido previamente calculado. Fica então:

$$p(t_8) = p(t_6) \times P_{\Delta t=2} \quad (3.15)$$

ou seja,

$$p(t_8) = \begin{bmatrix} 0,6141 \\ 0,1021 \\ 0,1055 \\ 0,0943 \\ 0,084 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0,85 & 0,05 & 0,04 & 0,035 & 0,025 \\ 0 & 0,8 & 0,15 & 0,03 & 0,02 \\ 0 & 0 & 0,85 & 0,09 & 0,06 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,52 \\ 0,11 \\ 0,13 \\ 0,12 \\ 0,12 \end{bmatrix}^T \quad (3.16)$$

Para se calcular o estado de condição médio previsível, efectua-se a seguinte multiplicação matricial:

$$C_{med(t_8)} = \begin{bmatrix} 0,5220 & 0,1124 & 0,1295 & 0,1189 & 0,1172 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,1968 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

em que a matriz coluna representa os estados de condição do modelo e o valor de 2,1968, representa o estado médio da ponte previsto ao fim de um período de oito anos.

De seguida, na Figura 3.2, apresenta-se a ilustração gráfica da deterioração da ponte para o exemplo referido, com um horizonte de 80 anos, sujeita à matriz markoviana da equação 3.10 e considerando inicialmente o vector probabilidades da equação 3.12.

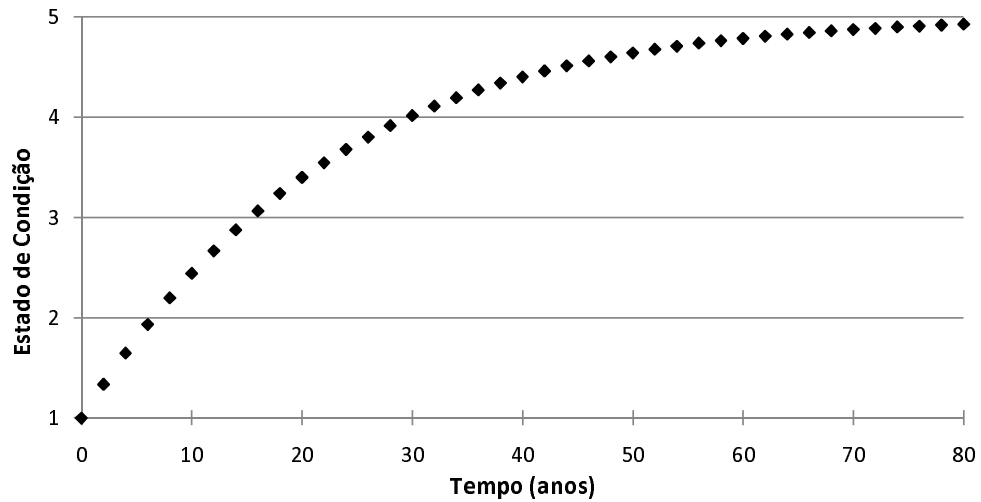


Figura 3.2: Exemplo da deterioração de uma ponte ao longo de 80 anos

Note-se na Figura 3.2 que o gráfico não representa uma curva contínua, pois no processo discreto no tempo, a observação dos intervalos de tempo ocorre de Δt em Δt anos e para este caso em concreto, de 2 em 2 anos, não havendo como tal informação do que ocorre num espaço inferior a esse período, o que justifica o gráfico ser caracterizado por marcadores pontuais espaçados equidistantemente no tempo.

Observando a Figura 3.2, constata-se ainda a tendência natural de no período de 80 anos, o estado da ponte se aproximar do pior estado de condição (E5), sem a ponte ter sofrido qualquer tipo de operação de manutenção ao longo do tempo estipulado.

3.5 Processo de Markov em tempo contínuo

O processo de Markov em tempo discreto, assumindo períodos constantes de inspeção para todas as pontes, apesar de pouco realista é muitas vezes adoptado em agências de gestão de pontes, devido aos cálculos inerentes serem bem mais simples que num processo contínuo, eliminando-se a complexidade computacional e simplificando-se o processo de decisão (Kallen e Van Noortwijk, 2006). Contudo, na prática as inspeções muito dificilmente são executadas em intervalos constantes de tempo e, em alguns países como Portugal até pelo contrário, onde não há de facto uma periodicidade efectiva nas inspeções.

Deste modo, para que se possa ter um eficiente modelo de previsão do desempenho baseado na metodologia markoviana, é necessário considerar o processo em tempo contínuo e não em tempo discreto. A principal diferença do processo de Markov contínuo no tempo para o processo discreto no tempo, é que as probabilidades de transição podem ocorrer em intervalos de tempo não periódicos, ou seja, ao contrário do processo de Markov em tempo discreto, o processo em tempo contínuo permite a ocorrência de transições numa escala de tempo contínua (Kallen e Van Noortwijk, 2006; Ng e Moses, 1999; Yang *et al.*, 2009).

3.5.1 Modelo de deterioração

Como referido no parágrafo 3.4.1, num processo em tempo discreto, o objectivo passa por estimar a matriz P que melhor se adapta a um inventário desse tipo. Num processo contínuo no tempo, a optimização do modelo passa por estimar uma matriz intensidade Q , que fisicamente significa uma matriz de taxas de transição (independentes de Δt) e que se relaciona directamente com qualquer matriz de Markov P . A metodologia de cálculo de uma matriz P , segue então a seguinte formulação (Bladty e Sorensen, 2009; Kalbfleisch e Lawless, 1985; Kallen e Van Noortwijk, 2006):

$$P_{\Delta t} = \exp(Q \times \Delta t) \quad (3.18)$$

A matriz P é a solução da equação diferencial de primeira ordem denominada por equação de Chapman–Kolmogorov (Kallen e Van Noortwijk, 2006):

$$\frac{\partial}{\partial t} P_{\Delta t} = P_{\Delta t} Q \quad (3.19)$$

A matriz markoviana P é determinada a partir de uma matriz intensidade Q com a mesma dimensão. Assumindo que o processo de deterioração é contínuo e que devido à deterioração, não pode ocorrer melhoria do estado de condição, se o modelo de avaliação de pontes prever 5 diferentes estados de condição, então a matriz Q é de dimensão 5 e tem a seguinte forma:

$$Q = \begin{bmatrix} -\theta_1 & \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\theta_2 & \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\theta_3 & \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\theta_4 & \theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

sendo,

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{12} \\ q_{23} \\ q_{34} \\ q_{45} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

em que a matriz intensidade Q satisfaz as seguintes condições (Kalbfleisch e Lawless, 1985):

1. $q_{ij} \geq 0$ para $j - i = 1$
2. $q_{ii} = - \sum_{j \neq i} q_{ij}$ com $i = 1, \dots, k$ sendo k o número total de estados de condição
3. $q_{ij} = 0$ para $i > j$
4. $q_{ij} = 0$ para $j - i > 1$
5. $q_{ij} = 0$ para $i, j = k$

3.5.1.1 Estimativa da matriz intensidade Q

O objectivo passa por obter θ_i correspondente à matriz Q , de modo a que se possa calcular com o máximo rigor possível e para qualquer intervalo de tempo, uma matriz markoviana P . Os valores de θ_i são estimados mediante uma base de dados, correspondente a um historial de inspecções de um vasto conjunto de pontes de características semelhantes.

Foi criada uma base de dados aleatória referente a 151 pontes, cada uma com a realização de duas, três ou quatro inspecções espaçadas por diferentes intervalos de tempo. No decorrer da história de uma ponte, é comum ocorrer uma melhoria do estado de condição de uma inspecção para a seguinte, associada a operações de manutenção realizadas e, por isso, na base de dados criada reproduziu-se esta situação. Como neste capítulo pretende-se estudar o processo de deterioração sem acções de manutenção, então o que sucede aquando da constatação de um aumento do desempenho, é que o registo da ponte é dividido num registo de duas pontes, a partir da inspecção que revelou a melhoria do estado de condição.

Como exemplo, considere-se uma Ponte A com um historial de quatro inspecções apresentado na Tabela 3.3.

Como se pode constatar, a determinada altura na Tabela 3.3 a ponte A é reabilitada do estado 3 para o estado 2. Então o procedimento que se efectua é dividir a ponte A em duas pontes, como se apresenta na Tabela 3.4.

Tabela 3.3: Exemplo de uma ponte com quatro inspeções

Ponte	Instante (anos)	Condição
A	31,28042	3
A	32,31425	3
A	36,35135	2
A	39,35131	3

Tabela 3.4: Divisão da Ponte A da Tabela 3.3 em duas pontes

Ponte	Instante (anos)	Condição
A1	31,28042	3
A1	32,31425	3
A2	36,35135	2
A2	39,35131	3

E assim, têm-se duas pontes A1 e A2 com um processo de deterioração sem qualquer melhoria do estado de condição. Se porventura, uma ponte com três registos de inspeções indicasse uma melhoria do estado de condição, como na Tabela 3.5, então o procedimento é análogo ao explicado para quatro inspeções (Tabela 3.6). No entanto, a ponte B2 não tem qualquer utilidade para a elaboração do modelo, pois é necessário que uma ponte possua pelo menos duas inspeções para que se tenha um intervalo de tempo Δt , aproveitando-se neste caso apenas a ponte B1.

Tabela 3.5: Exemplo de uma ponte com três inspeções

Ponte	Instante (anos)	Condição
B	13,77603	2
B	18,66346	3
B	22,64135	2

Tabela 3.6: Divisão da Ponte B da Tabela 3.5 em duas pontes

Ponte	Instante (anos)	Condição
B1	13,77603	2
B1	18,66346	3
B2	22,64135	2

Deste modo, se o registo de pontes criado foi de 151 pontes, ao aplicar este procedimento às pontes que apresentam melhoria do estado de condição, então o inventário a

utilizar passa a ter 183 pontes. Na Tabela 3.7 encontra-se uma amostra do inventário correspondente a nove pontes. A tabela com a totalidade das pontes é apresentada no Anexo A.

Tabela 3.7: Exemplo de pontes pertencentes ao inventário utilizado para a elaboração do modelo de deterioração (Anexo A)

Ponte	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição	Instante (Anos)	Condição
1	3,1072	1	3,4488	1	5,2316	2
2	10,6421	1	17,3616	3	-	-
3	2,6416	1	3,7634	1	4,899	1
...
96	47,0065	3	47,7734	3	-	-
97	20,6273	3	25,8513	4	-	-
98	6,667	3	11,445	3	16,6878	5
...
181	24,4539	5	30,4267	5	36,6414	5
182	48,8959	5	54,5505	5	-	-
183	60,6841	4	64,8414	4	-	-

Optimização de Q pelo método de Jackson (2007)

A partir do inventário apresentado no Anexo A, segundo Jackson (2007), uma abordagem para o cálculo de θ_i pode ser feita da seguinte forma:

$$\theta_i = q_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum \Delta t_i} \quad (3.22)$$

em que θ_i e q_{ij} representam a taxa probabilística de transição entre estados consecutivos, n_{ij} o número de elementos que transitou do estado i para o estado j e $\sum \Delta t_i$ o somatório dos intervalos de tempo entre observações, cujo estado inicial é i .

Aplicando este processo para todos os valores de θ_i , obtiveram-se os seguintes resultados:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1472 \\ 0,0987 \\ 0,1065 \\ 0,0828 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

E, por conseguinte, a matriz intensidade Q é:

$$Q = \begin{bmatrix} -0,1472 & 0,1472 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0987 & 0,0987 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,1065 & 0,1065 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0828 & 0,0828 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Os valores estipulados de θ_i que formam a matriz Q , são fundamentais para definir a eficiência do modelo utilizado. Essa eficiência é medida recorrendo ao cálculo da verosimilhança, que indica a distância entre a realidade e o previsto pelo modelo, sendo o modelo tanto melhor quanto menor for essa distância. Considerando N o número total de pontes, M o número total de intervalos de tempo para cada ponte e P_{ij} a probabilidade da estrutura transitar do estado i para o estado j , a verosimilhança V calcula-se por (Kalbfleisch e Lawless, 1985):

$$V = \prod_{\text{pontes}=1}^N \prod_{\text{transições}=1}^M P_{ij} \quad (3.25)$$

Relativamente ao número de intervalos de tempo, se uma ponte por exemplo apresentar três inspeções, então equivale a ter dois períodos Δt e, portanto, $M = 2$.

É possível ainda simplificar a equação 3.25 para um somatório, através de propriedades logarítmicas. Desde modo, a verosimilhança para um somatório traduz-se na seguinte expressão genérica:

$$V = \sum_{\text{pontes}=1}^N \sum_{\text{transições}=1}^M \ln P_{ij} \quad (3.26)$$

Este método soma por cada ponte o logaritmo da probabilidade no modelo, relativamente ao(s) acontecimento(s) observado(s). Utilizando a matriz Q da equação 3.24 e o historial de inspeções do Anexo A, calculou-se o valor da verosimilhança sendo gerada uma matriz P por cada acontecimento das 183 pontes.

Para exemplificar a explicação acima descrita, vem em seguida a aplicação do método a duas pontes do inventário, uma com duas inspeções e outra com três. São elas respectivamente Ponte 4 e Ponte 102, cujo registo de inspeções é observável na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Exemplo de duas pontes do inventário com respectivas inspeções e intervalos de tempo

Ponte	Instante	Condição	Instante	Condição	Δt_1	Instante	Condição	Δt_2
4	20,741	1	23,013	1	2,2724	-	-	-
102	41,828	3	45,877	4	4,0496	50,8976	5	5,0202

Sabendo que a matriz Q (equação 3.24) é única e é utilizada para o cálculo das matrizes probabilísticas de Markov de todas as pontes, então o elemento variável da equação é Δt e para estes dois elementos, através da equação 3.18, obtêm-se as seguintes matrizes P :

Ponte 4 com transição 1-1:

$$P_{\Delta t_1=2,2724} = \exp(Q \times 2,2724) = \begin{bmatrix} 0,7157 & 0,2531 & 0,0287 & 0,0024 & 0,0001 \\ 0 & 0,7991 & 0,1776 & 0,0218 & 0,0015 \\ 0 & 0 & 0,7850 & 0,1952 & 0,0198 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8285 & 0,1715 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Como o estado de condição inicial da ponte 4 é 1 e permaneceu o mesmo após o respectivo intervalo de tempo, então a probabilidade que vai contribuir para o somatório referente à verosimilhança é P_{11} , com $\ln(0,7157)$.

Ponte 102 com transição 3-4:

$$P_{\Delta t_1=4,0496} = \exp(Q \times 4,0496) = \begin{bmatrix} 0,5510 & 0,3629 & 0,0741 & 0,0110 & 0,0010 \\ 0 & 0,6705 & 0,2638 & 0,0584 & 0,0073 \\ 0 & 0 & 0,6497 & 0,2941 & 0,0562 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7151 & 0,2849 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Analogamente à situação anterior, para este caso a matriz referente à Ponte 102 para a transição de estado 3 para 4, contribui com a probabilidade P_{34} para a verosimilhança ou seja, o valor de $\ln(0,2941)$.

Ponte 102 com transição 4-5:

$$P_{\Delta t_2=5,0202} = \exp(Q \times 5,0202) = \begin{bmatrix} 0,4776 & 0,3996 & 0,1017 & 0,0189 & 0,0022 \\ 0 & 0,6093 & 0,2961 & 0,0818 & 0,0128 \\ 0 & 0 & 0,5859 & 0,3326 & 0,0815 \\ 0 & 0 & 0 & 0,6599 & 0,3401 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Esta matriz diz respeito à segunda transição que ocorre na Ponte 102. Utiliza-se P_{45} , com $\ln(0,3401)$.

Este procedimento é então aplicado às 183 pontes, onde depois são somados todos os valores para obter a verosimilhança V . O valor de V calculado com a otimização da matriz Q feita de acordo com Jackson (2007), foi de -152,1403. O sinal negativo do valor de V , ocorre pelo facto das parcelas que entram para o somatório serem logaritmos de valores entre 0 e 1.

Optimização computacional de Q pela maximização da verosimilhança

Segundo Jackson (2007), o valor da verosimilhança obtido foi como já referido de -152,1403. No entanto, através de funções de optimização em Matlab[®], é possível optimizar de forma ainda mais eficiente o resultado através da maximização da verosimilhança, por alteração de θ_i . É necessário estabelecer a matriz intensidade Q que tome a forma da equação 3.20 e que respeite as propriedades mencionadas no parágrafo 3.5.1, principalmente a propriedade 1. Para tal, importa usar uma função de optimização em Matlab[®] que crie uma restrição aos valores de θ_i para que estes nunca sejam inferiores a zero. Essa função denomina-se *fmincon* (*constrained nonlinear minimization*). Basicamente o que esta ferramenta faz é determinar o valor mínimo de uma função de várias variáveis, começando por uma estimativa inicial. Relativamente a este caso, a função *fmincon* estima a matriz Q que melhor se adapta ao inventário, no sentido de que $|V|$ seja o menor possível. Como já se viu, o resultado da verosimilhança é um valor negativo, razão pela qual se procura a máxima verosimilhança, o que corresponde a minimizar $|V|$.

Após aplicada esta função, foram obtidos os seguintes resultados de θ_i :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2966 \\ 0,1428 \\ 0,1746 \\ 0,0950 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

O que origina a seguinte matriz Q :

$$Q = \begin{bmatrix} -0,2966 & 0,2966 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,1428 & 0,1428 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,1746 & 0,1746 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0950 & 0,0950 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

De notar que, para utilizar a função de optimização *fmincon*, é necessário fornecer ao programa uma estimativa inicial de θ_i , que podem ser quaisquer valores entre 0 e 1. Deste modo, uma vez que já se tinha obtido uma boa estimativa de θ_i pelo método de Jackson (2007), então para que o processo computacionalmente seja mais rápido, foram esses valores de θ_i que se usaram para criar o ponto de partida da função *fmincon*. Deste modo, a partir desta matriz Q e aplicando o método da máxima verosimilhança, resultou que $V = -143,3492$

A matriz Q resultante em 3.31 é, portanto, a matriz óptima que fornece o menor valor de $|V|$ possível, tendo como base o registo de inspecções utilizado.

3.5.1.2 Eficiência do modelo

Como já referido, a base de dados apresentada em Anexo A, diz respeito a um historial de inspecções. Como tal, os resultados observados relativamente aos estados de condição aquando dessas inspecções, correspondem a acontecimentos reais e isso, traduz-se evidentemente em valores de probabilidades $P_{ij} = 1$, sendo i e j definidos consoante a situação que tiver ocorrido. Empiricamente é fácil entender que, quanto menor for o valor de $|V|$, mais o modelo se consegue aproximar desta realidade. Em condições extremas, o ideal seria um valor de $V = 0$, o que é claramente impossível, tendo em conta que seria necessário que o valor com que cada matriz contribui para o somatório da verosimilhança fosse 1, pois $\ln(1) = 0$ e então o somatório correspondente a V seria portanto zero.

Sabendo que um valor de verosimilhança igual a zero seria o resultado ideal, porque significava que o modelo corresponderia exactamente à realidade, um valor de $V = -143,3492$ é no entanto um excelente resultado. A forma de se provar isso de uma maneira explícita e de fácil entendimento, é ser feita uma leitura no modelo do número de pontes em cada estado de condição, após cada intervalo de tempo e comparar estes dados realizando a mesma leitura por observação do registo de inspecções. O registo de inspecções constituído por um total de 183 pontes, apresenta 238 acontecimentos, com os respectivos intervalos de tempo Δt .

No início de cada intervalo de tempo entre duas inspeções consecutivas, contabilizou-se o número total de diferentes estados de condição observados:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 31 \\ 50 \\ 61 \\ 58 \\ 38 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Após cada intervalo de tempo Δt , o registo de inspeções apresenta o seguinte resultado do número total de estados de condição:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12 \\ 46 \\ 48 \\ 68 \\ 64 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Fazendo a contabilização dos estados de condição finais que o modelo fornece, obtêm-se os seguintes resultados:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12,4948 \\ 44,9752 \\ 48,0845 \\ 68,5246 \\ 63,9209 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Para chegar a estes últimos valores na leitura do modelo, é realizado um somatório, em que cada uma das matrizes P calculadas contribui com uma das suas linhas. Tome-se como exemplo, as matrizes correspondentes às pontes 4 e 102 da Tabela 3.8.

