



João Pedro Assis Gambóias

Licenciado

Modelação da Degradação de Pontes Considerando a Incerteza Associada às Inspeções

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

Orientador: Prof. Doutor Luís Armando Canhoto Neves

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Lopes Batista
Arguente: Prof. Doutor João Burguete Cardoso
Vogal: Prof. Doutor Luís Armando Canhoto Neves

“Copyright” João Pedro Assis Gambóias, FCT/UNL e UNL

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

Agradecimentos

Ao professor Luís Canhoto Neves, pela disponibilidade e partilha de conhecimentos nos problemas que surgiram ao longo desta dissertação.

À minha família, por tudo o que fizeram ao longo da minha vida e aos meus amigos, pelo constante apoio ao longo do curso.

Resumo

Durante as últimas décadas, nos países desenvolvidos, tem havido um grande investimento no desenvolvimento de redes viárias, levando à construção de um grande número de pontes e viadutos. No entanto, até à década de 1960 não foi dada grande importância à manutenção adequada destas estruturas, a qual só se tornou evidente após a ocorrência de acidentes graves. Como consequência, foram desenvolvidos sistemas de gestão de pontes, de modo a gerir a sua manutenção.

Neste trabalho foram apresentados alguns dos sistemas usados para este fim, bem como as suas características. Estes sistemas são baseados em informação histórica, obtida a partir de inspecções.

Este trabalho, tem como principal objectivo, desenvolver um modelo para calcular a degradação do desempenho de uma ponte específica, partindo de informação histórica fornecida por inspecções. Este modelo é desenvolvido num âmbito probabilístico, usando o método de Monte Carlo. São utilizados processos de Markov para modelar a degradação do desempenho de um conjunto de pontes semelhantes, e Actualização Bayesiana, para combinar esta informação com resultados de inspecções.

São ainda estudadas intervenções de manutenção, de modo a controlar a degradação do desempenho das estruturas. As intervenções estudadas foram apenas de carácter correctivo, nomeadamente reabilitação. São estudados os seus custos e o efeito no desempenho de um conjunto de pontes pertencente a uma rede viária.

Palavras chave

Pontes, Processos de Markov, Actualização Bayesiana, inspecções, degradação, custos, reabilitação.

Abstract

During the last decades, in developed countries, there has been a great investment in the development of road networks, leading to the construction of a large number of bridges and viaducts. However, until the 1960s little importance was given to the proper maintenance of these structures, which only became apparent after the occurrence of accidents caused by its collapse. As a result, systems have been developed for the administration of bridges, in order to manage its maintenance. This work shows some of the systems were used for this purpose, as well as their characteristics. These systems are based on historical information obtained from inspections.

The main objective of this work is to develop a model to calculate the performance degradation of a specific bridge, from historical information provided by inspections. This model is developed in a probabilistic framework, using the Monte Carlo method. Markov processes are used to model the performance degradation of a similar set of bridges, and Update Bayesian is used to apply this degradation to a specific bridge.

Further studies are made on maintenance interventions in order to control degradation of the performance of the structures. The interventions studied were only corrective in nature, specifically rehabilitation. Its costs are studied and also its effect on the performance of a set of bridges belonging to a road network.

Keywords:

Bridges, Markov Processes, Bayesian Updating, inspections, degradation, costs, rehabilitation.

Índice de Matérias

Copyright	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xxi
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e enquadramento	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Sistemas de Gestão de Pontes	5
2.1 Introdução	5
2.2 Componentes de Sistema de Gestão de Pontes	6
2.2.1 Inventário	6
2.2.2 Modelo de deterioração	6
2.2.3 Optimização	7
2.2.4 Actualização	7
2.3 Exemplos de Sistemas de Gestão de Pontes	7
2.3.1 PONTIS	7
2.3.2 BRIDGIT	9
2.3.3 FinnRABMS	9
2.3.4 GOA	10
2.4 Tipos de inspecções	10

2.5	Índices de Condição	11
2.6	Conclusões	12
3	Modelos de previsão de desempenho	13
3.1	Introdução	13
3.2	Modelos de deterioração	14
3.2.1	Modelo de deterioração linear	14
3.2.2	Modelo não linear	16
3.3	Modelo estocástico: Processos de Markov	17
3.4	Representação da condição	19
3.4.1	Aplicabilidade a pontes	19
3.5	Matriz de intensidade	19
3.5.1	Significado	19
3.6	Ajuste da matriz de intensidade	21
3.7	Matriz de Markov	22
3.8	Incerteza no modelo de previsão	23
3.8.1	Incerteza na matriz de intensidade	23
3.8.2	Incerteza na condição inicial	24
3.9	Actualização Bayesiana	24
3.9.1	Interesse	24
3.9.2	Incerteza no resultado das inspecções	25
3.10	Simulação de Monte Carlo	26
3.10.1	Modelação da incerteza no modelo de degradação	29
3.10.2	Modelação da incerteza no resultado da inspecção	30
4	Exemplo de aplicação e estudo paramétrico	33
4.1	Introdução	33
4.2	Exemplo de aplicação	33
4.2.1	Condição inicial	34
4.2.2	Previsão inicial	35
4.2.3	Distribuição de probabilidades da condição ao longo do ciclo de vida da estrutura	35
4.2.4	Actualização Bayesiana	37
4.2.5	Avaliação do impacte da incerteza	39
4.3	Estudo paramétrico	42
4.3.1	Influência da incerteza na previsão do desempenho na condição actualizada	42
4.3.2	Influência da incerteza na inspecção na condição actualizada	59
4.3.3	Influência do número de inspecções	68
4.4	Conclusões	72

5 Acções de Reabilitação	75
5.1 Introdução	75
5.1.1 Intervenções de reabilitação	76
5.1.2 Intervenções de manutenção preventiva	76
5.1.3 Actualização do custo	77
5.2 Estratégia de Reabilitação	77
5.2.1 Exemplo de aplicação	78
5.2.2 Influência do ano de inspecção no custo	81
5.3 Conclusões	84
6 Conclusões e desenvolvimentos futuros	89
6.1 Conclusões	89
6.2 Desenvolvimentos futuros	91
7 Código	93
Bibliografia	99