Ponte 4 com transição 1-1:

$$P_{\Delta t_1=2,2724} = \exp(Q \times 2,2724) = \begin{bmatrix} 0,5142 & 0,4084 & 0,0675 & 0,0094 & 0,0005 \\ 0 & 0,7260 & 0,2244 & 0,0461 & 0,0035 \\ 0 & 0 & 0,6760 & 0,2898 & 0,0342 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8081 & 0,1919 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

O estado de condição inicial da Ponte 4 é 1. Então, será a primeira linha da sua matriz P correspondente ao seu estado final que vai contribuir para o somatório:

$$\begin{array}{ccccc} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\begin{array}{ccccc} 0,5142 & 0,4084 & 0,0675 & 0,0094 & 0,0005 \end{array} \right] \end{array}$$

Ponte 102 com transição 3-4:

$$P_{\Delta t_1=4,0496} = \exp(Q \times 4,0496) = \begin{bmatrix} 0,3009 & 0,5014 & 0,1530 & 0,0403 & 0,0044 \\ 0 & 0,5609 & 0,3043 & 0,1174 & 0,0174 \\ 0 & 0 & 0,4931 & 0,4114 & 0,0955 \\ 0 & 0 & 0 & 0,6806 & 0,3194 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

A ponte 102 tem três inspeções e, como tal, dois intervalos Δt . Para Δt_1 , o estado inicial da ponte é 3 e assim, a linha a retirar correspondente ao estado final é a terceira:

$$\begin{array}{ccccc} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\begin{array}{ccccc} 0 & 0 & 0,4931 & 0,4114 & 0,0955 \end{array} \right] \end{array}$$

Ponte 102 com transição 4-5:

$$P_{\Delta t_2=5,0202} = \exp(Q \times 5,0202) = \begin{bmatrix} 0,2256 & 0,5066 & 0,1936 & 0,0649 & 0,0093 \\ 0 & 0,4883 & 0,3235 & 0,1581 & 0,0301 \\ 0 & 0 & 0,4162 & 0,4485 & 0,1353 \\ 0 & 0 & 0 & 0,6207 & 0,3793 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Já o estado de condição inicial da ponte 102 para Δt_2 é 4, então retira-se a quarta linha correspondente à sua matriz P :

$$\begin{array}{ccccc} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\begin{array}{ccccc} 0 & 0 & 0 & 0,6207 & 0,3793 \end{array} \right] \end{array}$$

Note-se que as matrizes P correspondentes à ponte 4 e 102, apresentadas respectivamente nas equações 3.35, 3.36 e 3.37, são necessariamente diferentes das mostradas nas equações 3.27, 3.28 e 3.29 pois, neste caso, a matriz Q foi obtida pelo método da máxima verosimilhança e não pelo método de Jackson (2007).

Aplicando este processo às transições de todas as pontes envolvidas e executando o somatório com todas as linhas das respectivas matrizes, obtêm-se os resultados apresentados na equação 3.34. Comparando com os valores correspondentes à leitura dos estados de condição finais da base de dados (equação 3.33), facilmente se comprova que o modelo consegue probabilisticamente reproduzir de forma muitíssimo eficiente o historial de inspecções utilizado.

3.5.1.3 Estimativa do tempo de permanência nos vários estados de condição

Segundo Jackson (2007), a partir da matriz Q , é possível estimar o tempo médio T_i que uma ponte do histórico de inspecções permanece num determinado estado de condição, antes de transitar para o seguinte. Obtêm-se genericamente por:

$$T_i = \frac{1}{\theta_i} \quad (3.38)$$

sendo $i = 1, 2, \dots, k$ estados de condição - 1

Aplicando a equação 3.38 à matriz Q final da equação 3.31, surgem os resultados demonstrados na Figura 3.3. É possível verificar que uma ponte do histórico de inspecções que esteja no melhor estado de condição (estado 1), passa mais rápido para o estado seguinte do que qualquer outro estado de condição. De notar também que o maior tempo de permanência antes da transição ocorre no estado 4, o que revela que em média as pontes demoram a transitar para o estado que indica o maior nível de deterioração, ou seja, o estado 5.

Como o objectivo da criação deste modelo de Markov contínuo no tempo é a previsão do desempenho futuro de pontes existentes, partindo de um historial de inspecções, estes resultados revelam-se importantes no sentido de fornecer ao utilizador uma estimativa do

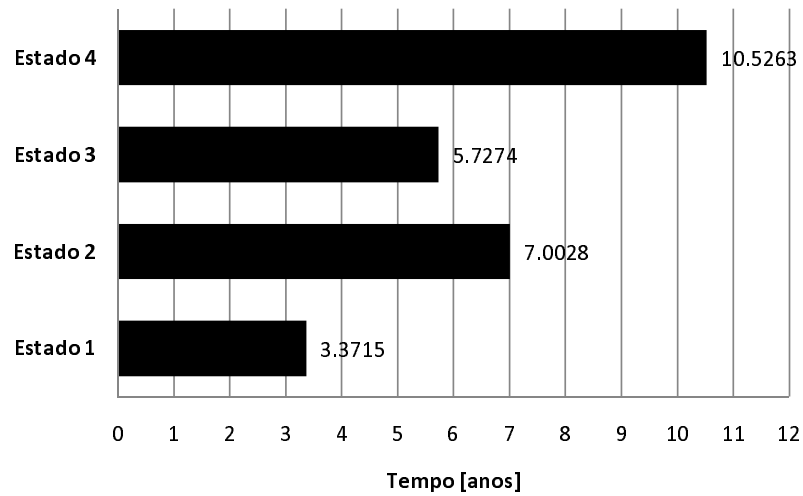


Figura 3.3: Estimativa do tempo de permanência em cada estado de condição

tempo que futuramente estas pontes permanecerão em determinado estado de condição, antes de transitarem para o seguinte.

3.5.1.4 Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo

Pela equação 3.18 e, tendo obtido a matriz Q óptima para o inventario adoptado, importa compreender a evolução das probabilidades de transição P_{ij} ao longo de um período de tempo. Optou-se por efectuar esse estudo para um horizonte de 80 anos, estipulando o estado de condição de uma ponte no presente. Assumindo que essa ponte se pode encontrar entre o estado 1 e o estado 5 inclusive, surgem os resultados ilustrados nas Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

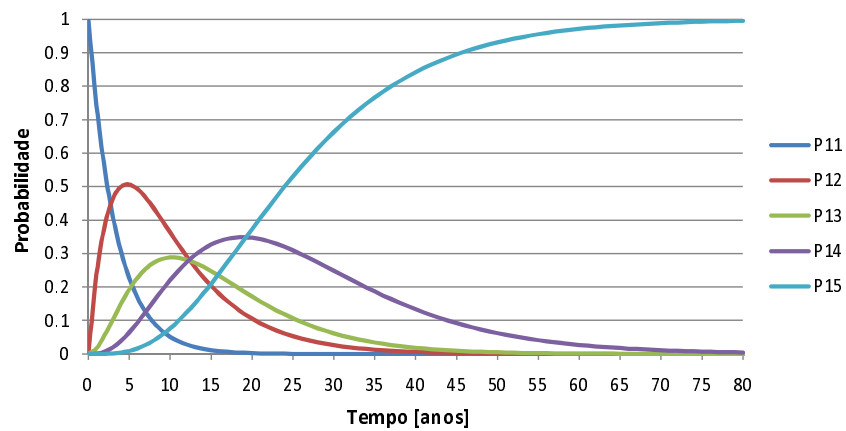


Figura 3.4: Evolução de P_{ij} para estado de condição inicial 1

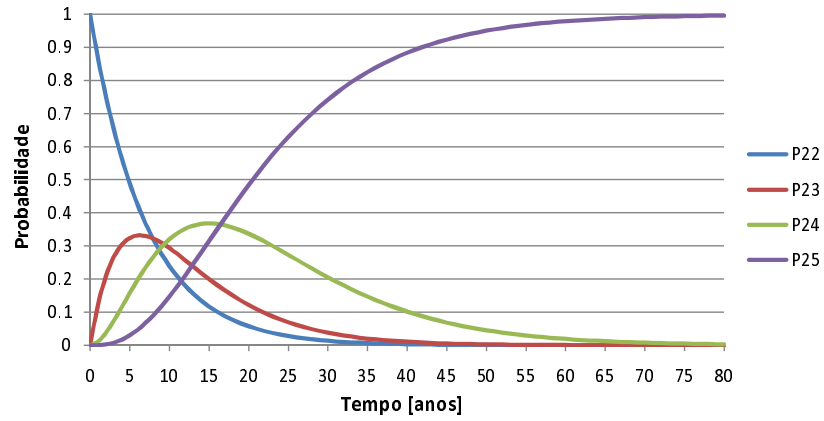


Figura 3.5: Evolução de P_{ij} para estado de condição inicial 2

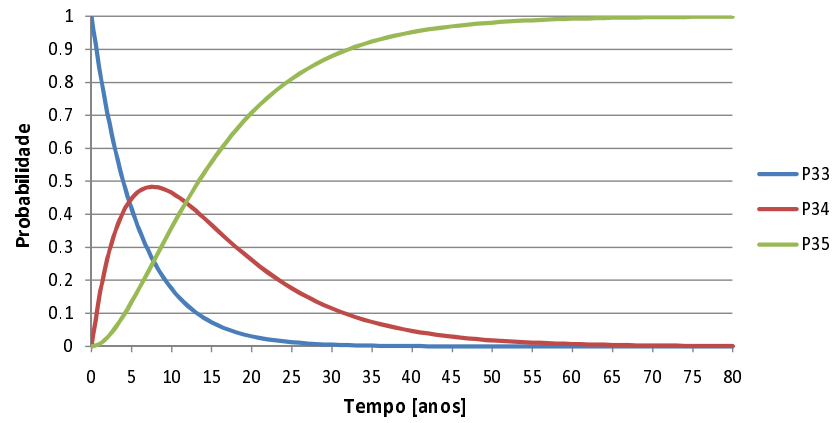


Figura 3.6: Evolução de P_{ij} para estado de condição inicial 3

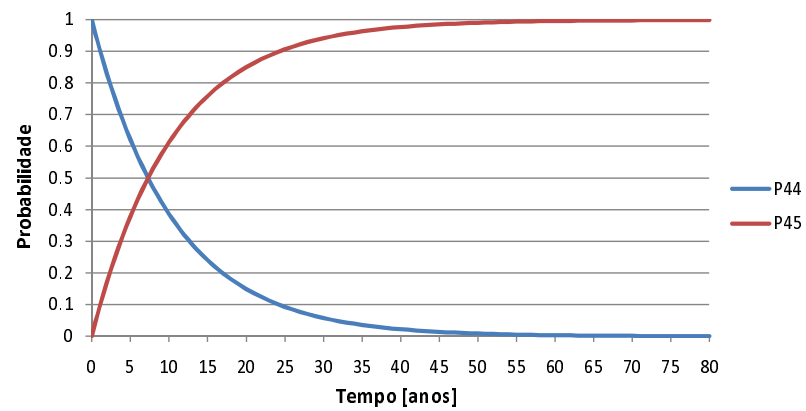


Figura 3.7: Evolução de P_{ij} para estado de condição inicial 4

Por observação das Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 constata-se o seguinte:

- Independentemente do estado inicial observado, a probabilidade da ponte permanecer nesse mesmo estado, decresce continuamente ao longo dos anos, atingindo uma probabilidade nula ao fim de alguns anos. A probabilidade P_{ii} nunca revela tendência para aumentar, pois isso indicaria que a ponte havia sofrido uma operação de manutenção;
- As probabilidades P_{ij} com $i \neq j$ e $j \neq 5$, apresentam todas uma tendência de subida até determinado ponto, onde gradualmente começam a diminuir. Esta inversão deve-se ao facto de atingido determinado tempo, ser cada vez mais provável a ponte em questão chegar ao estado de condição $j + 1$;
- Independentemente do estado inicial da ponte, verifica-se que a probabilidade de uma ponte atingir o estado de condição 5 (último estado de condição), cresce continuamente ao longo de todo o percurso, pois trata-se do estado de condição mais comprometedor;
- Não foi elaborado um gráfico com a evolução de uma probabilidade P_{55} , pois o estado 5 é o estado absorvente do processo de Markov, ou seja, uma vez atingido esse estado numa ponte, não mais sofre alterações. Uma ilustração gráfica de P_{55} , não seria mais do que uma linha recta de probabilidade 1 ao longo de todo o período.

3.5.1.5 Aplicação do modelo de deterioração a uma rede de pontes

Com a matriz Q óptima que reflecte o historial de inspecções do inventário utilizado, é possível então aplicar o modelo de previsão do desempenho a uma rede viária de pontes, baseado nos processos de Markov. Para tal, basta que estas apresentem inspecções que indiquem o estado de condição actual. Ora, tendo o estado de condição presente deste conjunto de pontes, a intenção passa por aplicar o modelo desenvolvido prevendo o estado de condição das pontes no futuro e para o horizonte que se pretender. Assim sendo, criou-se uma lista de 54 pontes (Tabela 3.9), cada uma com a respectiva classificação relativamente ao seu estado de condição.

Tendo a lista de pontes não é possível, no entanto, aplicar o modelo de previsão do desempenho directamente. Isto porque, as inspecções que surgem nesta lista são de facto as mais recentes, mas não correspondem exactamente ao dia em que se vai aplicar o modelo e, para além disso, seguramente não foram todas realizadas na mesma altura. Isto significa que o período entre o dia em que se fez a mais recente inspecção de cada ponte, até ao

dia em que se vai aplicar o modelo à globalidade da rede de pontes, pode ser mesmo de vários meses e corresponde a um intervalo de tempo a considerar. Então, em primeiro lugar, estipulou-se uma data referente à última inspeção de cada uma das pontes, como se visualiza na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Lista de pontes em que foi aplicado o modelo de deterioração

Ponte	Condição	Data de Inspeção	Ponte	Condição	Data de Inspeção
1	1	02-Maio-2010	28	3	03-Janeiro-2009
2	3	24-Fevereiro-2010	29	3	30-Novembro-2010
3	1	12-Janeiro-2010	30	4	26-Novembro-2010
4	1	14-Setembro-2009	31	3	07-Maio-2010
5	1	01-Agosto-2010	32	5	28-Maio-2009
6	1	30-Agosto-2009	33	5	11-Junho-2010
7	1	11-Novembro-2010	34	4	13-Julho-2009
8	1	24-Julho-2009	35	4	15-Fevereiro-2009
9	2	02-Março-2009	36	4	20-Setembro-2009
10	4	20-Dezembro-2009	37	4	04-Maio-2010
11	1	23-Junho-2010	38	3	14-Dezembro-2009
12	2	29-Abril-2010	39	4	23-Outubro-2010
13	2	22-Maio-2009	40	4	28-Novembro-2010
14	2	01-Janeiro-2010	41	4	01-Março-2010
15	3	11-Outubro-2010	42	4	16-Abril-2009
16	2	24-Novembro-2009	43	4	19-Dezembro-2009
17	2	25-Julho-2010	44	4	21-Março-2010
18	2	28-Junho-2009	45	4	15-Agosto-2010
19	2	22-Agosto-2010	46	5	17-Junho-2010
20	1	10-Fevereiro-2009	47	4	02-Abril-2010
21	1	26-Dezembro-2009	48	4	22-Junho-2009
22	2	04-Maio-2010	49	5	08-Janeiro-2010
23	4	09-Março-2010	50	5	16-Agosto-2010
24	3	19-Junho-2010	51	5	18-Abril-2009
25	4	21-Abril-2009	52	5	03-Novembro-2010
26	3	07-Julho-2010	53	5	24-Outubro-2009
27	4	24-Agosto-2009	54	5	02-Setembro-2010

Em segundo lugar, quando o utilizador quiser então aplicar o modelo à rede de pontes, o programa questiona-o sobre qual a data em que este se encontra. Considerou-se como

data de referência o dia 15 de Dezembro de 2010, logo foi calculado um vector com o intervalo de tempo (em anos), entre esta data e a data referente à mais recente inspecção de cada ponte da rede. Genericamente, calcula-se do seguinte modo:

$$\Delta t \text{ de actualização} = \frac{t_m - t_{ui}}{365} \quad (3.39)$$

sendo t_m a data de aplicação do modelo e t_{ui} a data referente à última inspecção da respectiva ponte.

Com este Δt de actualização para cada ponte, é calculada uma matriz P pela equação 3.18. Com este processo, é actualizado o vector probabilidades de estado de condição referente à inspecção mais recente, para o vector probabilidades de estado de condição no dia 15 de Dezembro de 2010. Assim, é este o vector introduzido no programa para a previsão do desempenho futuro da ponte. Para uma melhor interpretação, segue-se a exemplificação deste procedimento para as Pontes 1 e 2, provenientes da Tabela 3.9.

Tabela 3.10: Exemplo de duas pontes da Tabela 3.9

Ponte	Condição	Data de inspecção
1	1	02-Maio-2010
2	3	24-Fevereiro-2010

Observando os dados mostrados na Tabela 3.10, significa que o vector relativo ao estado de condição, aquando das respectivas inspecções toma o seguinte aspecto:

Ponte 1 :

$$p(t_{ui}) = \begin{matrix} & E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\right. & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (3.40)$$

Ponte 2 :

$$p(t_{ui}) = \begin{matrix} & E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\right. & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (3.41)$$

Como já mencionado, a data de referência adoptada para a aplicação do modelo de previsão do desempenho foi o dia 15 de Dezembro de 2010. É então feita a respectiva actualização:

Ponte 1:

$$\Delta t \text{ de actualização} = \frac{(('15 - Dezembro - 2010') - ('02 - Maio - 2010'))}{365} = 0,6219 \text{ anos} \quad (3.42)$$

$$P_{\Delta t=0,6219} = \exp(Q \times 0,6219) = \begin{bmatrix} 0,8316 & 0,1610 & 0,0071 & 0,0003 & 0,0000 \\ 0 & 0,9150 & 0,0805 & 0,0044 & 0,0001 \\ 0 & 0 & 0,8971 & 0,0999 & 0,0030 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9426 & 0,0574 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Estado de condição actualizado para “15-Dez-2010”:

$$p_{(t_m)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,8316 & 0,1610 & 0,0071 & 0,0003 & 0,0000 \\ 0 & 0,9150 & 0,0805 & 0,0044 & 0,0001 \\ 0 & 0 & 0,8971 & 0,0999 & 0,0030 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9426 & 0,0574 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8316 \\ 0,1610 \\ 0,0071 \\ 0,0003 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.44)$$

Ponte 2:

$$\Delta t \text{ de actualização} = \frac{(('15 - Dezembro - 2010') - ('24 - Fevereiro - 2010'))}{365} = 0,8055 \text{ anos} \quad (3.45)$$

$$P_{\Delta t=0,8055} = \exp(Q \times 0,8055) = \begin{bmatrix} 0,7874 & 0,2003 & 0,0117 & 0,0006 & 0,0000 \\ 0 & 0,8912 & 0,1012 & 0,0072 & 0,0002 \\ 0 & 0 & 0,8688 & 0,1262 & 0,0050 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9263 & 0,0737 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Estado de condição actualizado para “15-Dez-2010”:

$$p(t_m) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,7875 & 0,2003 & 0,0117 & 0,0006 & 0,0000 \\ 0 & 0,8913 & 0,1012 & 0,0072 & 0,0002 \\ 0 & 0 & 0,8688 & 0,1262 & 0,0050 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9263 & 0,0737 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,8688 \\ 0,1262 \\ 0,0050 \end{bmatrix}^T \quad (3.47)$$

Obtendo os vectores do estado de condição actualizados, basta multiplicar os mesmos pela matriz P referente ao tempo futuro que se pretende e pelo vector coluna dos estados. Por conseguinte, obtém-se o estado de condição final relativo a essa época:

Ponte 1:

$$p(t_f) = \begin{bmatrix} 0,8316 & 0,1610 & 0,0071 & 0,0003 & 0 \end{bmatrix} \times P_{\Delta t} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Ponte2:

$$p(t_f) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,8688 & 0,1262 & 0,0050 \end{bmatrix} \times P_{\Delta t} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Este processo foi, portanto, aplicado a toda a rede de pontes durante um período de 80 anos. Calculou-se no seu seguimento a média e o desvio padrão, relativamente aos estados de condição de todas as pontes ao longo deste período de tempo, como ilustrado na Figura 3.8.

Observando a Figura 3.8, pode-se constatar o seguinte:

- Relativamente à média dos estados de condição de todas as pontes representada pela curva de deterioração média, é possível verificar que as 54 pontes da rede aquando

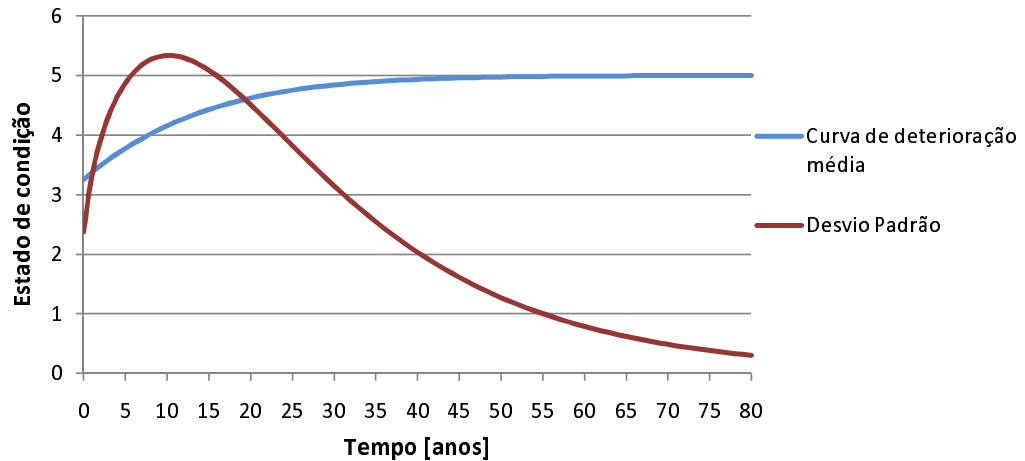


Figura 3.8: Previsão do desempenho da rede de pontes

da aplicação do modelo, encontravam-se em média no estado 3,25. Essa média de estado de condição, vai gradualmente e continuamente crescendo ao longo do período estudado, notando-se por volta do ano 50 a tendência da curva ficar tangente à linha a que corresponde o pior estado de condição, ou seja, o estado 5.

- Como é sabido, o desvio padrão mede a dispersão dos dados relativamente à média. O gráfico revela uma tendência de subida até determinado ponto, onde a partir do qual começa a decrescer continuamente, aproximando-se de zero no final do tempo de estudo. Significa que a grande maioria das pontes utilizadas, apresenta no ano 80 um estado de condição 5.

3.6 Conclusões

Neste capítulo foram adoptados processos de Markov para efectuar um estudo de previsão do desempenho de pontes existentes, baseados em resultados passados de inspecções feitas a pontes semelhantes. Primeiramente, foram explicadas em pormenor as propriedades da metodologia markoviana e como as matrizes de Markov podem indicar previsões sobre o estado de condição futuro das estruturas. Devido ao facto de alguns sistemas de gestão usarem modelos markovianos em tempo discreto, foram abordados neste capítulo esse tipo de modelos. Estes porém, apenas podem fornecer previsões futuras em intervalos de tempo discretos, uma vez que os dados estatísticos em que é baseada a estimativa das probabilidades de transição, são também igualmente discretos no tempo.

Um modelo de deterioração para ser rigoroso, deve ser elaborado com processos de Markov em tempo contínuo, pois na realidade o que acontece na maioria dos casos, é que os dados estatísticos existentes à disposição não ocorrem periodicamente, exigindo uma

modelação bem mais complexa. Para a elaboração do modelo de Markov contínuo, foi utilizado ficticiamente um registo de várias inspecções de pontes ao longo do tempo e otimizada uma matriz intensidade que reproduzisse matricialmente esse registo de inspecções, a ponto de poder ser aplicada a qualquer ponte existente no presente. Para a optimização da matriz intensidade, foram abordados dois métodos distintos: o método de Jackson (2007) e o método de maximização da verosimilhança. Depois de optimizada a matriz intensidade proveniente do método da maximização da verosimilhança, realizou-se a leitura no registo de inspecções do número de diferentes estados de condição observados após cada intervalo de tempo e realizou-se a mesma leitura aplicando o modelo de deterioração elaborado. Verificou-se que a matriz intensidade optimizada reproduz muito bem o registo de inspecções utilizado.

Com a matriz intensidade, estimou-se o tempo médio de permanência nos vários estados de condição e verificou-se que o estado 4 é o estado onde, em média, as estruturas ficam mais tempo antes de transitarem para o seguinte. Previu-se ainda a evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo e, por fim, aplicou-se o modelo de deterioração desenvolvido a uma rede viária fictícia, traçando-se uma curva de deterioração média e um desvio padrão que estimassem o nível de deterioração das pontes dessa rede.

Capítulo 4

Efeito das Acções de Manutenção

4.1 Introdução

A elaboração de um modelo de previsão da deterioração futura de uma rede pontes, dá ao gestor a oportunidade de planear convenientemente acções de manutenção a aplicar às estruturas, ao longo da sua vida útil. As pontes, para além de serem infra-estruturas de grande envergadura, são também as que têm um tempo de vida útil mais longo e, como tal, é imprescindível a realização de acções de manutenção antes do fim desse período.

Neste capítulo é inicialmente descrito como modelar estas acções de manutenção, tendo em consideração a modelação markoviana que foi utilizada anteriormente. Para tal, são criados cenários de manutenção preventivos e correctivos. Seguidamente, são adoptados cenários de manutenção de modo a poderem ser aplicados à rede de pontes estudada, sendo realizada posteriormente, uma análise e discussão à influência das diferentes estratégias de manutenção no desempenho das estruturas ao longo do tempo. Associada a este estudo, está inevitavelmente uma análise ao custos que as respectivas acções de manutenção proporcionam ao dono de obra.

4.2 Tipos de acções de manutenção

Segundo Neves (2005) e Neves e Frangopol (2005), dependendo do tempo de aplicação, as acções de manutenção podem ser baseadas no tempo ou no estado de condição. A aplicação de acções baseadas no tempo, está sujeita a um agendamento pré estabelecido e são independentes do estado de condição em que se encontra a estrutura. As acções de manutenção baseadas no estado de condição, são aplicadas apenas quando as estruturas atingem um estado considerado inaceitável, ao ponto de ser requerida a respectiva acção.

De acordo com Neves (2005) e Neves *et al.* (2006), as acções de manutenção do ponto de vista do seu efeito na deterioração das pontes, podem ser classificadas como preventivas ou correctivas. As acções de carácter preventivo são usualmente baseadas no tempo e resultam numa suspensão da deterioração durante um determinado período de tempo, mas sem efectuar uma melhoria na condição da ponte. Já as acções de manutenção correctivas, podem ser baseadas no tempo ou no estado, mas geralmente são baseadas no estado e têm um impacte mais significativo no desempenho da estrutura, incutindo uma efectiva melhoria no seu desempenho.

4.2.1 Manutenção preventiva baseada no tempo

Na manutenção preventiva baseada no tempo, três variáveis importam definir para a elaboração de um modelo: tempo da primeira aplicação de manutenção, t_{pa} , intervalo de tempo entre aplicações, Δt_a e tempo de duração das aplicações, t_{da} . Na Figura 4.1, ilustra-se o significado destas variáveis e o seu efeito na evolução da deterioração.

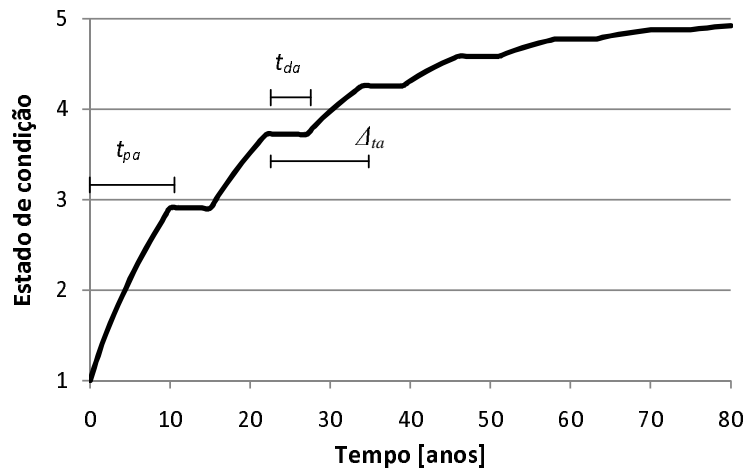


Figura 4.1: Deterioração associada a manutenção preventiva baseada no tempo

Considere-se, a título de exemplo, uma ponte nova no presente e, portanto, com estado inicial 1. Efectuou-se a previsão do desempenho num modelo com 5 diferentes estados de condição discretos e sem qualquer tipo de acção de manutenção aplicada, num ciclo de vida de 80 anos. Para tal, utilizou-se a equação 3.18 e a matiz intensidade óptima da equação 3.31. O resultado da previsão da deterioração da ponte ao longo do tempo encontra-se ilustrado graficamente na Figura 4.2.

Tendo em conta a curva de deterioração da Figura 4.2, considerem-se os cenários de manutenção preventiva baseada no tempo, sugeridos na Tabela 4.1 e cujos efeitos são ilustrados nas Figuras 4.3 e 4.4.

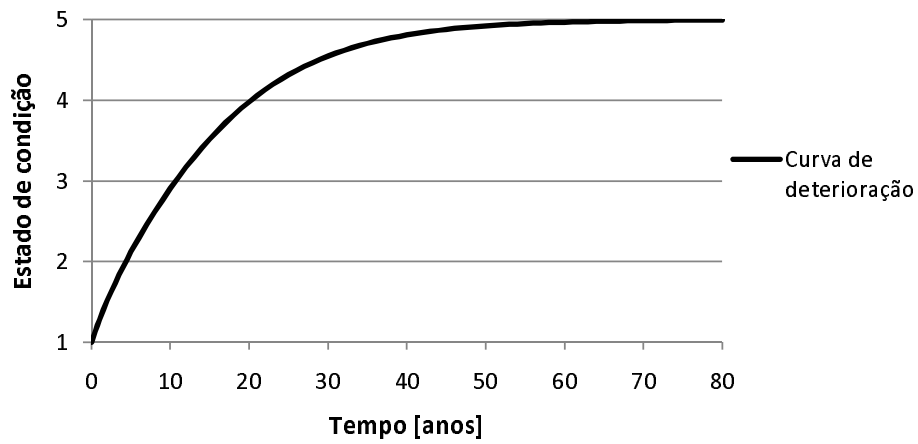


Figura 4.2: Deterioração de uma ponte ao longo do tempo

Tabela 4.1: Cenários associados a manutenções preventivas baseadas no tempo

Cenário	t_{pa}	Δt_a	t_{da}
A1	10	12	5
A2	10	5	5

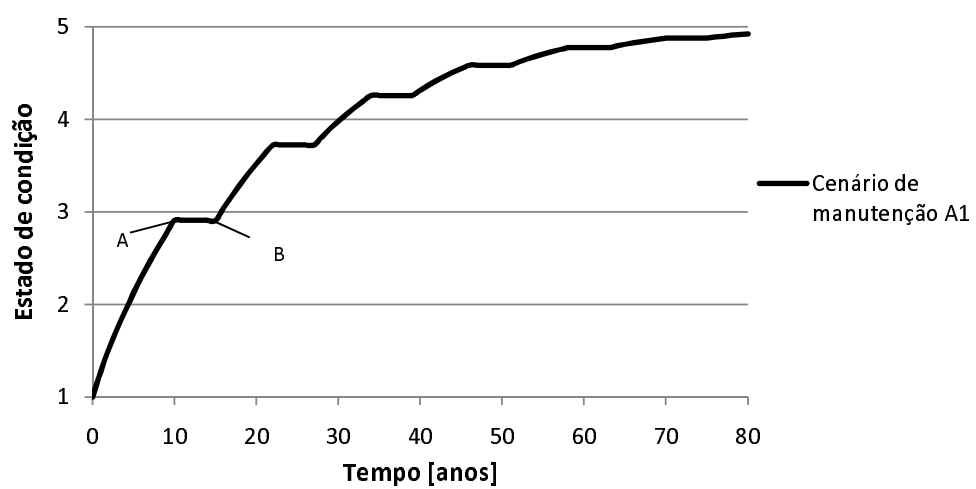


Figura 4.3: Deterioração da ponte associada ao cenário de manutenção A1

Relativamente ao cenário A1, ilustrado na Figura 4.3, pode-se observar o efeito que as acções de manutenção periódicas infligem na curva de deterioração. Os pontos A e B, delimitam um dos períodos t_{da} onde não ocorre deterioração, mantendo-se o estado de condição constante.

Em termos da formulação de Markov, o atraso na deterioração devido à acção de manutenção, calcula-se considerando que a matriz P não varia de instante para instante, ao longo de t_{da} . Por exemplo, na primeira aplicação da acção de manutenção da Figura 4.3, para calcular o estado de condição entre A e B, considere-se para o estado inicial o ponto A, em média com índice de condição de 2,91 e um vector de probabilidades de condição,

$$p(t_A) = \begin{matrix} & E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\right. & 0,05 & 0,36 & 0,29 & 0,22 & 0,08 \end{matrix} \quad (4.1)$$

Então, a matriz P a utilizar, é uma matriz identidade para qualquer intervalo de tempo entre A e um instante igual ou inferior a B. O estado de condição ao longo do tempo da duração da aplicação, calcula-se por:

$$C_{(A-B)} = \begin{bmatrix} 0,05 & 0,36 & 0,29 & 0,22 & 0,08 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} = 2,91 \quad (4.2)$$

Desta forma e, como se pode constatar, o índice de condição não varia ao longo da aplicação da manutenção preventiva.

Na figura 4.4, o cenário A2 ilustra uma situação em que o intervalo de tempo entre aplicações é igual ao tempo da duração de cada aplicação. Isso significa que, assim que uma aplicação de manutenção termina, imediatamente recomeça a seguinte e assim sucessivamente até ao fim do ciclo de vida estudado. Como consequência disto e, como se pode verificar, graficamente surge uma linha recta horizontal desde o instante da primeira aplicação até ao fim do ciclo de estudo.

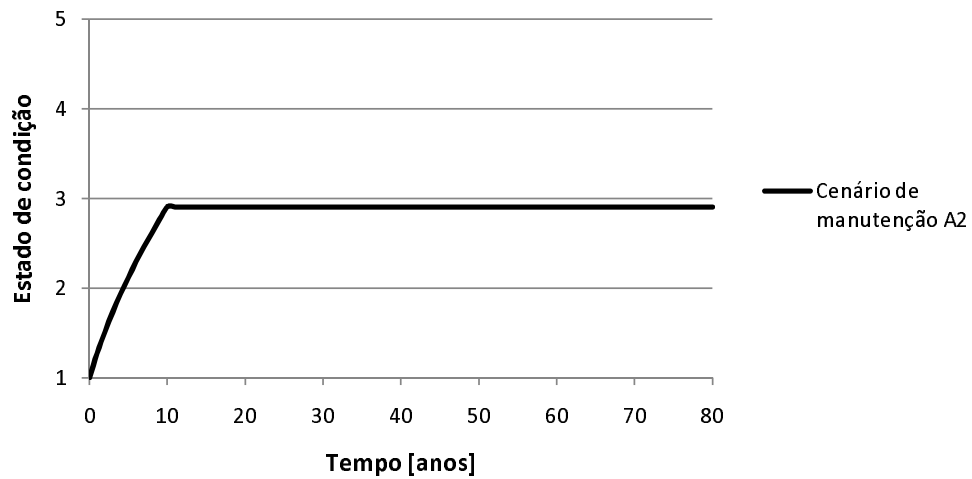


Figura 4.4: Deterioração da ponte associada ao cenário de manutenção A2

4.2.2 Manutenção correctiva baseada no tempo

Na manutenção correctiva baseada no tempo, para além de t_{pa} e Δ_{ta} já definidas, surge a variável C_{alvo} que indica o estado de condição que se pretende atingir no instante da aplicação da manutenção correctiva. Na Figura 4.5 ilustra-se o efeito destas variáveis na evolução da deterioração.

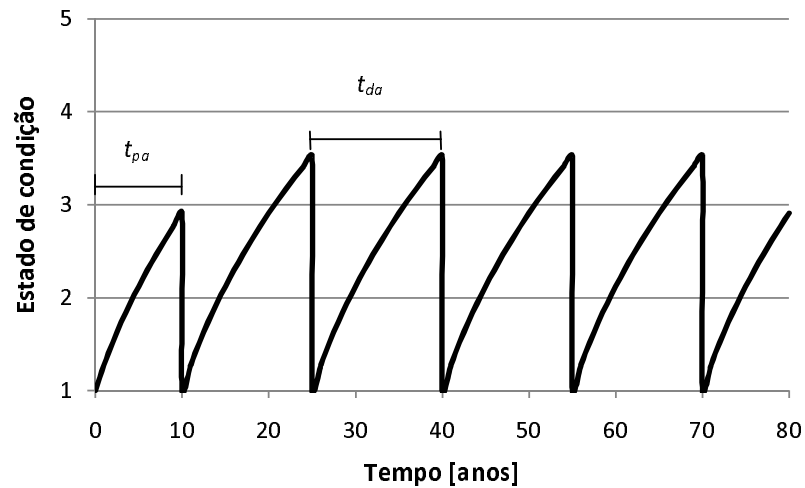


Figura 4.5: Deterioração associada a manutenção correctiva baseada no tempo

Tendo em conta a curva de deterioração ilustrada na Figura 4.2 tome-se, como exemplos, os cenários de manutenção correctiva baseada no tempo, vindos na Tabela 4.2 e ilustrados nas Figuras 4.6 e 4.7

Relativamente ao cenário A3 da Figura 4.6, o objectivo é que a ponte passe para o estado 1 cada vez que a respectiva acção de manutenção é aplicada. Aquando da aplicação

Tabela 4.2: Cenários associados a manutenções correctivas baseadas no tempo

Cenário	t_{pa}	Δt_a	C_{alvo}
A3	10	15	1
A4	10	15	3

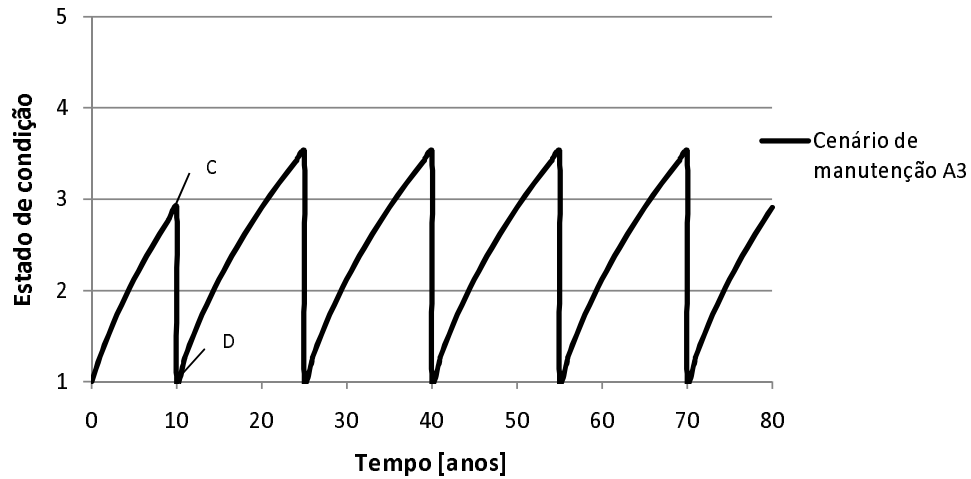


Figura 4.6: Deterioração da ponte associada ao cenário de manutenção A3

da primeira acção de manutenção correctiva (ano 10), encontra-se o ponto C, com índice de condição de 2,91 e um vector de probabilidades de condição,

$$p(t_C) = \begin{bmatrix} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ 0,05 & 0,36 & 0,29 & 0,22 & 0,08 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Deste modo, se o objectivo é que a ponte passe para o estado 1, então as probabilidades da ponte se encontrar em estados piores no ano 10, ou seja, estado 2,3,4 e 5 são transferidos para a probabilidade de estar no estado 1, o que resulta no seguinte vector de probabilidades de condição do ponto D:

$$p(t_D) = \begin{bmatrix} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Significa então que, para cada ocorrência de uma acção de manutenção correctiva desta natureza, a estrutura em média passa sempre para o estado 1,0:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} = 1,0 \quad (4.5)$$

No entanto, para um estado de condição alvo superior a 1, a situação é um pouco diferente como se verá de seguida.