Índice de Figuras

3.1	Evolução do índice de condição ao longo do tempo, usando um modelo de degradação linear	15
3.2	Evolução do índice de segurança ao longo do tempo, usando um modelo de degradação linear	16
3.3	Evolução do índice de segurança ao longo do tempo, usando um modelo de degradação não linear	17
3.4	Fluxograma da simulação do modelo de degradação usando o método de Monte Carlo	28
3.5	Fluxograma da simulação do modelo de actualização usando o método de Monte Carlo	29
3.6	Distribuição de probabilidades da inspecção para $\mu = 2$ e $\sigma = 0.9$	30
4.1	Probabilidade de cada condição ao longo de 100 anos	36
4.2	Índice de condição médio ao longo de 100 anos e respectiva distribuição de probabilidades aos anos 0, 20, 40, 60 e 80	37
4.3	Desvio padrão do índice de condição ao longo de 100 anos	38
4.4	Índice de condição médio, para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$	40
4.5	Desvio padrão do índice de condição médio, para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$	40
4.6	Índice de condição médio, considerando dois casos para condição inicial, $C_0 = [0.5 \ 0.3 \ 0.2 \ 0 \ 0]^T$ e $C_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	41
4.7	Desvio padrão do índice de condição, considerando dois casos para condição inicial, $C_0 = [0.5 \ 0.3 \ 0.2 \ 0 \ 0]^T$ e $C_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	42
4.8	Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$	43

- 4.9 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 44
- 4.10 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 44
- 4.11 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 46
- 4.12 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 46
- 4.13 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 47
- 4.14 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 48
- 4.15 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 48
- 4.16 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 49

4.17 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 50

4.18 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 50

4.19 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 51

4.20 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 51

4.21 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 52

4.22 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 52

4.23 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 54

- 4.24 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 54
- 4.25 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 55
- 4.26 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 56
- 4.27 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 56
- 4.28 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 57
- 4.29 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 58
- 4.30 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 58

4.31 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$ 59

4.32 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001, \sigma_{insp} = 0.2, \sigma_{insp} = 0.5, \sigma_{insp} = 0.9$ 60

4.33 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001, \sigma_{insp} = 0.2, \sigma_{insp} = 0.5, \sigma_{insp} = 0.9$ 61

4.34 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001, \sigma_{insp} = 0.2, \sigma_{insp} = 0.5, \sigma_{insp} = 0.9$ 61

4.35 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001, \sigma_{insp} = 0.2, \sigma_{insp} = 0.5, \sigma_{insp} = 0.9$ 62

4.36 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001, \sigma_{insp} = 0.2, \sigma_{insp} = 0.5, \sigma_{insp} = 0.9$ 63

4.37 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001, \sigma_{insp} = 0.2, \sigma_{insp} = 0.5, \sigma_{insp} = 0.9$ 64

4.38 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$ 64

4.39 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$ 65

4.40 Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$ 65

4.41 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$ 66

4.42 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$ 67

4.43 Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$ 67

4.44 Índice de condição médio, para quatro situações: sem considerar inspecções, considerando uma inspecção no ano 15 com resultado $C_{insp} = 2$, considerando duas inspecções nos anos 15 e 30 com resultados $C_{insp} = 2$ e $C_{insp} = 3$, respectivamente e considerando três inspecções, nos anos 15, 30 e 45, com resultados $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$, respectivamente 69

4.45 Desvio padrão da condição inicial e da condição actualizada, com uma, duas e três inspecções 69

4.46 Probabilidade associada às condições 4 e 5, ao longo de 200 anos, para quatro situações: sem considerar inspecções, considerando uma inspecção no ano 15 com resultado $C_{insp} = 2$, considerando duas inspecções nos anos 15 e 30 com resultados $C_{insp} = 2$ e $C_{insp} = 3$, respectivamente e considerando três inspecções, nos anos 15, 30 e 45, com resultados $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$, respectivamente	71
5.1 Índice de condição, considerando uma estratégia de reabilitação	78
5.2 Custo actualizado acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação	79
5.3 Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação	80
5.4 Índice de condição médio e respectiva distribuição de probabilidades no ano 40, com e sem considerar uma estratégia de reabilitação	81
5.5 Desvio padrão do índice de condição, com e sem considerar uma estratégia de reabilitação	82
5.6 Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspecção, no ano 30, com resultado $C_{insp} = 2$	83
5.7 Desvio padrão do custo acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspecção, no ano 30, com resultado $C_{insp} = 2$	84
5.8 Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspecção, no ano 10, para diferentes resultados possíveis da inspecção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$	85
5.9 Desvio padrão do custo acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspecção, no ano 10, para diferentes resultados possíveis da inspecção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$	86
5.10 Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspecção, no ano 30, para diferentes resultados possíveis da inspecção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$	86
5.11 Desvio padrão do custo acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspecção, no ano 30, para diferentes resultados possíveis da inspecção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$	87

5.12	Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 50, para diferentes resultados possíveis da inspeção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$	87
5.13	Desvio padrão do custo acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 50, para diferentes resultados possíveis da inspeção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$	88
7.1	94
7.2	95
7.3	96
7.4	97

Índice de Tabelas

2.1	Tabela para classificação de pontes com estrutura metálica	12
4.1	Dados históricos de 5 amostras, no instante da inspecção, τ e no instante $\Delta\tau$	38

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

∂ derivada parcial

Δ_t intervalo de tempo

θ intensidade de transição

μ média

σ desvio padrão

C condição

C_0 condição inicial

$f'(C_T)$ distribuição de probabilidade considerando apenas a inspecção

$f''(C_T)$ distribuição de probabilidade actualizada

$L(C_T)$ distribuição de probabilidade da previsão

n número de amostras

p_{ij} probabilidade de transição

P matriz de Markov

Q matriz de intensidade de transição

s estado

t tempo

t_i tempo inicial

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e enquadramento

As pontes são elementos integrantes das redes viárias, fazendo a ligação entre dois pontos da rede separados por um obstáculo físico¹. Independentemente dos materiais ou técnicas usadas na construção de uma ponte, ao longo do tempo, esta vai estar sujeita a degradação, diminuindo assim o seu desempenho. Esta degradação depende de variados factores, como sejam: a solução estrutural, materiais, qualidade de construção, dimensionamento, meio ambiente, incêndios, sismos, cheias e intensidade de tráfego[1]. A diminuição do desempenho tem consequências nefastas tanto para os utilizadores, devido à diminuição do nível de serviço, ao risco de colapso e à possível interrupção da circulação devido a trabalhos de manutenção ou reabilitação, como para a entidade responsável pela manutenção de rede viária, devido aos custos inerentes à reabilitação e substituição de estruturas.

O século XX foi uma época de grande desenvolvimento de redes viárias nos países desenvolvidos, levando à construção de um grande número de pontes. No início, para grande parte das estruturas, o principal critério para a escolha da solução estrutural a adoptar foi o custo inicial. Foi, em geral, dada pouca importância ao custo total ao longo do ciclo de vida das estruturas, bem como às inspecções para avaliar o desempenho das estruturas ou à implementação de um plano de manutenção adequado.

Devido aos avanços alcançados nos últimos anos ao nível de software de modelação de estruturas e optimização do dimensionamento estrutural, tornou-se

¹Embora a denominação ponte seja usada em Portugal para obras de arte que atravessam linhas de água, do ponto de vista estrutural todas as obras de arte têm um comportamento semelhante e o termo ponte será utilizado no seu sentido mais lato.

possível usar coeficientes de segurança mais baixos. Esta evolução tem aberto caminho para a construção de pontes mais avançadas, vencendo vãos anteriormente impossíveis. No entanto, tornou também essas mesmas estruturas mais susceptíveis às consequências da degradação do desempenho, obrigando a métodos mais eficientes de monitorização e planeamento de intervenções de manutenção e reabilitação.

Hoje em dia, nos países desenvolvidos, tem-se assistido a uma redução da necessidade de novas redes viárias. As redes existentes encontram-se significativamente deterioradas, levando a um grande aumento da necessidade de manutenção e reabilitação das estruturas que as compõem. A deterioração destas estruturas é de grande importância, devido às consequências do seu colapso, tanto a nível humano como económico[2].

Apesar do perigo que representa o colapso de uma destas estruturas, continua a existir dificuldade por parte dos engenheiros civis em justificar a importância da manutenção e reabilitação destas infra-estruturas. Esta dificuldade deve-se ao longo ciclo de vida de grande parte das estruturas que compõem uma rede viária. Estas estruturas são vistas como eternas e, como tal, continua a haver relutância em fazer os investimentos necessários para a sua manutenção e reabilitação[2].

1.2 Objectivos

O objectivo desta tese é desenvolver e implementar um método que permita prever a degradação do desempenho de uma ponte específica, a partir de informação histórica proveniente de inspecções. Este tema tem-se tornado importante nas últimas décadas, devido ao aumento da importância da manutenção de pontes. Para tal é desenvolvido um modelo probabilístico, usando o método de Monte Carlo. De modo a calcular uma previsão da degradação do desempenho de um conjunto de estruturas ao longo do seu ciclo de vida são usados processos de Markov.

Para aplicar a previsão a uma ponte específica, é usada a Actualização Bayesiana, através da qual é possível conjugar a informação proveniente da previsão da degradação do desempenho do conjunto com o resultado dado por inspecções realizadas na ponte em causa. Ao otimizar a previsão da degradação do desempenho de cada ponte em particular, torna-se possível planear as inspecções e as acções de manutenção de forma mais eficiente.

Por fim, é realizado um estudo dos efeitos e custos de acções de reabilitação, usando os resultados obtidos anteriormente. Com este estudo pretende-se analisar qual o efeito das acções de reabilitação na degradação do desempenho das estruturas e no custo.

1.3 Estrutura da dissertação

No capítulo 1 são apresentados os objectivos desta dissertação e é abordado o seu tema de forma geral.

No capítulo 2 são descritos os sistemas de gestão de pontes existentes, apresentando as suas componentes e objectivos e são dados exemplos de sistemas existentes.

No capítulo 3 é apresentado um modelo probabilístico de previsão do desempenho futuro de pontes existentes, baseado em cadeias de Markov e é desenvolvido um modelo para conjugar a informação histórica de modo a calcular uma previsão do desempenho futuro de uma ponte específica, baseado em actualização Bayesiana

No capítulo 4 é apresentado um exemplo de aplicação dos modelos apresentados no capítulo 3 e é realizado um estudo paramétrico de forma a analisar os efeitos da incerteza em cada um dos modelos.

No capítulo 5 é estudado o impacte das acções de reabilitação, tanto a nível do desempenho, como a nível de custos considerando os modelos apresentados no capítulo 3 e uma estratégia de reabilitação.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostos os desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Sistemas de Gestão de Pontes

2.1 Introdução

Devido à grande quantidade de pontes existentes numa rede viária, torna-se necessário um esforço financeiro bastante grande em intervenções de manutenção e reabilitação de modo a manter as condições de serviço ao longo do seu tempo de vida. Para além do custo financeiro, há que ter em conta os custos e o incómodo para os utilizadores associados às interrupções provocadas pelas operações de manutenção e reabilitação e ao risco de colapso da estrutura.

Durante o século XX, nos países desenvolvidos, houve uma grande expansão da rede viária, sem que tenha sido dada grande importância à sua manutenção ou tempo de vida. Nesse período, os esforços concentraram-se apenas na construção de infra-estruturas [3]. A importância das inspeções periódicas de pontes só se tornou evidente após o colapso da ponte de Silver Bridge, em 1967, que provocou 46 mortos[4]. Após este acidente, o Congresso dos Estados Unidos aprovou o *Highway Safety Act*, que obrigava à realização de inspeções periódicas a pontes e viadutos[5].

Inicialmente os resultados destas inspeções eram usados apenas como meio de avaliar a necessidade de intervenção a curto prazo, não sendo usados para programar um calendário de inspeções ou para prever o seu desempenho futuro. Com a vulgarização e aumento de capacidade dos computadores, tornou-se possível o desenvolvimento de sistemas capazes de prever o desempenho futuro das estruturas e otimizar a manutenção e reabilitação, diminuindo os custos financeiros e as interrupções na utilização da rede viária[3].

Segundo [6], os principais objectivos de um sistema de gestão de pontes, por ordem decrescente de importância, são:

- Garantir a segurança dos utilizadores da rede e de terceiros
- Garantir um determinado nível de serviço, o qual pode variar de ponte para ponte
- Garantir a conservação a longo prazo do património

2.2 Componentes de Sistema de Gestão de Pontes

Os sistemas mais antigos tinham muito poucas funcionalidades, servindo simplesmente como inventário de pontes. Mais tarde foram adicionadas funcionalidades como armazenamento de resultados de inspecções, controlo de custos e, mais tarde, modelos de deterioração, de modo a prever o desempenho futuro das estruturas.

A estrutura de um sistema de gestão de pontes é específica de cada sistema. No entanto, em todos é possível identificar uma organização comum. Segundo [7], todos os sistemas de gestão de pontes modernos obedecem a uma estrutura base comum, composta por quatro componentes base: inventário, modelo de deterioração, optimização e actualização.

2.2.1 Inventário

O inventário serve como base de todo o sistema, fornecendo a informação usada para as outras componentes. Contém documentação relativa a cada ponte, como a localização, tipo de estrutura, fotos e, se possível, desenhos do projecto e de alterações posteriores, caso existam. É usado para armazenar a informação resultante das inspecções, como a condição de cada parte da estrutura, a condição da estrutura como um todo, registo e fotos de defeitos encontrados[3, 1].

2.2.2 Modelo de deterioração

O modelo de deterioração tem como função prever o desempenho futuro das estruturas. Para tal usa a informação dada pelas inspecções, armazenada no inventário. Esta previsão pode ser usada para agendar acções de manutenção, de modo a atrasar a degradação, e acções de reabilitação, para melhorar a condição da estrutura. Um modelo de deterioração tem sempre associada uma incerteza significativa, e, como tal, os seus resultados não são objectivos,

devendo-se sempre ter em conta o erro que lhes está associado. Esta incerteza será tanto menor quanto maior for a qualidade e quantidade de dados disponíveis no inventário. Para além disto, os modelos de deterioração normalmente usam como medida de desempenho o índice de condição, que é uma medida dos efeitos da deterioração e não da segurança da estrutura. Os métodos de cálculo mais comuns para esta previsão são os processos de Markov, havendo já em desenvolvimento sistemas baseados em inteligência artificial. Um modelo de deterioração deve ainda ser capaz de ter em consideração os efeitos das acções de manutenção e de reabilitação às quais a estrutura tenha sido sujeita[3, 1].