Na Figura 4.7 está representado o impacte de uma acção de manutenção correctiva periódica, com estado de condição alvo 3. A título de exemplo, veja-se o ponto E com estado de condição 4,22 e um vector probabilidades de condição,

$$p(t_E) = \begin{bmatrix} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ 0,01 & 0,05 & 0,12 & 0,37 & 0,45 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

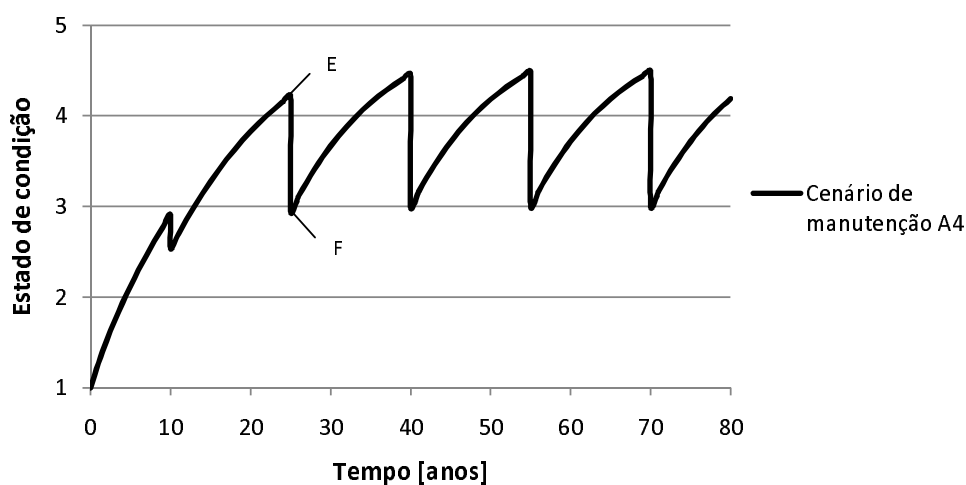


Figura 4.7: Deterioração da ponte associada ao cenário de manutenção A4

O estado de condição para o qual se pretende reabilitar a estrutura é o estado 3. O processo é feito num âmbito probabilístico e, analogamente ao exemplo anterior, a ponte neste caso não irá para o estado 3,0 no ponto F, pois apenas são transferidas para o estado de condição alvo as probabilidades referentes aos estados de condição piores, neste caso estado 4 e 5. Como o vector do ponto E tem probabilidade de estar no estado 1 e 2, então aquando da aplicação da acção de manutenção correctiva, o ponto F passa a ter o seguinte vector de probabilidades de condição:

$$p(t_F) = \begin{matrix} & E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ \left[\begin{array}{cccccc} 0,01 & 0,05 & 0,94 & 0 & 0 \end{array} \right] & & & & & \end{matrix} \quad (4.7)$$

O que resulta num estado de condição médio de:

$$\left[\begin{array}{cccccc} 0,01 & 0,05 & 0,94 & 0 & 0 \end{array} \right] \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} = 2,95 \quad (4.8)$$

E que, como se observa, corresponde a um valor inferior a 3,0.

4.2.3 Manutenção correctiva baseada no estado

Na manutenção correctiva baseada no estado, não existem variáveis temporais que definam o instante em que uma acção de manutenção é aplicada. Apenas é necessário definir o estado de condição a partir do qual se pretende reabilitar a estrutura (C_{reab}) e definir o respectivo estado para qual esta é reabilitada (C_{alvo}). Tendo em consideração a deterioração ilustrada na Figura 4.2, cenários exemplificativos de manutenção correctiva baseada no estado são sugeridos na Tabela 4.3 e ilustrados na Figura 4.8.

Tabela 4.3: Cenários associados a manutenções correctivas baseadas no estado

cenário	C_{reab}	C_{alvo}
A5	3	2
A6	4	2

Pelos dados fornecidos na Tabela 4.3, entende-se que o objectivo do cenário de manutenção A5 é que a ponte, ao chegar ao estado de condição 3, seja reabilitada para o estado 2. Sabendo que, no exemplo dado a ponte se encontra inicialmente no estado 1, esta ao deteriora-se ao longo da tempo vai aumentando a probabilidade de transitar para os demais estados de condição. Deste modo, quando existe probabilidade maior do que zero da ponte em determinado instante se encontrar no estado 3, então a acção de manutenção melhora o estado de condição para o estado 2. O processo de actuação deste tipo de manutenção é, portanto, contínuo.

Na Figura 4.8 são ilustradas as actuações dos cenários de manutenção A5 e A6 na deterioração da ponte e, relativamente ao primeiro caso, pode-se observar que a certa altura a deterioração da ponte estabiliza no estado 2, permanecendo assim até ao fim do seu ciclo de vida. Isto deve-se à probabilidade da ponte ao longo do tempo se encontrar no estado 1 ir diminuindo até se extinguir e, também, ao facto da probabilidade da ponte se encontrar no estado 2 ir aumentando gradualmente, devido à constante reabilitação feita do estado 3 para este estado. A probabilidade da ponte se encontrar no estado 3, 4 e 5 é nula.

A diferença entre os cenários de manutenção A5 e A6 é que, neste último, o estado de condição a partir do qual se vai reabilitar a estrutura é o estado 4 e não o estado 3. O processo de cálculo é basicamente o mesmo, no entanto, e como se pode observar na Figura 4.8, a deterioração da ponte estabiliza num estado médio superior a 2. Isto ocorre porque, não obstante a reabilitação que ocorre continuamente do estado 4 para o estado 2, há um aumento da deterioração para o estado 3 durante o período estudado, o que em média resulta num estado de condição médio superior ao resultante no cenário A5.

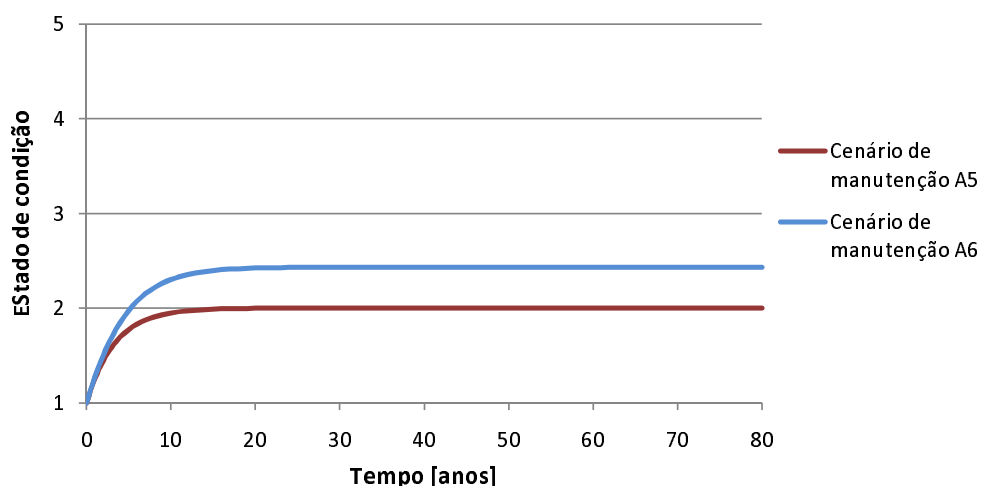


Figura 4.8: Deterioração da ponte associada aos cenários de manutenção A5 e A6

4.3 Aplicação de acções de manutenção à rede viária

Tendo sido feita uma previsão do desempenho médio de uma rede de pontes no capítulo 3, importa realizar no âmbito deste capítulo, um estudo do efeito de determinadas acções de manutenção sobre a deterioração natural desta rede.

Existem várias acções de manutenção que podem ser aplicadas a pontes. Segundo Neves (2005), exemplos de acções preventivas aplicáveis a pontes incluem: utilização de tratamento com silano, que consiste na aplicação de um spray com o objectivo de imperme-

abilizar o betão e de modo a minimizar a penetração de cloretos; pintura e revestimento de protecção e substituição das juntas de dilatação. Já exemplos de acções correctivas aplicáveis incluem: substituição do betão de recobrimento, substituição de elementos estruturais e reparação da corrosão de elementos estruturais. Optou-se entre as acções de manutenção mencionadas, estudar a influência na rede de pontes da aplicação de uma acção preventiva e outra correctiva, neste caso o tratamento com silano e a substituição do elemento estrutural respectivamente. A análise é elaborada para um horizonte de 80 anos e, as características referentes a estas acções, são propostas por Neves e Frangopol (2005) (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Cenários de manutenção aplicáveis à rede de pontes

Cenário	Tipo de acção	t_{pa} (anos)	t_{da} (anos)	Δ_{ta} (anos)	C_{reab}	C_{alvo}
Silano	preventiva baseada no tempo	8	10	13	-	-
Substituição	correctiva baseada no estado	-	-	-	4	1

4.3.1 Análise à evolução do estado de condição médio

A Figura 4.9 ilustra graficamente a evolução da deterioração em termos de estado de condição médio, sem acções de manutenção, com aplicação da acção silano e ainda com a aplicação da acção de substituição. É possível observar que, a evolução da deterioração sem acções de manutenção e com aplicação do cenário de manutenção de tratamento com silano, são obviamente coincidentes até à primeira vez que esta acção é executada, distinguindo-se a partir daí, a evolução do estado de condição relativamente às duas situações.

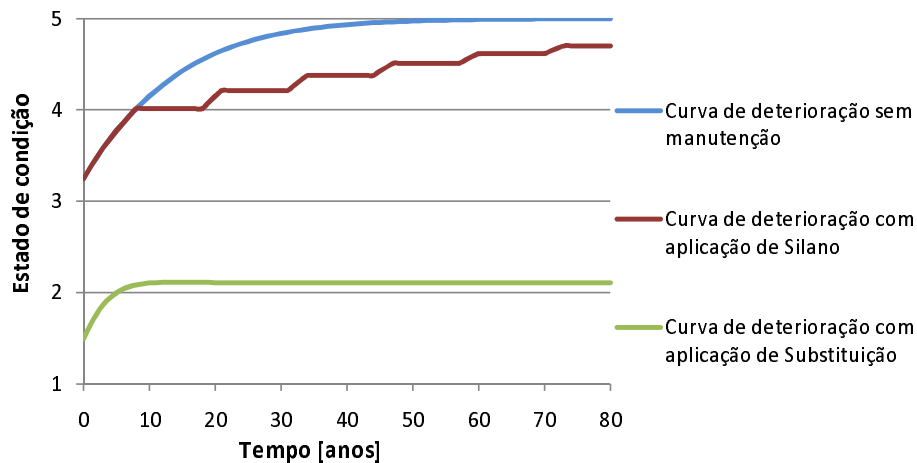


Figura 4.9: Deterioração média da rede de pontes sem acções de manutenção e com aplicação separada dos cenários Silano e Substituição

A aplicação da acção preventiva do tratamento com silano estagna a deterioração por 10

anos, cada vez que esta é aplicada. Essa situação é visível na Figura 4.9, compreendendo-se no entanto, que a utilização única desta acção de manutenção ao longo da vida útil de um conjunto de pontes, provavelmente não oferece as suficientes garantias ao gestor da rede viária uma vez que, mesmo com a aplicação desta manutenção, a deterioração média ao longo do tempo encontra-se sempre a partir do oitavo ano entre o estado 4 e 5. Mesmo perto do fim do tempo de estudo, é possível constatar que a diferença do estado de condição médio considerando deterioração sem acções de manutenção e deterioração considerando o cenário de manutenção silano, é de cerca de 0,3. Esta situação, indica que a longo prazo planejar unicamente a realização do cenário silano, pode não ter substancial interferência na preservação do estado da rede viária.

A aplicação do cenário de manutenção de substituição é feita de forma contínua desde o primeiro instante, até ao fim do ciclo de estudo pois, como já mencionado, é uma acção de manutenção cuja aplicação não depende de variáveis temporais, mas sim do comportamento que as estruturas apresentam. Como tal, observando o gráfico da Figura 4.9, facilmente se verifica que a deterioração da rede viária sofre logo no instante inicial um efectivo melhoramento do estado de condição, passando de um estado médio de 3,25 para 1,49. A partir da primeira década de estudo, começa-se a observar a estabilização permanente do estado de condição médio para o valor de 2,11, pois a reabilitação que é feita para o estado 1 sempre que a deterioração atinge o estado 4, acaba por originar convergência para o mesmo estado médio de condição.

A combinação de estratégias de manutenção ao longo da vida útil de pontes é uma prática comum, tendo em vista um planeamento óptimo na gestão da rede viária. Na Figura 4.10, observa-se o efeito ao longo do tempo da combinação dos dois cenários de manutenção que foram estudados anteriormente. Observando o efeito que esta combinação produz na deterioração média, verifica-se ao comparar com a Figura 4.9, que para esta situação, o efeito é idêntico ao que a acção de manutenção de substituição produz singularmente.

Observando a Figura 4.10, não é facilmente perceptível a influência da acção de manutenção do tratamento com silano na combinação com a acção de substituição. Como já explicado, a estagnação do estado de condição resultante da aplicação de uma acção preventiva baseada no tempo, é ilustrada graficamente como uma linha horizontal contínua, com o comprimento igual ao tempo que dura a respectiva acção. Este fenómeno é visível aquando da primeira aplicação de silano, ou seja entre o ano 8 e 18. A partir daí, deixa de ser possível distinguir o resultado da aplicação periódica desta acção, pois como já descrito, a aplicação da acção de manutenção de substituição a dado instante tende a que o estado de condição médio vá convergindo para determinado valor constante.

Um dado importante a referir relativamente a esta combinação de cenários, é que sempre que é feita a aplicação da acção preventiva de tratamento com silano, é adiada a

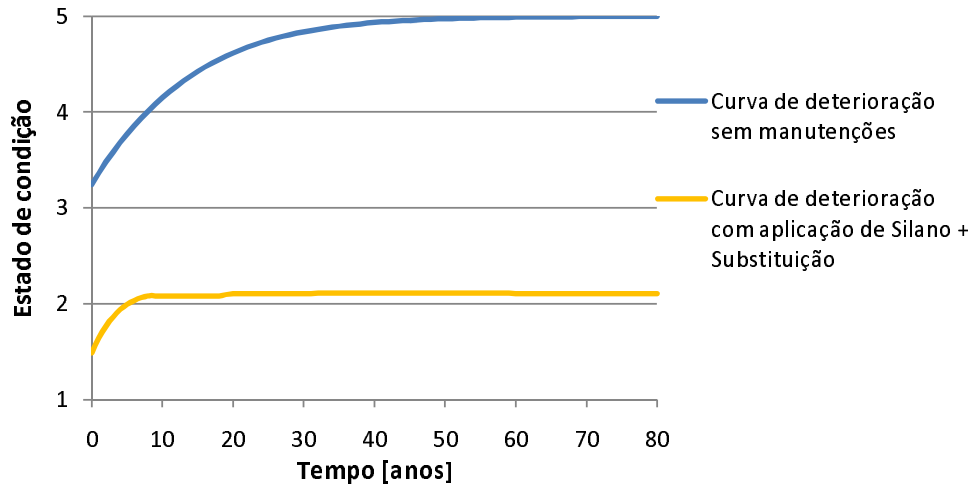


Figura 4.10: Deterioração média da rede de pontes sem acções de manutenção e com aplicação da combinação dos cenários de manutenção de Silano e Substituição

utilização da acção de substituição. Isto acontece porque durante o tempo em que ocorre o efeito da acção de silano, a rede de pontes não se deteriora, o que dispensa a intervenção de uma acção correctiva.

4.3.2 Análise à evolução dos diversos estados de condição

Na Figura 4.11 é ilustrada a evolução da probabilidade da rede de pontes se encontrar nos diversos estados de condição ao longo do tempo de vida estudado, sem a interferência de qualquer acção de manutenção. Como já referido, a rede pontes no instante inicial encontrava-se em média no estado 3,25 e, portanto, com um vector probabilidades inicial de,

$$p(t_0) = \begin{bmatrix} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ 0,1424 & 0,1846 & 0,1544 & 0,3232 & 0,1954 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Como se observa na equação 4.9, a probabilidade da rede viária se encontrar no estado 1 é um valor baixo e a tendência natural ao longo do tempo é, como se constata na Figura 4.11, a convergência para a sua rápida extinção.

As probabilidades ao longo do tempo, da rede de pontes se encontrar no estado 2,3 e 4 apresentam igualmente uma propensão descendente com tendência para a extinção, sendo esta tendência mais notória quanto menor for o estado de condição.

O estado 5, na condição de estado absorvente, revela uma probabilidade sempre crescente ao longo do tempo até, a partir de determinada altura, estabilizar num valor máximo

muito próximo de 1, o que indica um estado de condição médio muito próximo de 5.

O facto de, à excepção do estado 5, nenhum dos estados inferiores apresentar em nenhum instante uma tendência crescente de probabilidade, deve-se à rede de pontes em média se encontrar inicialmente num estado de degradação relativamente avançado.

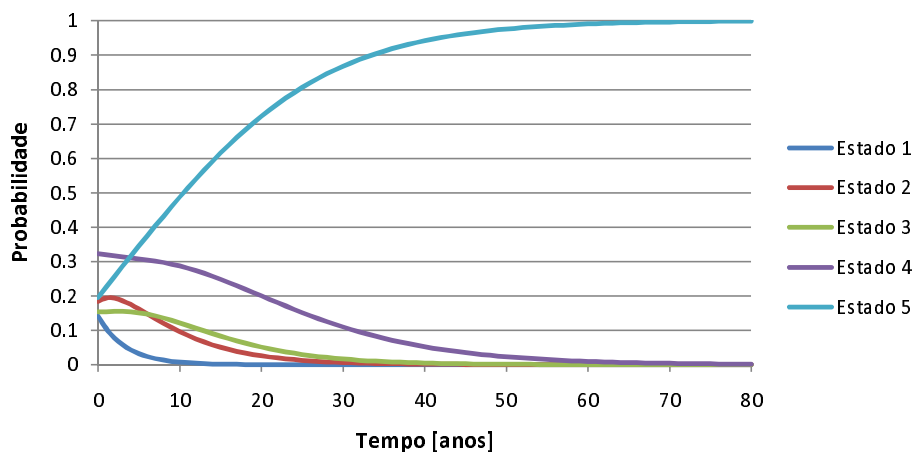


Figura 4.11: Evolução das probabilidades de estados de condição sem intervenção de acções de manutenção

Na Figura 4.12 é possível observar a influência da acção de manutenção preventiva de tratamento com silano, que retarda a probabilidade de deterioração para cada estado de condição, sempre que esta é aplicada. Comparando com a Figura 4.11, esta acção atenua a deterioração crescente relativamente à probabilidade do estado 5 e atrasa a deterioração nos demais estados de condição, cuja evolução é decrescente.