2.2.3 Optimização

De modo a cumprir a sua função, um sistema de gestão de pontes deve ter em conta não só a degradação do desempenho das estruturas, mas também todas as consequências que esta implica. O sistema deve determinar uma estratégia que melhor cumpra os objectivos e orçamento definidos pelo utilizador, determinando a estratégia menos dispendiosa para a manutenção de toda a rede[3]. A estratégia menos dispendiosa deve ter em conta não só os custos financeiros inerentes às acções de manutenção e de reabilitação, mas também os custos devido às interrupções na circulação. O modelo de optimização pode ser considerado o centro de todo o sistema, uma vez que faz a interligação entre todas as suas componentes[3, 1].

2.2.4 Actualização

A componente de actualização tem como função actualizar os resultados das restantes componentes, de modo a responder a nova informação proveniente de inspecções ou de alterações de objectivos por parte do utilizador[3].

2.3 Exemplos de Sistemas de Gestão de Pontes

2.3.1 PONTIS

Criado em 1992, pela *Federal Highway Administration*, o Pontis é considerado um dos softwares de gestão de pontes mais avançados actualmente, sendo usado em 39 estados dos EUA[8]. O PONTIS recorre a uma abordagem estatística, sendo a degradação modelada recorrendo a cadeias de Markov. Cada elemento de uma ponte é analisado por si, como parte de um conjunto de elementos, e a sua degradação é modelada separadamente da ponte. A condição, tanto da ponte como um todo como de cada elemento individual, é quantificada usando índices

de condição, numa escala de certeza[9].

Segundo [9], a manutenção recomendada para cada ponte é obtida a partir duma análise custo-benefício, em que o benefício é calculado considerando a realização da intervenção ou o seu adiamento. Para cada ponte é determinado o nível de serviço adequado, segundo as respectivas exigências funcionais.

O PONTIS é composto por três componentes:

- **Modelo de manutenção** - Inclui o armazenamento de dados, a modelação da deterioração e a optimização da manutenção[9]:

- Dados de inspecções - Inclui informação sobre a condição de cada ponte, como um todo, e sobre cada elemento, classificados numa escala discreta. Estes dados são obtidos recorrendo a inspecções visuais, realizadas por pessoal especializado.

- Modelação da deterioração - A deterioração de cada ponte e de cada um dos elementos que a compõem é determinada usando cadeias de Markov. Para tal são tidas em conta não só o elemento em causa mas também o ambiente onde este se encontra.

Para cada condição é determinado o custo associado às várias opções de intervenção possíveis, incluindo a opção de não realizar qualquer intervenção. Este custo tem em conta não só o custo da intervenção mas também o custo associado ao possível colapso da estrutura[9].

- Optimização da manutenção - Tem como objectivo determinar o conjunto de intervenções que, a longo prazo, minimizem o custo ao longo do ciclo de vida, mantendo o nível de serviço adequado.

- **Modelo de intervenção** -

Este modelo tem como objectivo combinar o nível de serviço mínimo e informação relativa a cada ponte, que permita avaliar os custos associados a uma intervenção. Os critérios relativos ao nível de serviço pretendido, volume de tráfego e classificação funcional são fornecidos pelo utilizador e servem de base para determinar as necessidades de intervenção em cada estrutura[9].

- **Planeamento a nível de projecto** - Tem como função determinar quais os projectos a executar, de acordo com a sua prioridade. Para tal, os projectos são ordenados de acordo com uma análise custo/benefício e seleccionados de acordo com o orçamento disponível[9].

2.3.2 BRIDGIT

Criado em 1983, pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), o BRIDGIT é bastante semelhante ao PONTIS em termos de funções e capacidades, sendo a principal diferença entre os dois o modelo de optimização. Enquanto o PONTIS usa uma abordagem "do topo para a base", o BRIDGIT usa uma abordagem "da base para o topo", ou seja, partindo de cada ponte para a rede. Assim sendo, tem maior capacidade de análise de cada ponte individualmente, enquanto o PONTIS dá maior importância à gestão da rede como um todo, tornando-o mais apto à gestão de redes com menor número de estruturas[10, 11].

A degradação do desempenho é prevista usando cadeias de Markov, tal como no PONTIS. A necessidade de intervenções é determinada segundo o nível de serviço pretendido, de acordo com uma análise custo/benefício.

2.3.3 FinnRABMS

A *Finnish National Road Administration* concluiu em 1998 o desenvolvimento do software de gestão de pontes, tendo como objectivo a atribuição de fundos para intervenções de manutenção, reabilitação e substituição do seu inventário de pontes, minimizando os custos e garantindo a segurança e um nível de serviço aceitáveis[12]. A base de dados inclui o registo das estruturas que compõem o inventário e informação sobre os danos e o nível de deterioração observados nas inspecções, juntamente com detalhes estruturais, administrativos e de tráfego. Este sistema tem duas vertentes de gestão: ao nível da rede e ao nível de projecto[12]:

- **Rede** - A gestão ao nível da rede usa processos de Markov para modelar a deterioração das estruturas que compõem a rede. De modo a analisar os efeitos das várias acções de manutenção, é usada programação linear, sendo as decisões sobre quais as acções a implementar avaliadas segundo três vertentes: a análise a longo prazo, a análise a curto prazo e análise da rede.
 - Análise a longo prazo - tem como objectivo encontrar a distribuição de condição óptima com custos mínimos, garantindo a segurança dos utilizadores um nível de serviço aceitável. A modelação da degradação do desempenho das estruturas é feita com base em cadeias de Markov.
 - Análise a curto prazo - Apresenta a solução óptima para os anos mais próximos, de forma a atingir os objectivos definidos na análise a longo

prazo. Determina quais as estruturas em más condições, de modo a planear as acções de manutenção. Esta análise é repetida todos os anos.

- Análise de rede - Contempla a função *What if?*, que permite analisar as várias opções possíveis para o nível de serviço, segurança, restrições do orçamento e outras variáveis.
- **Projecto** - Usa os resultados da análise da rede para definir as medidas a tomar em cada estrutura. Permite a análise de custos ao longo do ciclo de vida de cada estrutura e apresenta a possibilidade de definir as intervenções a realizar, de modo a obter o custo mínimo ao longo do ciclo de vida da estrutura.

2.3.4 GOA

Em Portugal, a manutenção de pontes ganhou importância depois do acidente de Entre-os-Rios, em 2001[3]. Desde então têm havido grandes desenvolvimentos no desenvolvimento de ferramentas que possibilitem garantir a segurança nas redes viárias nacionais. O GOA é um software desenvolvido em Portugal, pela BETAR, usado actualmente pelas Estradas de Portugal, pela REFER e pelas principais concessionárias de auto-estradas. Segundo [13], o GOA tem como principal função o inventário de estruturas de uma rede, incluindo informações sobre a estrutura, estado de condição e acções de manutenção aplicadas. Para além do inventário, permite estimar o custo de acções de manutenção. Este software não contempla actualmente a previsão do desempenho futuro de pontes.

2.4 Tipos de inspecções

Um sistema de gestão de pontes assenta em planos de inspecções das estruturas. Estas inspecções têm como objectivo avaliar o estado de deterioração da estrutura, através da identificação e classificação de defeitos que afectem o seu desempenho, tendo em conta a sua intensidade e extensão[3]. As inspecções podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- **Inspecção de rotina** - Realizada por pessoal não especializado, tem como objectivo a detecção de danos ou defeitos superficiais. Baseia-se na observação visual e apenas dá origem a um relatório se forem encontrados danos ou defeitos que assim o justifiquem. Geralmente não têm um calendário definido[3, 1].

- **Inspecção principal** - Realizada por pessoal especializado, tem como objectivo a avaliação detalhada da ponte e de todos os elementos fundamentais da estrutura. É efectuada a intervalos regulares que variam, dependendo do país, entre os 3 e os 6 anos. Os elementos estruturais são analisados visualmente a curta distância e, conforme a necessidade e a solução estrutural da ponte. Tem como resultado um relatório onde são classificados os elementos fundamentais, segundo uma tabela de classificação da condição de um elemento estrutural[3, 1].
- **Inspecção especial** - Inspecção detalhada, realizada por pessoal especializado. Tem lugar quando, durante uma inspecção principal ou de rotina, são detectados defeitos graves que possam por em causa a segurança da estrutura. Normalmente precede acções de manutenção ou reabilitação da estrutura[3, 1].
- **Inspecção excepcional** - É realizada na sequência de acontecimentos extraordinários, como: colisões, inundações, sismos, incêndios, colisões, derrocadas, problemas específicos em estruturas semelhantes [1]

2.5 Índices de Condição

Para classificar o desempenho de um elemento estrutural, usando critérios objectivos e uniformes para todas as inspecções, são usadas tabelas de condição. A uniformização de critérios permite o tratamento dos dados de um modo consistente, reduzindo o impacte de erros humanos. Como exemplo apresenta-se uma tabela adaptada de [14], usada para classificação de pontes com estrutura metálica.

Note-se que a descrição de cada condição é qualitativa, ficando assim sujeita à experiência do inspector e aos meios que tenha à disposição para realizar a inspecção. Esta limitação aumenta a possibilidade de erros humanos e, por consequência, a incerteza associada ao resultado da inspecção.

Os índices de condição dos vários elementos da estrutura são combinados de modo a obter um índice global da estrutura. Este índice global pode ser calculado como uma média ponderada dos índices de cada um dos elementos, o índice do elemento mais deteriorado, ou uma combinação dos dois métodos[3].

Note-se que o índice de condição não é uma medida directa da segurança da

Índice de Condição	Descrição
Condição 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.
Condição 2	Existe pouca ou nenhuma corrosão activa. Observa-se oxidação na superfície ou começo de formação desta. O sistema de pintura pode encontrar-se riscado, a descascar, ou a demonstrar outras evidências de desgaste do sistema de pintura, mas sem expor o metal.
Condição 3	A existência de oxidação na superfície do material é prevalente. Pode haver exposição do metal mas não há corrosão activa que cause perda de secção.
Condição 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.
Condição 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.

Tabela 2.1: Tabela para classificação de pontes com estrutura metálica

estrutura, mas sim de defeitos observáveis com os meios usados na inspecção. No caso de existirem defeitos não observáveis, ou no caso de a estrutura ter sido subdimensionada, este índice pode classificar uma estrutura pouco segura como pouco deteriorada.[3]

2.6 Conclusões

Os sistemas de gestão de pontes são uma ferramenta de grande importância para garantir o nível de serviço das redes viárias. Permitem ainda às entidades responsáveis pela gestão das redes otimizar os recursos, permitindo decidir eficazmente quais as estruturas que serão sujeitas a acções de manutenção e qual a altura óptima para o fazer. Para tal torna-se necessário desenvolver modelos de previsão da degradação de desempenho, área na qual esta tese se insere. Os sistemas de gestão de pontes existentes actualmente, apesar das diferenças que os distinguem, têm como objectivos comuns assistir o gestor de pontes na tarefa de garantir os níveis de serviço adequados e gerir as acções de manutenção.

Capítulo 3

Modelos de previsão de desempenho

3.1 Introdução

No presente capítulo é apresentado um modelo para a previsão da degradação do desempenho de uma ponte específica. Este modelo é baseado na utilização de processos de Markov, permitindo, a partir de informação histórica de inspecções, calcular uma previsão do desempenho de um conjunto de pontes ao longo do tempo. Para tal, torna-se necessário ter acesso a informação histórica de inspecções de estruturas. Para garantir que a previsão de degradação de desempenho calculada pelo modelo é eficaz, é necessário garantir a homogeneidade, tanto ao nível das estruturas analisadas, como no procedimento de inspecção.

De modo a calcular uma previsão de degradação do desempenho de uma ponte específica, é usada a Actualização Bayesiana. Este método permite conjugar a previsão referente ao conjunto de pontes a uma ponte específica. Para tal é necessária informação referente a inspecções realizadas à ponte em causa. Com este método é possível calcular uma previsão mais precisa da degradação do desempenho de cada ponte, permitindo assim uma maior eficácia no planeamento de acções de manutenção.

Este modelo é implementado de forma estocástica, usando o método de Monte Carlo. Este método permite que os cálculos sejam realizados de forma simples, permitindo, por vezes, resolver problemas para os quais não é possível obter uma solução analítica.

3.2 Modelos de deterioração

Embora neste trabalho sejam usados modelos de deterioração baseados em processos de Markov, serão seguidamente descritos várias alternativas propostas por diversos autores.

3.2.1 Modelo de deterioração linear

No modelo proposto por [15], o desempenho é definido em função de dois indicadores:

- O índice de condição, em que o desempenho de uma estrutura é dado em função da observação do inspector.
- O índice de segurança, que define o desempenho em função da resistência estrutural.