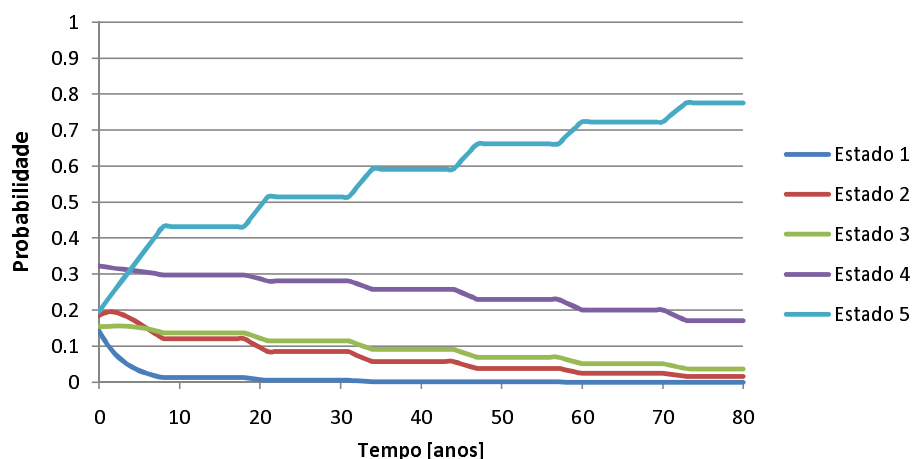


Figura 4.12: Evolução das probabilidades de estados de condição com aplicação da acção de manutenção de silano

Na Figura 4.13 observa-se a influência da acção correctiva que reabilita a rede pontes sempre que esta se encontra no estado 4. Essa reabilitação é feita para o estado 1 e

daí o motivo pelo qual a curva referente a este estado começar numa ordem de valores superior aos demais estados. De notar que as séries de dados referentes aos estados 4 e 5, coincidem graficamente com o eixo das abcissas uma vez que, devido à reabilitação da acção de manutenção executada continuamente, a rede de pontes nunca se encontra no estado 4 ou superior.

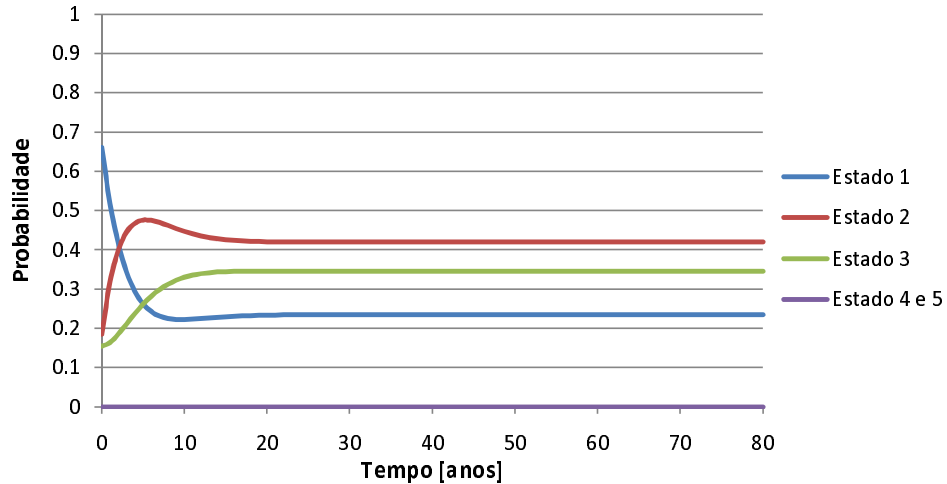


Figura 4.13: Evolução das probabilidades de estados de condição com aplicação da acção de manutenção de substituição

Como referido anteriormente, a combinação das acções de manutenção de silano e substituição, origina uma evolução do estado médio de condição semelhante à aplicação única da acção de substituição. Esse facto, é igualmente comprovável ao comparar as séries de dados da Figura 4.14 e as séries homólogas da Figura 4.13. No entanto, no caso da Figura 4.14, é visível nas curvas probabilísticas a perturbação causada pelo tratamento com silano na combinação dos dois cenários de manutenção.

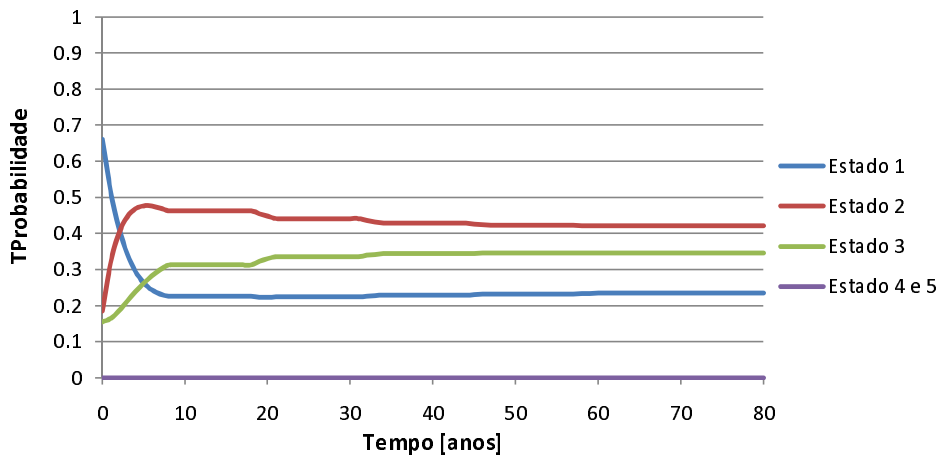


Figura 4.14: Evolução das probabilidades de estados de condição com aplicação da combinação das acções de manutenção de silano e substituição

4.3.3 Custos das acções de manutenção durante o ciclo de vida

Para saber qual a estratégia de manutenção mais indicada a uma rede viária é necessário conjugar vários factores, como o estado de condição pretendido ao longo do tempo, o orçamento disponível e os custos que advêm das acções de manutenção a tomar. A rede viária de infra-estruturas rodoviárias de um país tem um impacte forte na economia, sendo portanto fundamental que a disponibilização e distribuição de fundos seja feita da forma mais inteligente possível.

A data da aplicação de acções de manutenção tem especial importância quando uma análise de custos é elaborada. Ao analisar o custo do ciclo de vida das estruturas, torna-se fundamental actualizar o valor do custo de todas as operações de manutenção futuras em valores presentes, de modo a que possam ser avaliadas e comparadas em situação de igualdade. Esta homogeneização do tempo é necessária devido ao designado “custo de oportunidade” que o valor do dinheiro possui, ou seja, é descontado o valor que poderia ser ganho num investimento entre o presente e a data futura em que ocorre o gasto na manutenção (Pastor *et al.*, 2000; Ryall, 2001). Este processo de actualização do custo é dado pela seguinte equação (Hong e Hastak, 2005):

$$C_0 = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (4.10)$$

em que C_0 é o valor presente do custo total, C_t é o valor do custo no tempo t , r é a taxa de desconto e T é o período de tempo total em estudo.

O factor de desconto a ser aplicado a cada valor futuro é, portanto, dado por:

$$FD = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (4.11)$$

A taxa de desconto depende da estratégia de investimento adoptado e do risco associado (Ryall, 2001). É um valor muito difícil de prever, uma vez que depende da conjectura económica durante o ciclo de vida da estrutura (Neves, 2005).

De acordo com Ryall (2001), o valor da taxa de desconto pode variar normalmente entre 2% a 8% e deve ter em consideração o tipo de investimento, as condições do mercado e a inflação. A escolha deste valor tem de ser feita cuidadosamente, pois a análise ao custo do ciclo de vida em acções de manutenção é muito sensível a este dado, tal como se pode observar na Figura 4.15.

Segundo Ryall (2001), alguns clientes preferem adoptar taxas de desconto altas, na ordem dos 8%, pois o custo presente calculado é necessariamente inferior do que com o uso de taxas inferiores. No entanto, o uso de uma taxa de desconto de 8%, sugere que

o dinheiro disponível para investimento cresça 8% ao ano, o que é de todo irrealista na situação actual.

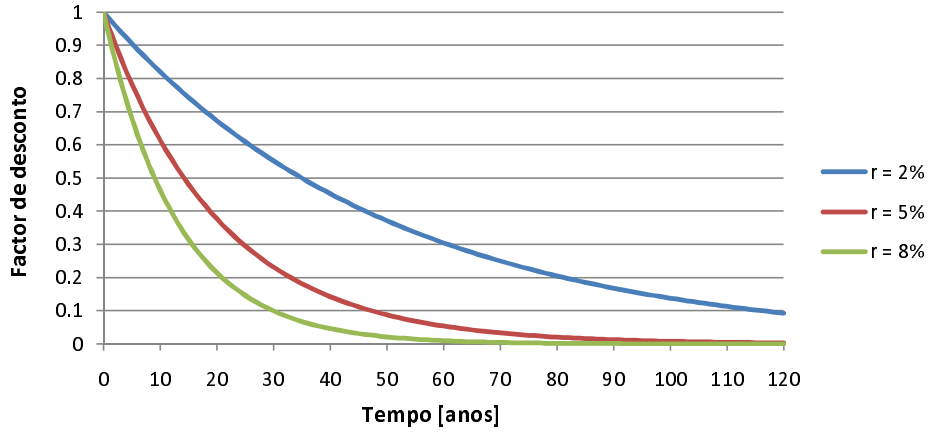


Figura 4.15: Variação do factor de desconto ao longo do tempo

Num sentido inverso, tendo em conta a inflação como um aumento generalizado no preço dos bens e serviços, o custo acumulado ao longo do tempo pode ser obtido do seguinte modo:

$$C_t = \sum_{t=0}^T C_0 \times (1 + i)^t \quad (4.12)$$

Para se conjugar as variáveis financeiras da taxa de desconto e da inflação, é usual fazer a distinção entre taxa de desconto real e nominal. A taxa de desconto nominal, é a taxa de desconto adoptada para a conversão de valores futuros em valores presentes, sem ter em consideração a inflação. No entanto, para a inflação ser levada em conta nos cálculos usa-se a taxa de desconto real (Hong e Hastak, 2005):

$$t_r = \frac{1 + t_n}{1 + i} - 1 \quad (4.13)$$

sendo t_r a taxa de desconto real, t_n a taxa de desconto nominal e i a inflação.

Porém, segundo a equação de Fisher (Fisher e Barber, 1930), a taxa de desconto real pode simplificadaamente ser obtida por:

$$t_r = t_n - i \quad (4.14)$$

Deste modo, o custo acumulado ao longo do tempo tendo em consideração a taxa de desconto e a inflação, segue a seguinte formulação:

$$C_0 = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1 + t_r)^t} \quad (4.15)$$

No decorrer deste capítulo foram propostos alguns cenários de acções de manutenção, que pudessem ser aplicados no ciclo de vida da rede de pontes utilizada (Tabela 3.9). Independentemente da influência que estas acções tenham no estado de condição das estruturas e dos benefícios que a sua aplicação proporcione no ponto de vista do gestor, os custos inerentes à sua realização são sempre dados de extrema importância e que têm de ser levado em consideração, no que à tomada de decisões diz respeito.

Relativamente ao custo das acções de manutenção de tratamento com silano e substituição, foi usada uma proporção de 1 para 10, considerada uma proporção realista tendo em conta os tipos de acções de que se tratam. Foi adoptado um custo base de 10000€ para o tratamento com silano e 100000€ para a acção de substituir o elemento. Em termos de mercado financeiro, foi adoptado um valor de taxa de inflação de 1% e um valor de taxa de desconto nominal de 4% o que significa, através da equação 4.14, uma taxa de desconto real de 3%.

4.3.3.1 Análise dos custos de acções de manutenção aplicados à rede de pontes

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, representam respectivamente os custos acumulados das acções de manutenção de tratamento com silano e substituição e, ainda, a combinação entre ambas. Em cada caso, foram expostas três séries de dados: uma com o custo acumulado simples, que basicamente acumula o valor do custo de manutenção ao longo do tempo em que esta é aplicada, uma com o custo acumulado com inflação (equação 4.12), que difere do primeiro pelo facto de se ter em conta a inflação no custo futuro da respectiva manutenção, sem investimento do dinheiro actualmente disponível e ainda, uma série com o custo acumulado que tem em conta a taxa de desconto real (equação 4.15), ou seja, tem em consideração a inflação e ainda a taxa de desconto nominal, referente ao custo de oportunidade que o dinheiro investido hoje poderia render futuramente.

Como referido, o tratamento com silano é uma acção preventiva cuja aplicação é definida por variáveis temporais. Nas séries da Figura 4.16, cada vez que é observado uma variação brusca no valor do custo acumulado, significa que a acção de manutenção foi aplicada, sendo o valor dessa variação estabelecido conforme o custo base e o ano em que é aplicada a acção. Na série do custo acumulado simples, o valor da variação brusca é sempre o mesmo independentemente do respectivo instante, pois não existe a influência de variáveis financeiras que estabeleçam uma diferença. Na série do custo acumulado com inflação, o valor desta variação aumenta progressivamente por ser mais inflacionado cada

vez que a acção é aplicada. Já na série de custo acumulado com taxa de desconto real, o aumento do valor da variação brusca vai sendo cada vez menor em cada altura que a acção é aplicada, devido ao factor de desconto diminuir progressivamente ao longo do tempo.

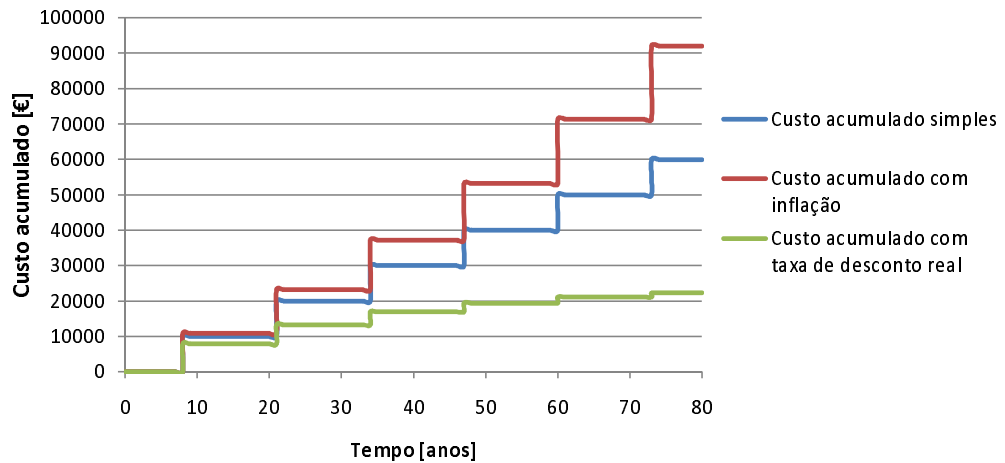


Figura 4.16: Custos acumulados ao longo do tempo relativamente à acção de manutenção silano

Na Figura 4.17 apresenta-se a evolução dos custos para a estratégia de manutenção de substituição. A forma dos gráficos é diferente do caso encontrado na Figura 4.16 para o tratamento com silano, pois para a situação em causa, a acção de manutenção é aplicada continuamente ao longo do tempo. Aquando desta aplicação, devido a existência de probabilidade da estrutura se encontrar no estado de condição para qual se procede à reabilitação (C_{reab}), o custo respectivo é calculado com a probabilidade referida multiplicada pelo custo base da acção de substituição.

Observando a série de dados relativa ao custo acumulado simples, é possível verificar que o gráfico se aproxima de uma linha recta, tendo em consideração a influência que esta acção de manutenção tem na deterioração ilustrada na Figura 4.9. Visto que o estado de condição médio a dada altura fica constante ao longo do tempo, significa que o vector probabilidades de estados de condição também não varia. Deste modo, como o custo da aplicação da acção de manutenção de substituição é o custo base multiplicado pela probabilidade de ocorrência, ou seja, para este caso multiplicado pela probabilidade de se encontrar no estado 4 antes de se proceder à reabilitação, então a evolução cresce acumuladamente de forma constante.

Na série de dados referente ao custo com taxa de desconto real, observa-se a tendência da estabilização da curva acumulada de custos, o que indica que se o dinheiro disponível for investido presentemente para a taxa de desconto real adoptada, o custo de aplicação desta acção de manutenção, a partir da sétima ou oitava década, começa a torna-se muito pequeno.

Ao contrário da Figura 4.16, na Figura 4.17, a utilização da acção de manutenção de substituição resulta que desde o instante inicial existiam custos associados à sua aplicação.

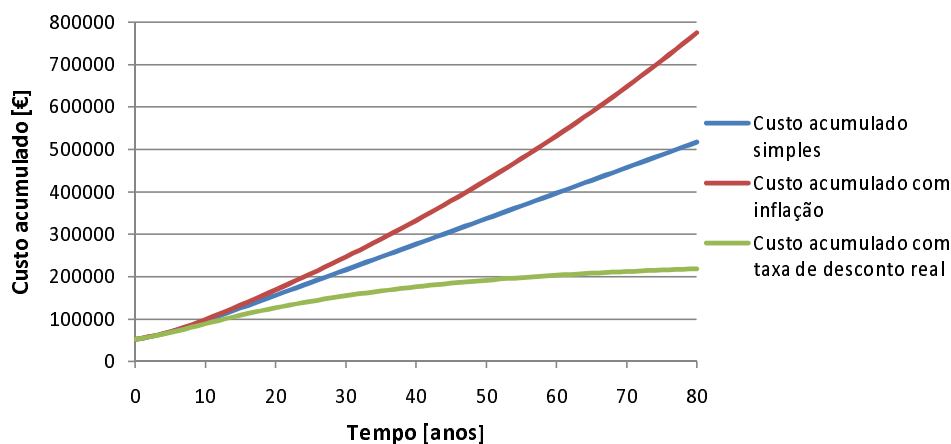


Figura 4.17: Custos acumulados ao longo do tempo relativamente à acção de manutenção de substituição

A evolução dos custos relativamente à combinação das acções de tratamento com silano e substituição é ilustrada na Figura 4.18. A zona dos gráficos em que o custo acumulado não sofre alteração ao longo do tempo, indica que durante esse período ocorre uma estagnação do estado de condição médio das pontes, resultante da aplicação da acção de manutenção preventiva silano. Como o estado de condição permanece constante, também não é solicitada a acção de manutenção correctiva baseada no estado e os custos que a ela estão associados.

Entre o fim de um período de estagnação do estado de condição e de custos acumulados e o instante referente a uma nova aplicação de silano, ocorre deterioração e, como tal, é aplicada continuamente a acção de manutenção de substituição com os respectivos custos.

O custo resultante da aplicação da manutenção com tratamento de silano, só é contabilizado na altura em que é aplicada, ou seja, no início do período sem deterioração. Esta acção só é aplicada pela primeira vez no oitavo ano e, até esta data, o custo relativamente à combinação dos cenários de manutenção (Figura 4.18) é o mesmo que o da aplicação do cenário de substituição isoladamente (Figura 4.17).

Analisando globalmente os resultados referentes às Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, é possível fazer uma comparação entre os custos totais acumulados, apresentados na Tabela 4.5. Previsivelmente, o cenário de manutenção com tratamento de silano é o que produz um menor custo total, como resultado de um baixo custo de aplicação. Já o cenário de substituição é o que proporciona um custo total mais elevado, uma vez que o seu custo de aplicação é bastante superior ao tratamento com silano. A combinação destes dois cenários resulta num valor intermédio de custo total, comparativamente ao custo referente à aplicação

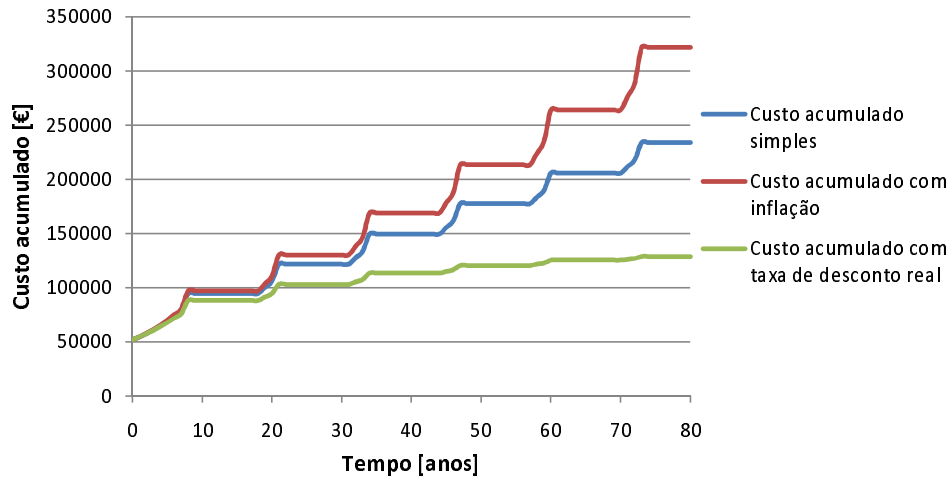


Figura 4.18: Custos acumulados ao longo do tempo relativamente à combinação de acções de manutenção de silano e substituição

individual de cada uma das acções de manutenção. Esta combinação de aplicação das duas acções é melhor solução do que apenas aplicar a acção de substituição, pois como já verificado, ambas as soluções influenciam de forma semelhante a deterioração da rede pontes ao longo do tempo mas, no caso da combinação dos cenários, este tem um custo substancialmente inferior ao do cenário da substituição. Esta situação justifica-se devido ao facto de, durante o efeito da acção de manutenção preventiva, não ocorre aplicação da acção de manutenção correctiva, que é bastante mais dispendiosa.