Este modelo considera que, sem acções de manutenção, tanto a condição como a segurança têm uma progressão bilinear. Numa primeira fase após a construção, não há degradação significativa da condição ou segurança. Numa segunda fase, há uma diminuição tanto da condição como da segurança, como definido nas expressões seguintes[15]:

$$C(t) = \begin{cases} C_0 & \text{se } t \leq t_{iC} \\ C_0 + \alpha_C(t - t_{iC}) & \text{se } t > t_{iC} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$S(t) = \begin{cases} S_0 & \text{se } t \leq t_i \\ S_0 - \alpha(t - t_i) & \text{se } t > t_i \end{cases} \quad (3.2)$$

em que $C(t)$ e $S(t)$ são os índices de condição e segurança, respectivamente, C_0 e S_0 são a condição e segurança para o instante $t = 0$, α_C e α são as taxas de deterioração da condição e segurança, respectivamente, t_{iC} e t_i são os tempos de início de deterioração da condição e da segurança, respectivamente, e t é o tempo.

Neste modelo, os efeitos das acções de manutenção são modeladas através da sobreposição de curvas de degradação. Cada acção de manutenção tem como efeito qualquer combinação dos seguintes casos[15]:

- Melhoria da condição e/ou segurança imediatamente após a aplicação.
- Manutenção da condição e/ou segurança durante um intervalo de tempo após a aplicação.

- Redução da taxa de deterioração da condição e/ou segurança durante um intervalo de tempo após a aplicação.

Estes efeitos são modelados através das seguintes variáveis aleatórias[15]:

- Melhoria dos índices de condição e segurança imediatamente após a aplicação, γ_c e γ , respectivamente.
- Tempo durante o qual os índices de condição e segurança é mantido constante, t_{pdc} e y_{pd} , respectivamente.
- Redução da taxa da deterioração dos índices de condição e segurança, δ_c e δ , respectivamente.

Os índices de condição e segurança são calculados para cada ano, através dos seguintes passos[15]:

- Inicialmente são calculadas as taxas de deterioração dos índices de condição e de segurança, a intervalos de um ano, através da sobreposição dos efeitos de cada acção de manutenção ao perfil de degradação sem qualquer acção de manutenção.
- Em seguida, estas taxas de deterioração são integradas ao longo do tempo, dando origem ao perfil de degradação da condição e da segurança.

Os perfis de degradação dos índices de condição e segurança que podem ser obtidos com este método têm o seguinte aspecto[15]:

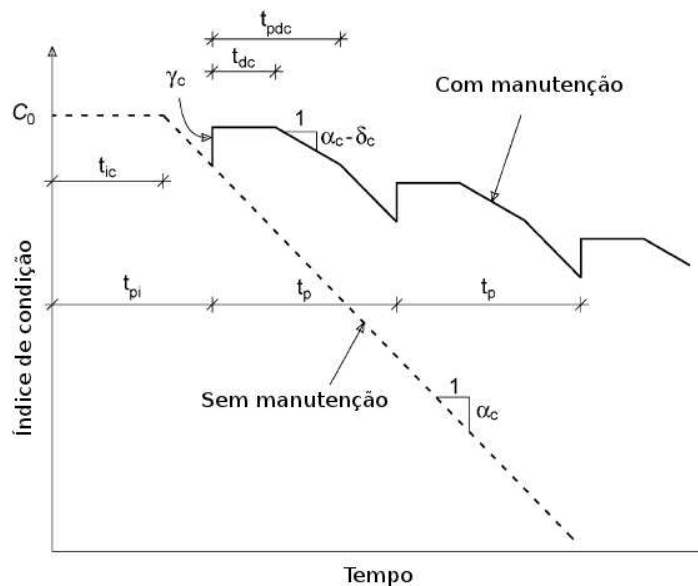


Figura 3.1: Evolução do índice de condição ao longo do tempo, usando um modelo de degradação linear

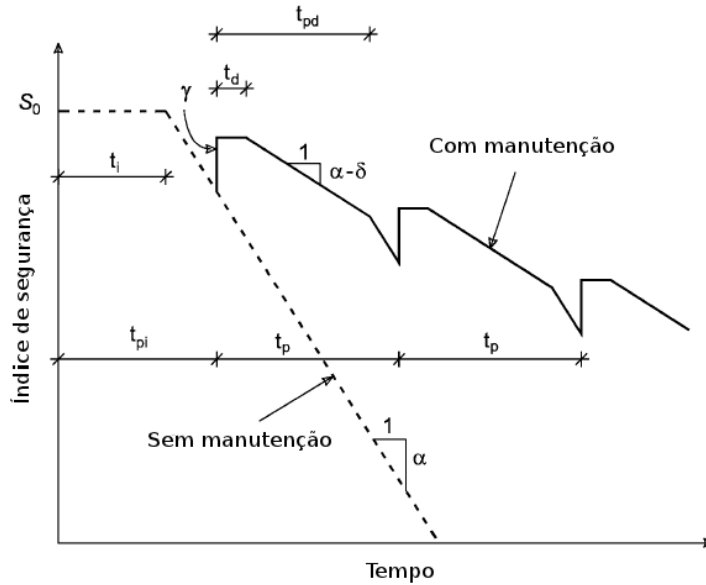


Figura 3.2: Evolução do índice de segurança ao longo do tempo, usando um modelo de degradação linear

Estes modelos, apesar de bastante simples do ponto de vista matemático, possibilitam uma análise da degradação do desempenho de pontes, podendo fazer parte de um sistema de gestão de pontes, apesar da limitação resultante de assumir que a degradação ocorre de forma linear, o que nem sempre acontece.

3.2.2 Modelo não linear

Através da análise de várias estruturas existentes, concluiu-se que a deterioração nem sempre é linear. Assim sendo, os modelos lineares, como o mostrado anteriormente podem não ser os mais adequados para descrever o seu desempenho ao longo do tempo. De modo a melhorar a análise do comportamento destas estruturas, foi proposto em [16] um modelo não linear. Neste modelo os índices de condição e de segurança são definidos pelas seguintes equações[16]:

$$C(t) = \begin{cases} C_0 & \text{se } t \leq t_{iC} \\ C_0 + A \cdot (t^2 - t_{iC}^2) & \text{se } t > t_{iC} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$S(t) = \begin{cases} S_0 & \text{se } t \leq t_i \\ S_0 - B \cdot (t^2 - t_i^2) & \text{se } t > t_i \end{cases} \quad (3.4)$$

em que $C(t)$ e $S(t)$ são os índices de condição e segurança, respectivamente, C_0 e S_0 são a condição e segurança para o instante $t = 0$, A e B são as taxas de deterioração da condição e segurança, respectivamente, t_{iC} e t_i são os tempos de

início de deterioração da condição e da segurança, respectivamente, e t é o tempo.

Neste modelo, as acções de manutenção têm como resultado qualquer combinação dos seguintes efeitos:

- Melhoria do índice de condição e/ou segurança no instante da aplicação.
- Supressão da deterioração do índice de condição e/ou segurança durante um intervalo de tempo após a aplicação.

A evolução da condição ao longo do tempo pode ser observada no gráfico seguinte[17]:

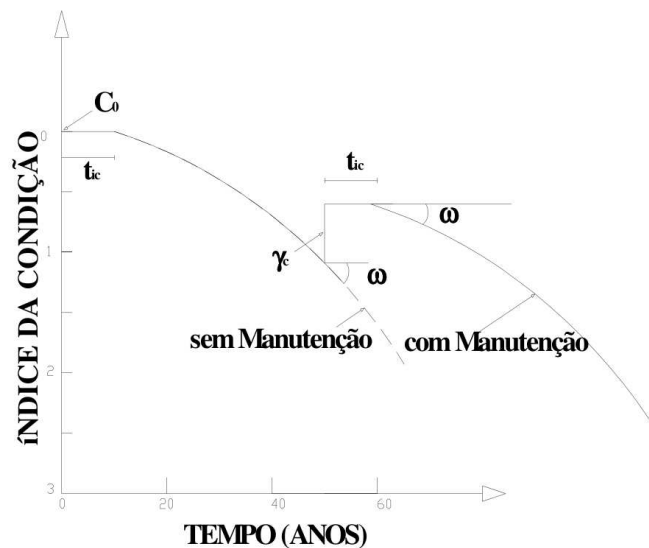


Figura 3.3: Evolução do índice de segurança ao longo do tempo, usando um modelo de degradação não linear

em que ω representa a taxa de deterioração da condição[17]. Este modelo representa uma melhoria em relação ao modelo linear, sendo mais eficaz na previsão da degradação do desempenho de pontes.

3.3 Modelo estocástico: Processos de Markov

Um processo de Markov é um processo estocástico que pode ser usado para modelar sistemas que transitam entre um número finito de estados. Devido à sua natureza estocástica, os processos de Markov são bastante úteis para modelar processos de degradação de infra-estruturas.

Seja X_t uma variável aleatória que representa o estado de um sistema ao longo do tempo t . De um modo geral, X_t depende dos estados anteriores X_0, X_1, \dots, X_{t-1} . Um processo estocástico descreve a relação entre as variáveis aleatórias X_1, X_2, \dots, X_t , sendo definido como a descrição da mudança de estado num sistema de forma probabilística num intervalo de tempo aleatório. É o processo através do qual o comportamento no passado influencia o comportamento no futuro. O comportamento de um sistema é completamente descrito definindo os seus estados ao longo do tempo. Sendo $X_{1(t)}, X_{2(t)}, \dots, X_{n(t)}$ os estados possíveis do sistema, X_t descreve o estado do sistema no instante t , sendo composto por n valores (matriz $n \times 1$). O sistema vai transitar de um estado para outro de forma aleatória, segundo a probabilidade associada, denominada probabilidade de transição, $p(t, X_0, X_1, \dots, X_{t-1})$ [5].

Caso a probabilidade de transição não seja dependente do tempo, diz-se que o processo é homogéneo, sendo p dependente apenas dos estados anteriores[18], $p(X_1, X_2, \dots, X_{t-1})$, sendo a probabilidade de o sistema se encontrar num dado estado dado por:

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_1 = x_1) \quad (3.5)$$

onde X_n é o estado no instante actual, X_{n+1} é o estado no instante seguinte, X_{n-1} é o estado no instante t_{n-1} e x_n, \dots, x_1 são estados possíveis que o sistema pode assumir. Em processos homogéneos a probabilidade de transição entre estados é igual ao longo de todo o processo.

Caso p dependa apenas do estado imediatamente anterior, o processo denomina-se processo de Markov de grau 1, sendo a probabilidade de transição função de X_{t-1} , sendo a probabilidade de o sistema se encontrar num dado estado dada por[18]:

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_1 = x_1) = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n) \quad (3.6)$$

Um processo de Markov de grau 1 é um processo estocástico cujo estado futuro X_{t+1} depende apenas do estado presente e não da forma como este foi atingido. A esta propriedade chama-se falta de memória[5].

3.4 Representação da condição

A condição de uma ponte, devido à incerteza implícita tanto pelas inspeções como pelos modelos de previsão, não pode ser determinada de forma exacta. Como tal, torna-se necessário apresentar a condição de uma ponte como uma distribuição de probabilidades, atribuindo a cada condição possível uma probabilidade:

$$C = \begin{bmatrix} P(C = 1) \\ P(C = 2) \\ P(C = 3) \\ P(C = 4) \\ P(C = 5) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Como em qualquer distribuição de probabilidades, é necessário garantir que a soma de todas as probabilidades é 1. Tendo a distribuição de probabilidades da condição, é possível calcular a condição média da ponte, através da seguinte expressão:

$$C_{media} = C^T \cdot [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]^T \quad (3.8)$$

3.4.1 Aplicabilidade a pontes

Como demonstrado em [19], os processos de Markov são adequados para modelar a degradação de desempenho de pontes, desde que haja informação histórica suficiente para garantir a qualidade do modelo. Esta informação histórica deve ser composta por inspeções de pontes do mesmo tipo, de modo a que se possa considerar que a degradação do desempenho de cada uma é semelhante. As inspeções devem ser também realizadas usando critérios uniformes, de modo a que se possa utilizar o máximo de informação disponível. Geralmente, ao modelar a degradação de pontes com processos de Markov, considera-se que o processo é homogéneo e sem memória.

3.5 Matriz de intensidade

3.5.1 Significado

É possível definir a função de transição p através da intensidade de transição. A intensidade de transição entre dois estados num processo de Markov pode ser definida como o número de transições por unidade de tempo. De modo a

representar as taxas de transição entre os vários estados possíveis num sistema, é definida a matriz Q , neste caso para cinco estados:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \dots & q_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

em que os elementos q_{ij} podem ser estimados através da seguinte expressão[20]:

$$q_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum \Delta_{ti}} \quad (3.10)$$

em que n_{ij} é o número de elementos que transitaram do estado i para o estado j e $\sum \Delta_{ti}$ o somatório de intervalos de tempo entre observações cujo estado inicial é i .

Para que a matriz Q possa representar a degradação do desempenho de uma estrutura, torna-se necessário ter em conta alguns factores. Em primeiro lugar, não é possível que uma estrutura melhore a sua condição, o que implica que todos os elementos q_{ij} em que $i > j$ devem ser nulos. Uma vez que as estruturas não podem melhorar a sua condição, uma vez que atinjam o último estado, neste caso 5, não poderão transitar para qualquer outro, o que implica que $q_{55} = 0$. Considera-se ainda que uma ponte pode apenas manter-se no estado actual ou transitar para o estado imediatamente a seguir, ou seja, os elementos q_{ij} em que $j > i + 1$ devem ser nulos. Assim sendo, a matriz de intensidade de transição para cinco estados de condição tem a seguinte forma:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & q_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & q_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & q_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

em que q_{ij} representa a taxa de transição do estado i para o estado j . A soma das taxas de cada um dos estados deve ser nula, levando a que os elementos q_{ii} sejam definidos como[21]:

$$q_{ii} = - \sum_{j \neq i} q_{ij} \quad (3.12)$$

O que resulta na seguinte matriz Q :

$$Q = \begin{bmatrix} -\theta_1 & \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\theta_2 & \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\theta_3 & \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\theta_4 & \theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

onde os elementos θ_i representam as taxas de transição entre estados consecutivos.