Tabela 4.5: Custos acumulados totais referentes aos diversos cenários de manutenção

Cenário de manutenção	Custo simples (€)	Custo c/ inflação (€)	Custo c/ taxa de desconto real (€)
Silano	60000	91984	22276
Substituição	517000	774650	218850
Silano + Substituição	233690	321930	128520

4.4 Conclusões

Neste capítulo foi estudado o efeito de acções de manutenção na deterioração de uma rede viária de pontes. Verificou-se que as acções de manutenção dependendo do instante de aplicação, podem ser baseadas no tempo ou baseadas no estado de condição e dependendo do efeito na deterioração, podem ser classificadas como preventivas, adiando a deterioração, ou correctivas, efectuando uma melhoria do estado de condição. Foram,

portanto, sugeridos vários cenários de manutenção relativos aos vários tipos de acções, sendo estudada a sua modelação no âmbito dos processos de Markov.

De seguida, sugeriu-se o planeamento de duas acções de manutenção a aplicar à rede viária de pontes, cujo desempenho futuro foi previsto no capítulo 3. Foi analisada a evolução do estado de condição médio e dos estados de condição individualmente, aquando da aplicação de uma acção preventiva baseada no tempo e de uma acção correctiva baseada no estado, sendo elas respectivamente o tratamento com silano e a substituição do elemento. A combinação destas duas acções como estratégia de manutenção, foi igualmente abordada. Constatou-se que utilizar apenas como estratégia de manutenção a acção silano, pode revelar-se insuficiente principalmente a longo prazo, pois esta acção apenas adia a deterioração sem nunca introduzir uma melhoria do estado de condição. A acção de manutenção de substituição, sendo de carácter correctivo e aplicada continuamente, controla a deterioração da rede viária no sentido de originar uma constante melhoria do estado de condição. Os resultados demonstraram ainda que o impacte que a acção de substituição e a combinação dos cenários de substituição e silano tem na deterioração da rede de pontes, é muito similar.

Foram estudados os custos acumulados referentes à aplicação das acções de manutenção silano e substituição e ainda a combinação de ambos. Estes custos foram calculados de três modos: sem a intervenção de variáveis financeiras, tendo em conta a inflação e ainda conjugando a taxa de desconto com a inflação, ou seja, levando em consideração a taxa de desconto real. Verificou-se que o custo de aplicação da acção de manutenção silano ao longo do ciclo de vida estudado, é bastante inferior ao da aplicação da acção de substituição e que, a combinação dos cenários, resulta num custo intermédio entre os dois.

Analisando os resultados obtidos, é possível concluir que a aplicação da acção silano tem baixos custos mas, em contrapartida, tem pouco impacte na deterioração. Já a acção de substituição tem um grande impacte na deterioração, mas os custos da sua aplicação também são bastante mais elevados. Como tal, a conjugação da acção preventiva com a correctiva, revela-se como a melhor estratégia a seguir, tendo em conta o efeito na deterioração e os custos associados.

Capítulo 5

Optimização de Estratégias de Manutenção

5.1 Introdução

O principal objectivo de um gestor de pontes é obter uma estratégia de manutenção que conduza ao mínimo custo médio de manutenção, mantendo um estado de condição médio aceitável (Frangopol e Neves, 2003).

No capítulo 4, estudou-se o efeito da aplicação de diversos cenários de manutenção sobre uma rede de pontes, do ponto de vista económico e do ponto de vista do desempenho das estruturas. No entanto, para obter a melhor estratégia de manutenção, é possível otimizar os instantes de aplicação das acções de manutenção, de modo a obter o custo total mais baixo.

Neste capítulo é proposto um problema de optimização recorrendo ao uso de algoritmos genéticos, com vista à obtenção da estratégia de manutenção que melhor satisfaça as exigências impostas para o ciclo de vida da rede pontes.

5.2 Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são métodos probabilísticos de optimização. Foram desenvolvidos por Holland (1975), popularizados por Goldberg (1989) e são baseados na teoria de evolução das espécies de Darwin. Segundo esta teoria, numa população de indivíduos, sobrevivem aqueles que melhor se adaptam às características do meio ambiente, ou seja, analogamente às condições do problema em causa. Os indivíduos que não se adaptarem são excluídos e desaparecem e, por isso, estes algoritmos assentam na ideia da “sobrevivência

dos mais aptos”, isto é, na permanência das melhores soluções com vista à resolução do problema (Mitchell, 1998; Neves, 2005).

Os algoritmos genéticos distinguem-se dos métodos tradicionais de optimização pelas seguintes características (Mitchell, 1998; Neves, 2005):

- Não requerem a computação de gradientes ou derivadas;
- São algoritmos de natureza estocástica e não determinística ;
- Trabalham com uma população de possíveis soluções e não com uma única solução;
- Funcionam com parâmetros contínuos e discretos.

Para elaborar um problema de optimização usando algoritmos genéticos, é necessário definir uma função objectivo. Esta função, pretende receber como *input* o individuo e devolver como *output* a capacidade que este tem para fazer face ao problema, comparativamente aos restantes indivíduos. Como tal, quanto maior essa capacidade, maior a probabilidade da sua reprodução (Mitchell, 1998).

A função objectivo, serve de guia ao algoritmo no espaço de procura. Este espaço, representa o conjunto de indivíduos possíveis e, a função objectivo iterativamente, vai descartando os indivíduos que não estão aptos para a resolução do problema, seleccionando apenas os que têm maior aptidão (Mitchell, 1998).

Segundo Holland (1975), o funcionamento de um algoritmo genético pode ser decomposto nas seguintes parcelas:

Iniciação - Inicialmente é gerada, de modo aleatório, uma população que é formada por um conjunto de indivíduos que podem ser possíveis soluções para a resolução do problema;

Avaliação - É adaptado e avaliado cada indivíduo da população à função objectivo, reflectindo a sua capacidade relativamente ao problema;

Seleccção - São seleccionados os indivíduos com maior capacidade enquanto os restantes são descartados;

Cruzamento - É realizado um cruzamento de características referentes aos indivíduos que foram seleccionados, para que se crie uma descendência para a nova geração de população;

Mutação - As características dos indivíduos resultantes do processo de reprodução são alteradas, acrescentando assim variedade à população;

Aceitação - Os indivíduos aceites são inseridos na população da geração seguinte, juntamente com os melhores indivíduos da geração anterior;

Finalização - Verifica se as condições de finalização do problema foram satisfeitas. Se não, o processo regressa à etapa da avaliação com a última geração de população produzida. As populações evolvirão por sucessivas gerações, até se encontrar uma solução óptima.

Basicamente, este tipo de algoritmos tenta várias soluções de resolução e usa os resultados obtidos para otimizar novas e melhores soluções.

5.3 Definição do problema de optimização

O problema de optimização proposto, pretende abordar o cenário de combinação da acção de manutenção silano e a acção de substituição, de modo a tirar o melhor partido das características distintas destas duas acções. O problema pode ser definido do seguinte modo:

Objectivo:

Para um horizonte de tempo total de 80 anos, realizar uma optimização uni-objectivo por algoritmos genéticos, focada na função objectivo de minimização do custo total acumulado com taxa de desconto real. As variáveis de optimização são variáveis temporais relativas à acção de manutenção silano, sendo elas o tempo de ocorrência da primeira acção de manutenção, t_{pa} e o intervalo de tempo sequente entre acções, Δ_{ta} .

Restrições:

Os limites inferiores de restrição às variáveis, são escolhidos com a intenção de não permitir valores negativos referentes a tempos de aplicação. Os limites superiores de restrição, são impostos para não permitir a ocorrência de tempos de aplicação superior ao tempo total de estudo. As restrições são as seguintes:

$$0 \leq t_{pa} \leq 80 \quad (5.1)$$

$$0 \leq \Delta_{ta} \leq 80 \quad (5.2)$$

O tempo de duração da acção de manutenção silano, t_{da} , é de 10 anos e é intrínseco às características da acção, não sendo como tal alterável.

As variáveis de estado de condição relativas à acção de substituição, não são consideradas como optimizáveis na resolução do problema. É considerado no decorrer do tempo, que a aplicação de uma acção correctiva baseada no estado ocorre quando a deterioração do conjunto de pontes assim o exige e, portanto, a sua aplicação não é posta em causa na optimização. Deste modo, para o problema de optimização, foram considerados três diferentes estados (3,4 ou 5) a partir do qual o elemento é substituído por um novo, passando para o estado de condição 1.

Para avaliar a influência do custo das acções de manutenção na optimização da melhor estratégia de manutenção, simularam-se diferentes proporções entre os custos base da acção de substituição e a de tratamento com silano.

Os cenários de optimização sugeridos, encontram-se descritos na Tabela 5.1. Na identificação do tipo de estratégia da primeira coluna da tabela, a letra representa uma situação para determinado custo base do tratamento com silano e o número, representa uma situação para determinado C_{reab} .

Tabela 5.1: Cenários de manutenção utilizados na optimização uni-objectivo

Estratégia de manutenção	Custo base de substituição (€)	Custo base de silano (€)	Custo silano/Custo substituição	C_{reab}
A1	100000	10000	1: 10	3
A2	100000	10000	1: 10	4
A3	100000	10000	1: 10	5
B1	100000	20000	1: 5	3
B2	100000	20000	1: 5	4
B3	100000	20000	1: 5	5
C1	100000	50000	1: 2	3
C2	100000	50000	1: 2	4
C3	100000	50000	1: 2	5
D1	100000	100000	1: 1	3
D2	100000	100000	1: 1	4
D3	100000	100000	1: 1	5

5.4 Análise dos resultados obtidos

Os resultados obtidos por aplicação do método de algoritmos genéticos uni-objectivo, são apresentados na Tabela 5.2 para as diversas estratégias de manutenção. O valor do custo total mínimo associado a cada estratégia óptima é ilustrado na Figura 5.1.

Tabela 5.2: Resultados das variáveis de otimização e do custo total acumulado para diferentes estratégias de manutenção

Estratégia de manutenção	t_{pa} (anos)	Δ_{ta} (anos)	Custo total descontado (€)
A1	0	10	104439,78
A2	0	10	88998,83
A3	0	10	56677,72
B1	0	10	141574,39
B2	2	10	125573,61
B3	0	11	93356,69
C1	2	10	247150,64
C2	9	12	215882,26
C3	-	-	125061,83
D1	-	-	331908,71
D2	-	-	218846,51
D3	-	-	125061,83

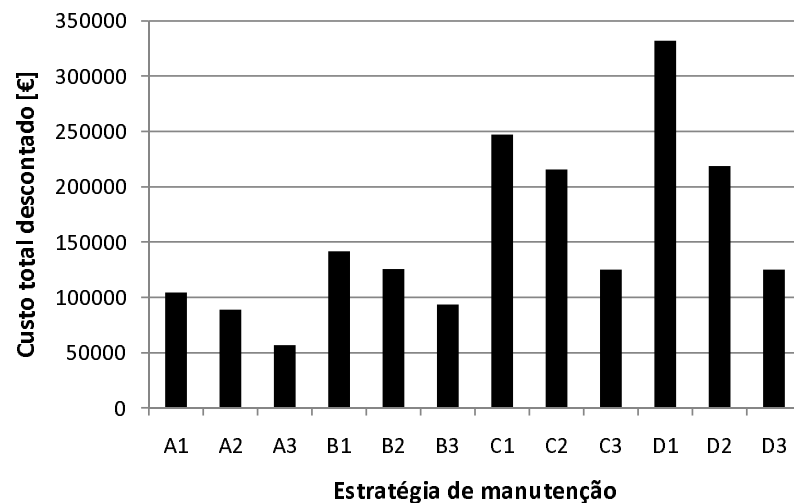


Figura 5.1: Custos totais descontados para as diversas estratégias de manutenção

Mostra-se que, para o mesmo custo base da acção de substituição, os custos totais referentes à optimização das estratégias de manutenção sugeridas são, como esperado, maiores à medida que se aumenta o custo base do tratamento com silano.

Para qualquer estratégia de manutenção, observa-se que à medida que se aumenta o valor de C_{reab} , o custo total descontado diminui. Isto significa que, quando se aplica a acção de substituição às estruturas, fazê-lo apenas quando estas se encontram num estado de condição limite, representa a melhor estratégia de manutenção do ponto de vista exclusivamente económico.

Para o mesmo C_{reab} , à medida que o custo base do tratamento com silano aumenta comparativamente à acção de substituição, é constatado que a optimização tende a privilegiar a aplicação da segunda em detrimento da primeira.

De seguida segue a análise aos resultados obtidos comparando as diversas estratégias de manutenção sugeridas.

Estratégias de manutenção A1,A2 e A3

A optimização das estratégias de manutenção A1,A2 e A3, resultou nos mesmos valores das variáveis t_{pa} e Δt_a . Como nestes casos, o custo base da acção de manutenção silano é muito baixo, a optimização privilegiou a frequente aplicação desta acção. Sendo a duração do período sem deterioração de 10 anos, o algoritmo de optimização convergiu para a solução de reaplicar imediatamente esta acção, assim que o efeito da aplicação precedente terminar. Este processo decorre até ao fim do ciclo de vida abordado e, por esta razão, tal como se constata na Figura 5.2, para qualquer destas estratégias de manutenção, o estado de condição médio da rede pontes permanece constante ao longo do tempo.

A acção de substituição só é aplicada no instante inicial, uma vez que a partir desse ponto, a frequente aplicação de silano garante que não seja mais necessário substituir o elemento estrutural. Como o resultado da optimização originou valores de variáveis iguais para estas três estratégias de manutenção, as diferenças entre os seus custos totais são obtidas no instante inicial, em que dependendo de quanto menor é o C_{reab} , maior é a probabilidade de aplicação da acção correctiva e, conseqüentemente, maior o custo associado.

Estratégias de manutenção B1,B2 e B3

Para estas estratégias de manutenção, a proporção do custo entre a acção de substituição e a acção de tratamento com silano é de 1:5. Para a estratégia B1, os resultados das variáveis de optimização indicam na Figura 5.3, que a acção de manutenção silano é usada

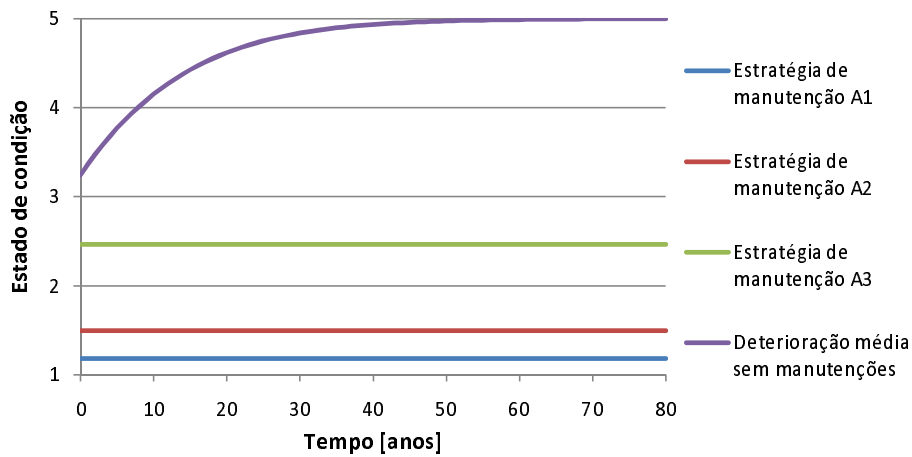


Figura 5.2: Ilustração da deterioração média sem acções de manutenção e com a aplicação as estratégias de manutenção A1,A2 e A3

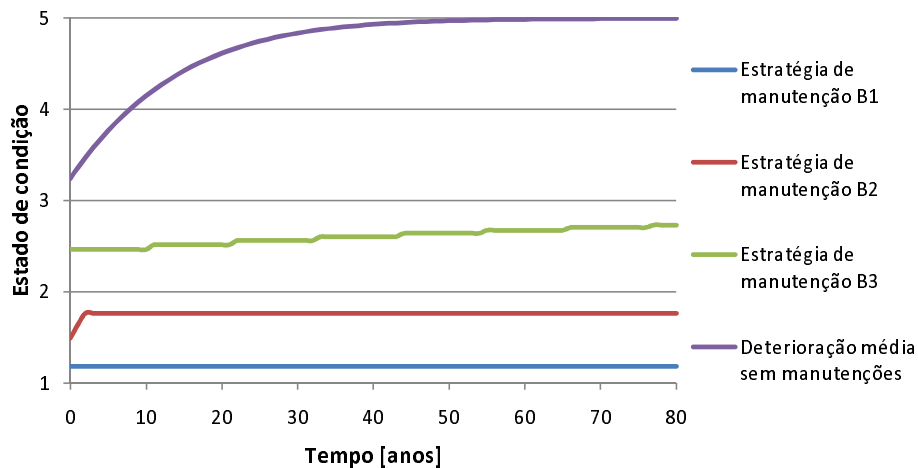


Figura 5.3: Ilustração da deterioração média sem acções de manutenção e com a aplicação das estratégias de manutenção B1,B2 e B3

recorrentemente ao longo do tempo desde o instante inicial. Portanto, para este caso, ter aumentado o custo base da acção de manutenção silano para o dobro, não exerceu qualquer alteração nos resultados das variáveis de optimização pois estas proporcionam, ainda assim, o custo total mais baixo.

Se o estado para o qual é aplicada a substituição do elemento (C_{reab}) aumentar para 4, no caso da estratégia B2, o tempo de aplicação da primeira acção de manutenção de silano é relegada para o ano 2, pois no período precedente, o algoritmo de optimização considerou mais viável a aplicação da acção de substituição. É de salientar que para a estratégia B3, quando C_{reab} é 5, a primeira acção de manutenção de tratamento com silano volta a ser aplicada no instante inicial, mas no entanto, o intervalo de tempo entre sucessivas acções aumenta um ano. O gráfico da Figura 5.3 ilustra, de facto, que de 10 em

10 anos a aplicação da acção de substituição é solicitada durante um ano, originando que a tendência do estado de condição médio ao longo do tempo seja ligeiramente crescente, ao contrário do que acontece nas outras duas estratégias referidas, em que o estado de condição é constante.

Estratégias de manutenção C1,C2 e C3

Para estas estratégias, o custo base da acção de manutenção de tratamento com silano é assumido igual a metade do valor base da acção de substituição. Observando os resultados da Tabela 5.2, o recurso à introdução da acção de manutenção silano é agora menos recorrente para as estratégias C1 e C2. Para a estratégia C3, ocorre até o caso em que a aplicação da estratégia de manutenção silano é posta de parte durante todo o ciclo de vida. A optimização indica que a frequente aplicação da acção de substituição é a melhor opção, tendo em vista a obtenção do custo total mínimo. A evolução do estado de condição médio referente a estas estratégias, é observável na Figura 5.4.

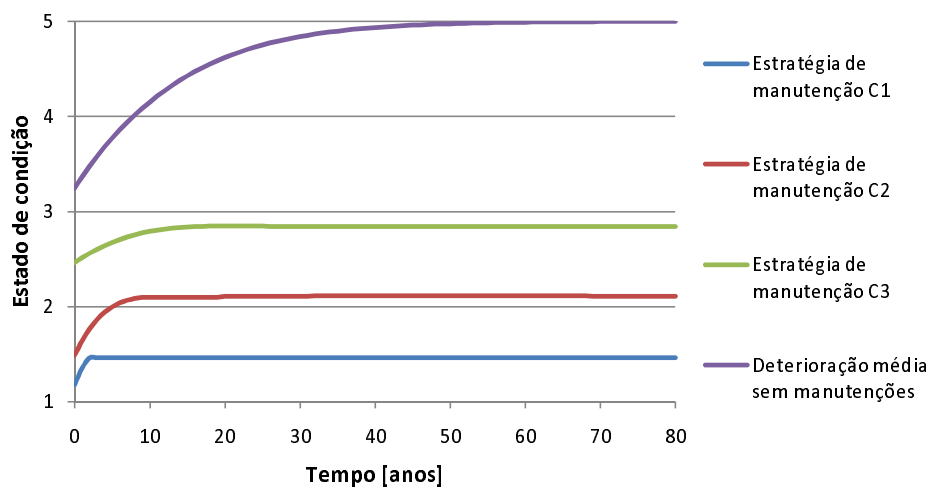


Figura 5.4: Ilustração da deterioração média sem acções de manutenção e com a aplicação das estratégias de manutenção C1,C2 e C3

Estratégias de manutenção D1,D2 e D3

Nestas estratégias de manutenção, o custo base do tratamento com silano é o mesmo que o custo base de substituir o elemento. Como esperado, devido à onerosidade daquele custo, o tratamento com silano como estratégia de manutenção foi completamente posta de parte na optimização. Deste modo, para qualquer das três estratégias em discussão, a aplicação da acção preventiva nunca ocorre e a aplicação contínua da acção de substituição revela-se como sendo óptima em todos os casos. A evolução do estado de condição médio referente a estas estratégias, é apresentado na Figura 5.5.

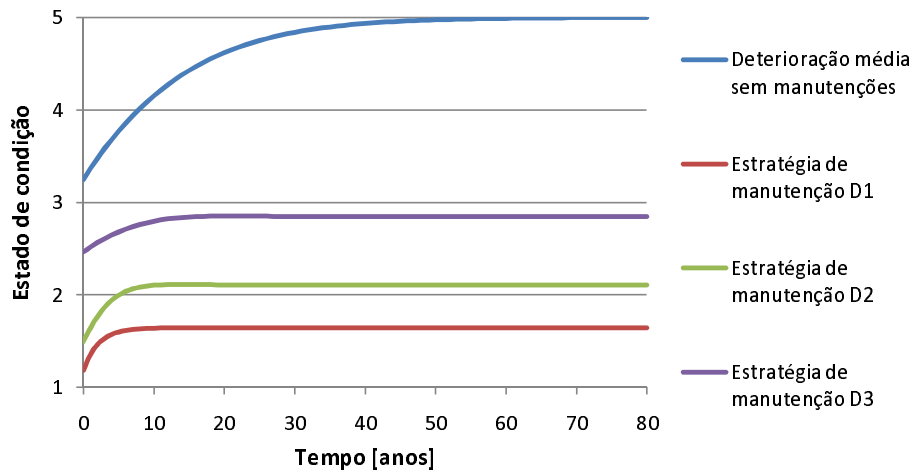


Figura 5.5: Ilustração da deterioração média sem acções de manutenção e com a aplicação das estratégias de manutenção D1,D2 e D3

5.5 Conclusões

Neste capítulo foi efectuado um estudo de optimização de estratégias de manutenção, de modo a obter o menor custo do ciclo de vida da rede viária. Para tal, recorreu-se ao uso de algoritmos genéticos, tendo sido explicado a origem do seu aparecimento, as suas características e o seu modo de funcionamento. Foi definido o problema de optimização uni-objectivo, com a função objectivo de minimização do custo total acumulado com taxa de desconto real. As variáveis de optimização são referentes ao tempo de aplicação da acção silano, sendo elas o tempo da primeira aplicação e o intervalo entre aplicações. Foram ainda considerados três estados de condição para os quais é aplicada a acção de substituição (C_{reab}) e diferentes proporções entre os custos base de aplicação das duas acções estudadas.

Os resultados demonstraram inequivocamente que a aplicação frequente da acção de manutenção silano, ao longo do ciclo de vida, é a estratégia de manutenção mais económica. Apenas se verifica o contrário, quando o custo base da acção silano aumenta relativamente ao custo base da acção de substituição.

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões

A contribuição desta dissertação foi o desenvolvimento e implementação de um modelo de previsão do desempenho de pontes existentes, recorrendo aos processos de Markov. A partir dessa previsão, o modelo foi melhorado para permitir a introdução de acções de manutenção que alterassem a evolução do estado de condição das estruturas. Como manter e melhorar o estado de condição de uma rede viária, implica necessariamente custos associados, foi igualmente estudado, no âmbito deste trabalho, o impacte económico que a manutenção de pontes representa.

Após um breve introdução, foi apresentado no capítulo 2 um estado da arte sobre sistemas de gestão de pontes. Foram comentadas as circunstâncias em que se inseriu o aparecimento destas ferramentas, os seus desenvolvimentos ao longo da história e o impacte social, económico e político destes. Foram ainda descritos alguns dos sistemas de gestão mais populares a nível mundial, assim como exposto o sistema GOA, actualmente usado em Portugal.

Observou-se relativamente aos sistemas de gestão apresentados, que todos partilham o objectivo comum de auxiliar as entidades gestoras das obras de arte, na gestão do seu património. Porém, cada um possui as suas particularidades e até mesmo modos diferentes de agir, nomeadamente a gestão ao nível da rede ou ao nível da ponte singular.

Verificou-se que os sistemas de gestão de referência, apoiam-se em modelos de deterioração de Markov para efectuar a previsão do desempenho futuro do estado das pontes. Portugal, no entanto, ainda tem um percurso pela frente no aperfeiçoamento desta matéria,

pois só recentemente começou a ser considerada a possível implementação de modelos matemáticos que possam servir de premissas para uma optimização de qualidade nas decisões de conservação de pontes.

No capítulo 3 estudou-se a previsão do desempenho futuro de pontes existentes, tendo como base resultados de inspecções realizadas a estruturas semelhantes às que se pretendem analisar. Esta previsão é realizada com recurso aos processos de Markov em cadeia e podem ser discretos ou contínuos no tempo. Apesar dos processos markovianos discretos no tempo serem menos rigorosos, alguns sistemas usam-nos para preverem o desempenho das suas estruturas e, por isso, a metodologia destes processos foi abordada no decorrer deste capítulo. Verificou-se que os processos de Markov discretos no tempo, apenas permitem prever o desempenho em intervalos de tempo discretos, estando dependentes de um historial de resultados de inspecções com o mesmo intervalo de tempo entre observações.

Utilizando um registo de inspecções com intervalos diferentes entre observações, foi criado um modelo de previsão de deterioração futura em tempo contínuo, com a optimização de uma matriz intensidade que reproduzisse a deterioração do registo histórico adoptado e que pudesse prever para qualquer estrutura, mediante um resultado de estado de condição inicial, o futuro desempenho em qualquer intervalo de tempo. A optimização da matriz intensidade foi obtida pelos métodos de Jackson (2007) e pelo método da maximização da verosimilhança, sendo a matriz intensidade produzida por este último, aquela que se adoptou para a previsão do desempenho da rede de pontes existente. Verificou-se que o modelo de deterioração elaborado simula muito bem o registo histórico utilizado e, como tal, adequa-se à previsão do desempenho futuro de pontes de características semelhantes às do referido registo. Os resultados da previsão da deterioração foram obtidos sob a forma de média e desvio padrão.

Na elaboração de processos de Markov em cadeia existem, no entanto, algumas limitações a ter em consideração, tais como:

- Dificuldade em incluir nestes modelos o efeito de acções de manutenção que reduzam a velocidade da deterioração;
- Os índices de condição, segundo o qual são classificadas as estruturas, indicam o nível de deterioração e não representam um factor de segurança. Por exemplo, uma estrutura que visualmente apresenta sinais de pouca deterioração, pode ter sido dimensionada incorrectamente;
- A classificação atribuída às estruturas, não é fruto de métodos quantitativos mas de inspecções visuais, sujeitas à subjectividade de cada inspector;
- Na classificação dos estados de condição, não são consideradas as causas específicas da deterioração.

No capítulo 4 foi elaborado um modelo probabilístico de previsão do desempenho, considerando o efeito de acções de manutenção durante o ciclo de vida das estruturas. Foi explicado, numa primeira fase, que a introdução destas acções exige necessariamente a manipulação da deterioração calculada pelos processos de Markov, tratados no capítulo 3. Para tal, sugeriram-se vários tipos de cenários manutenção, de modo a compreender o impacte que as acções têm na deterioração das estruturas. Consideraram-se acções de manutenção que adiam a evolução da deterioração e acções correctivas que se traduzem numa efectiva melhoria do desempenho, aquando da sua aplicação.

Numa segunda fase, estudou-se a intervenção de duas acções de manutenção distintas na deterioração média da rede de pontes. Foi sugerido o tratamento com silano, como acção de manutenção preventiva baseada no tempo e a decisão de substituir o elemento, como acção correctiva baseada no estado de condição. Constatou-se que a aplicação exclusiva do tratamento com silano à rede viária, de modo a adiar a deterioração das estruturas, é uma medida insuficiente, sobretudo numa visão a longo prazo do estado de condição. Isto porque, tendo em relevância o carácter unicamente preventivo desta acção, o estado de condição médio surge sempre numa gama de valores demasiado altos, se nenhuma melhoria for de facto incluída. A aplicação apenas da acção de substituição, produziu efeitos semelhantes no controlo da deterioração, comparativamente à combinação dos cenários silano e substituição. Porém, esta combinação é uma melhor solução, pois o custo total é aproximadamente metade do associado à aplicação apenas da acção de substituição. Isto deve-se ao custo de aplicação de silano ser muito baixo quando comparado com a substituição do elemento e porque, durante a ocorrência da aplicação preventiva, não é aplicada a acção correctiva, não se suportando os elevados custos inerentes.

Conclui-se então, que as acções de carácter preventivo têm pouco impacte no desempenho das estruturas, mas têm custos de aplicação baixos. Já as acções correctivas, têm de facto, um grande impacte no desempenho mas, no entanto, a sua aplicação representa custos muito mais elevados. Uma combinação entre os dois tipos de acções, de modo a tirar partido das vantagens das duas acções, representa a melhor solução, conjugando objectivos económicos e objectivos referentes ao desempenho das estruturas.

No capítulo 5, com o objectivo de estudar as melhores estratégias que originassem o menor custo total descontado, foi efectuada uma optimização uni-objectivo usando algoritmos genéticos. Com vista à obtenção do custo total mínimo, foi realizada uma optimização das variáveis referentes ao tempo de aplicação da acção silano e tomando como hipótese três diferentes estados de condição, para os quais a acção de substituir o elemento é tomada. Sugeriram-se ainda várias proporções entre o custo base da acção de tratamento com silano e a acção de substituição.

Verificou-se do ponto de vista exclusivamente económico que, relativamente à aplicação da acção de manutenção de substituição, deixar chegar as estruturas a um estado de

condição limite e só depois proceder à sua substituição é, como esperado, a solução menos dispendiosa pois retarda ao máximo o recurso a esta manutenção.

Com os resultados obtidos, é possível concluir que a optimização das estratégias de manutenção está directamente associada à frequente aplicação de acções de manutenção preventivas, devido ao adiamento do recurso a acções de carácter correctivo, que originam custos mais elevados. Só a aproximação do custo base da acção preventiva, relativamente ao custo base da acção correctiva, é que faz com que a melhor opção a tomar seja a aplicação exclusiva e contínua da acção correctiva ao longo do ciclo de vida estudado. Como na realidade isto não ocorre, ou seja, o custo base de uma acção correctiva é bastante superior ao de uma preventiva, a inclusão de manutenções de carácter preventivo, constitui na maioria dos casos a melhor opção a tomar.

Para finalizar, o estudo desenvolvido nesta dissertação constituiu um passo importante na matéria da gestão de pontes, tendo em vista a integração num possível sistema de gestão que venha a ser elaborado em Portugal e que requeira este tipo de modelos. O programa elaborado nesta dissertação, através do software MatLab[®], executa a previsão do desempenho de qualquer ponte ou rede viária de pontes que se introduza no programa. É possível também para o utilizador, através deste programa, prever e otimizar o comportamento das estruturas com o planeamento de quaisquer tipo de acções manutenção nesta dissertação estudadas, sejam elas preventivas, correctivas ou ambas. Da mesma forma, o utilizador pode estudar e otimizar os custos associados à implementação das acções de manutenção introduzidas no modelo.

6.2 Desenvolvimentos futuros

No âmbito do trabalho desenvolvido nesta dissertação, existem ainda vários caminhos a explorar. Algumas sugestões podem ser as seguintes:

1. Abordar processos semi markovianos com o objectivo de introduzir variáveis temporais no modelo. Para tal, serão necessários dados estatísticos que possam de algum modo reproduzir o tempo decorrido no estado de condição inicial e/ou a idade das estruturas.

Os modelos semi markovianos ou não estacionários são modelos estocásticos mais realistas e rigorosos, que seguem a formulação de um processo de Markov mas, no entanto, na sua formulação dependem do tempo decorrido no estado de condição inicial e/ou da idade da ponte (dependente de variáveis temporais) (Bortot *et al.*, 2006; Jackson, 2007; Morcoux *et al.*, 2010; Ng e Moses, 1998).

No processo de Semi-Markov o intervalo de tempo entre observações, ao contrário do que sucede com as matrizes de Markov em cadeia, não segue uma distribuição exponencial ou geométrica, mas sim uma distribuição arbitrária (Ng e Moses, 1998; Yang *et al.*, 2009):

Tempo discreto:

As matrizes probabilísticas de Markov, na condição de regime não estacionário, já não são constantes para um intervalo fixo de tempo, o que significa que para um Δt específico, a matriz P pode tomar valores variáveis. Por exemplo, se se considerar uma matriz $P_{\Delta t=2}$, então para este caso $P_{\Delta t=4} \neq P_{\Delta t=2}^2$, devido à dependência do tempo.

Tempo contínuo:

A matriz intensidade Q não é constante, ou seja, os seus valores são funções exponenciais dependentes da variável tempo e como $P = \exp(Q \times \Delta t)$, então o intervalo de tempo Δt segue uma distribuição arbitrária.

Segundo Bortot *et al.* (2006), quanto mais antiga for a ponte, maior a probabilidade para um determinado intervalo de tempo desta se deteriorar para um estado de pior condição, relativamente a uma ponte mais recente. Contudo, este raciocínio pode não ser sempre correcto, podendo gerar-se inclusivamente um contra-senso. Por exemplo, considerem-se duas pontes actualmente no estado de condição 3, uma construída há 10 anos e outra há 50 anos. Ora comparativamente, a primeira demorou muito menos tempo a atingir o estado 3 do que a segunda, ou seja, deteriorou-se mais rapidamente. Assim sendo, se o historial da ponte mais recente indica que esta se deteriora mais rápido, poderá para o mesmo intervalo de tempo, ter maior probabilidade de transitar para o estado 4 do que a ponte mais antiga;

2. Elaborar processos de Markov com matrizes de ordem superior a 1, ou seja, que tenham em conta os estados de condição anteriores pelo qual passaram as pontes.

É possível modelar um processo de Markov tendo em consideração os estados anteriores que as pontes atravessaram. Esse pressuposto contraria o segundo tópico da propriedade de “falta de memória”, descrita na secção 3.3. Chama-se a esta metodologia um processo de Markov dependente dos estados anteriores. Se o processo de previsão do desempenho for dependente dos estados anteriores, então a matriz markoviana passa a ser de ordem m , em que $m - 1$ representa o número de estados passados que estão a ser considerados no estudo (Lounis e Vanier, 1998; Madanat *et al.*, 1997; Mishalani e Madanat, 2002; Morcoux e Lounis, 2006; Morcoux *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2009).

Por exemplo, uma matriz markoviana de segunda ordem para um $\Delta t = 5$ anos, considera o estado inicial e o estado anterior há 5 anos atrás:

$$P_{\Delta t=5} = \begin{array}{c} \text{Estado} \\ E1E1 \\ E2E2 \\ E1E2 \\ E3E3 \\ E1E3 \\ E2E3 \end{array} \begin{array}{ccc} E1 & E2 & E3 \\ \left[\begin{array}{ccc} 0,81 & 0,15 & 0,04 \\ 0 & 0,71 & 0,29 \\ 0 & 0,77 & 0,23 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{array} \quad (6.1)$$

em que, observando por exemplo a casa (3,3) da matriz da equação 6.1, sabendo que uma ponte há 5 anos se encontrava no estado de condição 1 e no presente se encontra no estado de condição 2, então a probabilidade de daqui a 5 anos transitar para o estado 3 é de 23%.

3. Introduzir no modelo a estimativa de probabilidades de transição recorrendo ao levantamento de opinião de peritos, para as situações em que o registo histórico de inspecções não é suficientemente credível, ou não possui uma quantidade de dados considerável.

Se não houver possibilidade de ter acesso a um historial de inspecções adequado, é ainda assim possível estimar probabilidades de transição anuais, recorrendo ao levantamento da opinião de peritos (Morcouc *et al.*, 2010; Thompson e Johnson, 2005). Através da sua experiência e conhecimentos, os peritos são questionados sobre qual o número médio de anos que metade de um conjunto de pontes demora a transitar entre estados consecutivos. Se forem necessários T_a anos, para que metade de um conjunto de pontes transite de um determinado estado para o seguinte, então a probabilidade de permanecer no mesmo estado, traduz-se genericamente no seguinte cálculo (Thompson e Johnson, 2005):

$$P_{ii} = 0,5^{(1/T_a)} \quad (6.2)$$

Uma matriz de Markov P obtida recorrendo ao levantamento da opinião de peritos, toma a seguinte forma:

$$P_{\Delta t=1} = \begin{bmatrix} P_{11} & 1 - P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & 1 - P_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & 1 - P_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 1 - P_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{55} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Através da equação 6.2, se por exemplo forem necessários 5 anos para que 50% de um conjunto de pontes transite de um estado para o seguinte, então a probabilidade de permanecer no estado inicial, no período de um ano, é dada por:

$$P_{ii} = 0,5^{(1/5)} = 87\% \quad (6.4)$$

E, como tal, a probabilidade de transitar de estado é $100\% - 87\% = 13\%$.

4. Prever na modelação da deterioração futura de pontes existentes, a incerteza associada à subjectividade das classificações, aquando das inspecções de carácter visual;
5. Elaborar uma previsão do desempenho de estruturas existentes, não só com base nas inspecções visuais, mas também que tenham em consideração resultados provenientes de ensaios não destrutivos e de carga e de aparelhos de monitorização instalados;
6. Adaptar o estudo que nesta dissertação foi feito a sistemas de gestão de pavimentos, condutas hidráulicas e outras estruturas.

Anexo A

Inventário utilizado na elaboração do modelo de deterioração

Tabela A.1: Inventário com classificações atribuídas a pontes obtidas na realização de inspeções

Ponte	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição
1	3,1072	1	3,4488	1	5,2316	2
2	10,6421	1	17,3616	3	-	-
3	2,6416	1	3,7634	1	4,899	1
4	20,7406	1	23,013	1	-	-
5	13,4009	1	19,2403	2	26,6547	4
6	35,6536	1	39,334	1	-	-
7	10,2011	1	18,1105	2	-	-
8	26,5761	1	31,4846	2	-	-
9	7,4771	1	7,825	1	9,1351	2
10	10,7271	1	15,9868	1	-	-
11	7,9481	1	8,4463	1	10,6544	2
12	11,8426	1	15,2961	1	-	-
13	27,7411	1	33,6524	2	37,8464	2
14	18,084	1	22,1183	2	29,1365	3
15	1,69	1	8,4405	2	10,3614	2

Ponte	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição
16	23,3993	1	27,7056	2	-	-
17	11,926	1	18,7436	3	25,3516	4
18	8,0906	1	12,3653	2	-	-
19	1,1127	1	7,1109	2	-	-
20	16,1652	1	21,5131	2	-	-
21	33,8888	1	36,8557	2	40,3651	3
22	7,4832	1	8,3612	1	-	-
23	26,9266	2	27,6619	2	-	-
24	33,3541	1	37,5414	2	-	-
25	33,7061	2	38,4864	3	42,3514	3
26	32,2876	2	39,8458	2	-	-
27	44,3514	1	48,5344	2	-	-
28	19,8305	2	24,8773	2	-	-
29	28,9543	1	34,6843	1	-	-
30	25,1165	2	28,4831	3	-	-
31	14,0691	2	20,4237	2	-	-
32	43,6122	2	44,8416	2	-	-
33	42,7139	2	46,5541	3	50,3543	5
34	44,5764	2	51,5367	3	-	-
35	1,5694	2	4,246	2	7,3613	3
36	15,2509	2	15,6994	2	17,3513	2
37	41,3823	2	46,3804	3	-	-
38	48,3513	2	52,3541	3	-	-
39	10,8471	2	14,9842	2	-	-
40	22,7276	2	23,8746	2	-	-
41	22,3804	2	22,9121	2	24,6844	2
42	2,337	2	9,4244	4	14,3613	4
43	24,7436	2	25,0797	2	-	-

Ponte	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição
44	27,6844	1	29,6844	2	-	-
45	43,849	2	44,2813	2	-	-
46	18,4466	2	20,3945	2	22,3615	3
47	8,4629	2	9,3393	2	11,6847	2
48	21,2564	2	28,3825	3	-	-
49	40,1975	2	42,2555	2	-	-
50	30,4701	2	36,4173	2	-	-
51	42,3651	1	45,6513	1	-	-
52	13,776	2	18,6635	3	22,6414	3
53	23,3376	2	29,6408	3	-	-
54	33,6514	2	35,3614	2	-	-
55	18,805	2	24,377	3	-	-
56	20,8095	2	25,1033	3	27,6513	4
57	18,8035	2	18,9924	2	23,6514	4
58	44,6734	2	45,0579	2	46,1361	2
59	37,3712	2	39,559	2	-	-
60	24,5588	2	25,2842	2	-	-
61	6,4304	3	8,2445	4	9,6844	4
62	28,1537	3	34,408	5	40,3615	5
63	8,8708	3	13,22	3	-	-
64	36,1724	3	37,4303	3	-	-
65	41,6513	2	42,6514	2	-	-
66	45,5223	3	50,9956	4	-	-
67	10,5085	3	11,7458	3	-	-
68	41,0855	3	45,6143	3	-	-
69	25,7204	3	27,4251	3	-	-
70	30,3613	2	38,6351	4	-	-
71	19,1478	3	23,5009	4	-	-

Ponte	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição
72	3,9718	3	4,7714	3	5,3615	3
73	35,3983	3	42,5482	5	48,6513	5
74	31,2804	3	32,3143	3	-	-
75	36,3514	2	39,3513	3	-	-
76	36,3031	3	43,6753	4	48,3514	5
77	23,654	3	31,085	4	-	-
78	3,3688	3	6,4786	4	-	-
79	34,5197	3	35,6921	3	39,6844	4
80	24,9931	3	32,6516	4	-	-
81	36,6315	3	41,6468	3	-	-
82	43,6035	3	46,1656	3	50,388	4
83	25,6878	3	33,5484	4	-	-
84	30,9799	3	36,344	4	-	-
85	23,5997	3	31,3581	3	39,3554	4
86	41,2447	3	47,0031	5	50,6463	5
87	7,7241	3	10,6187	4	-	-
88	11,6514	3	15,5614	3	-	-
89	24,2307	3	26,6403	4	-	-
90	28,6144	3	32,6849	3	-	-
91	24,0186	3	30,5558	4	-	-
92	19,4351	3	21,1095	3	23,6545	3
93	13,6866	3	14,0603	3	-	-
94	30,8727	3	36,4186	3	-	-
95	40,6547	2	43,6464	2	-	-
96	47,0065	3	47,7734	3	-	-
97	20,6273	3	25,8513	4	-	-
98	6,667	3	11,445	3	16,6878	5
99	15,9758	3	21,8907	4	-	-

Ponte	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição
100	30,2729	3	32,8918	3	-	-
101	34,868	2	41,3898	3	-	-
102	41,8278	3	45,8774	4	50,8976	5
103	3,8574	3	8,5502	4	-	-
104	13,895	3	20,049	5	-	-
105	31,618	3	36,3476	4	39,6534	4
106	8,2548	3	11,4047	3	13,9875	3
107	30,3836	4	30,989	4	32,6875	4
108	14,2871	4	17,1387	5	-	-
109	9,8799	4	13,7045	5	20,8977	5
110	7,0488	4	10,001	4	-	-
111	11,9875	3	14,6845	3	-	-
112	31,9362	4	36,701	5	37,6845	5
113	3,2317	4	6,8572	5	-	-
114	10,0363	4	16,7974	4	-	-
115	0,0424	4	2,5069	4	-	-
116	5,6844	3	7,5813	4	-	-
117	6,9291	4	11,1684	4	-	-
118	0,1546	4	6,44	4	-	-
119	40,4646	4	47,0149	4	-	-
120	28,7349	4	35,1043	5	44,2314	5
121	34,8571	4	38,7743	4	42,6544	4
122	19,3909	4	23,3283	4	-	-
123	25,3563	3	29,6848	4	-	-
124	46,5397	4	51,3056	4	-	-
125	17,5668	4	24,2625	4	26,3541	5
126	5,2191	4	6,7658	4	-	-
127	5,4366	4	9,4815	5	-	-

Ponte	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição
128	21,2001	4	23,7374	4	25,3214	4
129	49,2728	4	56,2845	5	60,1316	5
130	26,7226	4	30,2298	4	-	-
131	31,3655	3	33,3646	3	-	-
132	42,8091	4	50,3485	5	-	-
133	35,729	4	39,0662	4	45,6877	5
134	40,08	4	47,9384	4	-	-
135	8,0285	4	14,057	4	-	-
136	18,788	3	20,8953	4	-	-
137	45,8581	4	50,3039	5	55,6984	5
138	31,858	4	37,9773	5	-	-
139	41,8415	4	43,6842	4	-	-
140	47,0614	4	48,4753	4	-	-
141	17,2592	4	24,3351	4	-	-
142	29,8741	3	34,2586	3	-	-
143	44,5706	4	48,9981	4	-	-
144	44,0337	4	47,8671	4	-	-
145	50,5643	3	55,6845	3	-	-
146	20,2745	4	27,0795	5	-	-
147	39,3362	4	42,0681	4	44,6842	5
148	33,7666	4	37,9506	4	-	-
149	34,1308	4	40,3298	4	-	-
150	1,0779	4	1,2721	4	-	-
151	3,6413	3	6,6984	4	-	-
152	34,8321	4	38,8485	5	-	-
153	44,6451	4	47,6842	4	-	-
154	29,4164	4	36,8379	5	-	-
155	46,4368	4	49,8449	4	-	-

Ponte	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição	Instante (anos)	Condição
156	41,9047	5	43,6169	5	-	-
157	34,4837	5	36,6813	5	39,6514	5
158	43,657	5	48,8911	5	51,6451	5
159	37,2378	5	42,7255	5	46,6842	5
160	22,1539	5	23,0191	5	-	-
161	26,6845	4	27,6845	4	-	-
162	44,5931	5	49,8762	5	-	-
163	54,6814	4	60,3255	5	-	-
164	29,5137	5	31,4176	5	33,6854	5
165	10,3882	5	13,2369	5	-	-
166	30,094	5	37,0245	5	-	-
167	18,992	5	23,4289	5	-	-
168	27,6814	4	30,6845	4	-	-
169	40,6317	5	41,5161	5	-	-
170	48,303	5	48,753	5	50,6845	5
171	32,4339	5	33,728	5	34,8965	5
172	38,1555	5	39,5422	5	-	-
173	29,0056	5	33,2045	5	-	-
174	37,6841	4	40,3841	4	-	-
175	19,773	5	24,5276	5	26,6414	5
176	46,9189	5	49,7108	5	-	-
177	31,6111	5	35,8742	5	-	-
178	38,6841	4	44,6841	5	-	-
179	17,4881	5	23,4987	5	-	-
180	47,632	5	51,4372	5	-	-
181	24,4539	5	30,4267	5	36,6414	5
182	48,8959	5	54,5505	5	-	-
183	60,6841	4	64,8414	4	-	-

Bibliografia

- AASHTO (1993). Guidelines for bridge management systems. *Journal of performance of constructed facilities*.
- Almeida, C.J., Cruz, J.P., e Brito, J. (2009). Análise Comparativa de Sistemas de Gestão de Pontes. *ASCP'09: 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP*. Lisboa.
- Andersen, N.H. (1990). DANBRO: A Bridge Management System for many levels. *Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation*.
- Baik, H.S., Jeong, H.S., e Abraham, D.M. (2006). Estimating transition probabilities in Markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 132(1): 15–24.
- Bevc, L., Mahut, B., e Grefstad, K. (1999). Deliverable D2: Review of current practice for assessment of structural condition and classification of defects. Relatório Técnico, Brime Project (Bridge Management in Europe).
- Bladty, M. e Sorensen, M. (2009). Efficient estimation of transition rates between credit ratings from observations at discrete time points. *Quantitative Finance*, 9(2): 147–160.
- Bortot, F., Zonta, D., e Zandonini, R. (2006). A Bridge Management Strategy Based on Future Reliability and Semi-Markov Deterioration Models. *3rd International ASRANet Colloquium*, pp. 44–44. Glasgow, UK.
- Cesare, M.A., Santamarina, C., Turkstra, C., e Vanmarcke, E.H. (1992). Modeling Bridge Deterioration with Markov Chains. *Journal of Transportation Engineering*, 118(6): 820–833.
- Ching, W.K. e Ng, M.K. (2005). *Markov Chains: Models, Algorithms and Applications*. Springer, 1ª edição.
- Das, P. (1999). *Management of highway structures*. Thomas Telford Services Ltd.
- Demetrios, T. e Zhao, J. (2007). *Bridge Engineering*. McGraw-Hill, 2ª edição.

- Deshmukt, P. (2006). *Data Uncertainty In Bridge Management*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Missouri-Colômbia.
- Elbehairy, H. (2007). *Bridge management system with integrated life cycle cost optimization*. Tese de Doutorado, Universidade de Waterloo.
- Fisher, I. e Barber, W. (1930). *The theory of interest*. Macmillan New York.
- Frangopol, D.M., Kallen, M.J., e Noortwijk, J.M.V. (2004). Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6(4): 197–212.
- Frangopol, D.M. e Neves, L.C. (2003). Probabilistic Performance Prediction of Deteriorating Structures Under Different Maintenance Strategies: Condition, Safety and Cost. *Third International Workshop on Lyfe-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems and fib - JCSS Workshop on Probabilistic Modeling of Deterioration Processes in Concrete Structures*, vol. 240, pp. 2. ASCE.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-wesley.
- Hajdin, R. (2008). Kuba 4.0: The Swiss Road Structure Management System. *10th International Bridge and Structure Management Conference*, pp. 47–62.
- Hawk, H. (1999). Bridgit: user-friendly approach to bridge management. *Transportation Research Circular*, 498.
- Hawk, H. e Small, E. (1998). The BRIDGIT bridge management system. *Structural engineering international*, 8(4): 309–314.
- Hegazy, T., Elbeltagi, E., e El-Behairy, H. (2004). Bridge deck management system with integrated life-cycle cost optimization. *Maintenance and Management of Pavement and Structures*, (1866): 44–50.
- Higham, D. e Higham, N. (2005). *MATLAB guide*. Society for Industrial Mathematics.
- Holland, J. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. *The University of Michigan Press, Ann Arbor*.
- Hong, T. e Hastak, M. (2005). MEMRRES: model for evaluating maintenance, repair and rehabilitation strategies in concrete bridge decks. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 22(4): 233 – 248.
- Infopédia. Porto Editora (2003-2011). Andrei Markov. URL [http://www.infopedia.pt/\\$andrei-markov](http://www.infopedia.pt/$andrei-markov). Acedido em 19 de Dezembro de 2010.

- Jackson, C. (2007). Multi-state modelling with R: the msm package. *Cambridge, UK: Medical Research Council Biostatistics Unit.*
- Kahkonen, A. e Marshall, A. (1990). Optimization of Bridge Maintenance Appropriations with the Help of a Management System-Development of a Bridge Management System in Finland. *Bridge Management-Inspection, Maintenance, Assessment and Repair, (ed. Harding, JE et al), Elsevier Applied Science, London and New York.*
- Kalbfleisch, J.D. e Lawless, J.F. (1985). The Analysis of Panel Data Under a Markov Assumption. *Journal of the American Statistical Association*, 80(392): 863–871.
- Kallen, M. e Van Noortwijk, J. (2006). Statistical inference for Markov deterioration models of bridge conditions in the Netherlands. *Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, pp. 16–19. Taylor & Francis Group, Porto, Portugal.
- Kallen, M.J. (2009). A Comparison of Statistical Models for Visual Inspection Data. *Safety, reliability and risk structures, infrastructures and engineering systems: proceedings of the Tenth International Conference on structural safety and reliability (ICOSSAR)*, pp. 3235–3242. Osaka, Japão.
- Kelley, R. (2007). PONTIS Bridge Inspection Manual.
- Kobayashi, K., Do, M., e Han, D. (2010). Estimation of Markovian transition probabilities for pavement deterioration forecasting. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 14(3): 343–351.
- Lassen, B. (2003). Bridge Management Through the Internet with DABROweb. *9th International Bridge Management Conference*, pp. 244–251. Orlando, Florida.
- Lichtenstein, A. (1993). The silver bridge collapse recounted. *Journal of performance of constructed facilities*, 7(4): 249–261.
- Lounis, Z. e Madanat, S.M. (2002). Integrating Mechanistic and Statistical Deterioration Models for Effective Bridge Management. *7th ASCE International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation*, vol. 245, pp. 65. ASCE.
- Lounis, Z. e Vanier, D. (1998). Optimization of Bridge Maintenance Management Using Markovian Models. *Proceedings of the 5th International Conference on short and Medium Span Bridges*, vol. 2, pp. 1045–1053. Calgary.
- Madanat, S., Mishalani, R., e Ibrahim, W.H.W. (1995). Estimation of Infrastructure Transition Probabilities from Condition Rating Data. *Journal of Infrastructure Systems*, 1(2): 120–125.

- Madanat, S.M., Karlaftis, M.G., e McCarthy, P.S. (1997). Probabilistic Infrastructure Deterioration Models with Panel Data. *Journal of Infrastructure Systems*, 3(1): 4–9.
- Mauch, M. e Madanat, S. (2001). Semiparametric Hazard Rate Models of Reinforced Concrete Bridge Deck Deterioration. *Journal of Infrastructure Systems*, 7(2): 49–57.
- Mendonça, T.P. (2002). Sistema de gestão de um parque de obras de arte. *Betão Estrutural*. Lisboa, LNEC.
- Mendonça, T.P. (n.d). Grupo Betar. URL <http://www.betar.pt/>. Acedido em 17 de Janeiro de 2011.
- Mendonça, T.P., Vieira, A.R., Brito, V.R., e Paulo, P.P. (2006). Bridge Management System: GOA. *3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, International Association for Bridge Maintenance and Safety*. Porto.
- Mishalani, R.G. e Madanat, S.M. (2002). Computation of Infrastructure Transition Probabilities Using Stochastic Duration Models. *Journal of Infrastructure Systems*, 8(4): 139–148.
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. The MIT press.
- Monika, S.O. (2005). *Statistical inference and hypothesis testing for Markov chains with Interval Censoring - Application to bridge condition data in the Netherlands*. Dissertação de Mestrado, Delft University of Technology.
- Morcous, G. (2006). Performance prediction of bridge deck systems using Markov chains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(2): 146–155.
- Morcous, G. e Lounis, Z. (2006). Management of bridge decks using stochastic deterioration models and multi-criteria optimization. *7th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, pp. 1–10. Montreal.
- Morcous, G., Lounis, Z., e Cho, Y. (2010). An Integrated System for Bridge Management Using Probabilistic and Mechanistic Deterioration Models: Application to Bridge Decks. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 14(4): 527–537.
- Neves, L.C. (2005). *Life-Cycle analysis of bridges considering condition, safety, and maintenance cost interaction*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.
- Neves, L.C. (2006). Optimização das estratégias de conservação. *Segurança, Manutenção e Conservação de Pontes*, pp. 71–116.
- Neves, L.C. (2008). Gestão de Pontes ao Longo da sua Vida Útil. *Engenharia e Vida*, (45).

- Neves, L.C. e Frangopol, D.M. (2005). Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges. *Reliability Engineering and System Safety*, 89(2): 185–198.
- Neves, L.C., Frangopol, D.M., e Petcherdchoo, A. (2006). Probabilistic Lifetime-Oriented Multiobjective Optimization of Bridge Maintenance: Combination of Maintenance Types. *Journal of Structural Engineering*, 132(11): 1821–1834.
- Ng, S. e Moses, F. (1966). Prediction of bridge service life using time-dependent reliability analysis. *Harding, JE, Parke, GA R and Ryall, MJ (eds) Bridge Management*, 3.
- Ng, S.K. e Moses, F. (1998). Bridge deterioration modeling using semi-Markov theory. *Structural Safety and Reliability, Vols. 1-3*, pp. 113–120.
- Ng, S.K. e Moses, F. (1999). Optimal policy for civil infrastructure systems using semi-Markov decision process. *Case Studies in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructure Systems*, pp. 202–215.
- Pastor, A.R., Torreabla, A., Cabañas, C.V., e Bruna, C.L. (2000). Deliverable D7: Decision on repair/replacement. Relatório Técnico, Brime Project (Bridge Management in Europe).
- Pfeil, W. (2004). *Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias*. Ministério dos Transportes: Departamento nacional de Infra-Estruturas de Transportes, Rio de Janeiro, 2^a edição.
- PIARC (2004). Asset management in relation to bridge management. Committee on Road Bridges, World Road Association.
- Poças, R. (2009). *Gestão do Ciclo de Vida de Pontes*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Robelin, C.A. e Madanat, S.M. (2007). History-Dependent Bridge Deck Maintenance and Replacement Optimization with Markov Decision Processes. *Journal of Infrastructure Systems*, 13(3): 195–201.
- Ryall, M.J. (2001). *Bridge Management*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 1^a edição.
- Santiago, S. (2005). Sistemas de Gestão de Obras de Arte: Módulo de Inspeção. URL <http://www.dec.fct.unl.pt/UNIC/palestras/Palestras2005/Brisa/SGOA.pdf>. Acedido em 11 de Janeiro de 2011.
- Scherer, W.T. e Glagola, D.M. (1994). Markovian Models for Bridge Maintenance Management. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 120(1): 37–51.
- Soderqvist, M. e Veijola, M. (1998). The Finnish bridge management system. *Structural engineering international*, 8(4): 315–319.

- Thompson, P. (1993a). The Pontis bridge management system. *Pacific Rim TransTech Conference: International Ties, Management Systems, Propulsion Technology, Strategic Highway Research Program*, vol. 2, pp. 500–506.
- Thompson, P., Small, E., Johnson, M., e Marshall, A. (1998). The Pontis bridge management system. *Structural Engineering International*, 8(4): 303–308.
- Thompson, P.D. (1993b). PONTIS: the maturing of bridge management systems in the USA. *2nd International conference on Bridge Management*, pp. 971–978. London.
- Thompson, P.D. e Johnson, M.B. (2005). Markovian bridge deterioration: developing models from historical data. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1(1): 85–91.
- West Virginia Division of Culture and History (n.d). West Virginia Archives & History. URL <http://www.wvculture.org/history/thisdayinwvhistory/1215.html>. Acedido em 29 de Novembro de 2010.
- Woodward, R.J., Cullington, D.W., Daly, A.F., Vassie, P.R., Haardt, P., Kashner, R., Astudillo, R., Velando, C., Godart, B., Cremona, C., Mahut, B., Raharinaivo, A., Lau, Markey, I., Bevc, L., e Perus, I. (2001). Deliverable D14: Final report. Relatório Técnico, Brime Project (Bridge Management in Europe).
- Yang, Y.N., Pam, H.J., e Kumaraswamy, M.M. (2009). Framework Development of Performance Prediction Models for Concrete Bridges. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 135(8): 545–554.