3.6 Ajuste da matriz de intensidade

De modo a que um processo de Markov consiga representar a degradação de pontes, torna-se necessário estimar os coeficientes θ_i da matriz Q a partir de informação histórica. Para tal, pode ser usada a seguinte expressão[20]:

$$\theta_i = \frac{n_{ij}}{\sum \Delta_{ti}} \quad (3.14)$$

em que n_{ij} é o número de elementos que transitaram do estado i para o estado j e $\sum \Delta_{ti}$ o somatório de intervalos de tempo entre observações cujo estado inicial é i .

Outra forma, mais expedita de calcular θ_i , é dada por[20]:

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

em que T_i é o numero de anos que uma ponte permanece numa determinada condição antes de transitar para a seguinte. Note-se que esta forma de cálculo, por ter um erro considerável, deve ser usada apenas como aproximação inicial ou estimativa.

Aplicando a expressão 3.14 a todos os elementos θ_i , é possível obter uma matriz Q . No entanto, a matriz Q assim obtida pode não ser a óptima. Uma vez que a matriz Q tem um papel central no modelo de previsão de desempenho do conjunto de pontes, esta deve ser otimizada, de modo a obter a previsão mais eficaz possível, para a informação disponível. Para medir a eficácia da previsão é usada a verosimilhança, dada por[21]:

$$L(Q) = \prod_i L_i = \prod_{i,j} L_{i,j} = \prod_{i,j} p_{S(t_{ij})S(t_{i,j+1})}(t_{i,j+1} - t_{ij}) \quad (3.16)$$

onde $S(t)$ é o estado do sistema no instante t e $L_{i,j}$ é o elemento da matriz de transição P na linha $S(t_{i,j})$ e na coluna $S(t_{i,j+1})$. Simplificando a expressão 3.16, é possível definir a verosimilhança através dum somatório:

$$L(Q) = \sum_{i,j} \ln(P_{i,j}) \quad (3.17)$$

O valor de $L(Q)$ assim obtido pode ser usado como medida da eficácia da previsão do desempenho dada pela matriz Q obtida pela expressão 3.14. De modo a encontrar a matriz Q cuja previsão da degradação do desempenho seja a mais eficaz, esta pode ser otimizada computacionalmente, usando como ponto de partida a matriz Q inicial, dada pela aplicação da expressão 3.14, como mostrado em [19].

3.7 Matriz de Markov

Para prever a condição de uma ponte ao longo do ciclo de vida usando um processo de Markov é necessário definir a função de transição $p(t)$, a partir da matriz Q . Num processo de Markov, a evolução do estado de condição no tempo pode ser descrito na forma matricial como:

$$P^{\Delta t} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}^{\Delta t} \quad (3.18)$$

onde p_{ij} representa a probabilidade de uma estrutura que, no instante t está no estado i , estar no estado j no instante $t + \Delta t$.

A matriz P relaciona-se com a matriz Q através da seguinte equação diferencial[22]:

$$\frac{\partial}{\partial t} P(s, t) = P(s, t)Q(t) \quad (3.19)$$

em que P é a matriz de Markov e Q a matriz de intensidade de transição. Esta equação é conhecida como equação de Chapman-Kolmogorov.

Se Q for constante ao longo do tempo, o processo de Markov diz-se estacionário e a solução para a equação 3.19 é[22]:

$$P^{(\Delta t)} = \exp(Q \cdot \Delta t) \quad (3.20)$$

De modo a que uma cadeia de Markov possa ser usada para modelar a degradação de estruturas, deve satisfazer as seguintes condições [23]:

- $m = n$
A matriz P deve ser quadrada.
- $p_{ij} > 0 \forall i \leq j$
Os elementos que pertençam ao triângulo superior devem ser positivos.
- $p_{ij} = 0 \forall i > j$
Uma ponte não pode melhorar a sua condição.
- $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1; i = 1 \dots 5.$
A soma de cada linha da matriz deve ser igual a 1.

Tendo uma matriz P para um intervalo de tempo Δt_1 é possível obter a matriz $P^{(\Delta t_2)}$ para um intervalo de tempo Δt diferente, múltiplo de Δt_1 , através de[24]:

$$P^{(n)} = P^n \quad (3.21)$$

onde P^n é a matriz de Markov de passo n e P a matriz de Markov de passo 1.

Conhecendo a matriz de Markov P assim como o estado da estrutura num determinado instante, é possível calcular o estado da estrutura ao fim de um intervalo de tempo Δt . Sendo $X(t)$ o estado da estrutura num determinado instante t , a probabilidade de, no instante $t + \Delta t$, se encontrar no estado j será:

$$Pr\{X(t + \Delta t) = j | X(t) = i\} = p_{ij} \quad (3.22)$$

onde p_{ij} é o elemento na linha i e coluna j da matriz $P^{(\Delta t)}$.

3.8 Incerteza no modelo de previsão

3.8.1 Incerteza na matriz de intensidade

A matriz Q é obtida a partir de informação histórica de inspecções[19]. Como tal, a fiabilidade da previsão depende essencialmente da qualidade e quantidade de informação usada no seu cálculo. Quanto maior a quantidade de dados usados para o seu cálculo, melhor a matriz Q representará a degradação da condição de um conjunto de pontes. Por outro lado, considera-se que as inspecções com base nas quais é calculada a matriz Q são referentes a estruturas suficientemente semelhantes de modo a que se possa considerar que

a degradação do desempenho seja semelhante, existindo homogeneidade quer nas estruturas analisadas quer no procedimento de inspecção.

De modo a ter em conta a incerteza da matriz Q , pode-se considerar que os parâmetros θ_i seguem uma distribuição cuja média seja o valor dado pela matriz de intensidade Q , obtida a partir de informação histórica de inspecções, como calculado em [19]. Uma vez que θ_i representa a taxa de transição entre estados consecutivos, torna-se necessário garantir que este não assume valores negativos. O desvio padrão de cada parâmetro θ_i representa a confiança que pode ser dada a esta previsão inicial e será tanto menor quanto maior for a qualidade e quantidade de dados usados para o cálculo da matriz de intensidade Q .

3.8.2 Incerteza na condição inicial

Apesar de se considerar que a informação histórica usada para o ajuste da matriz de intensidade é referente a pontes que apresentam uma degradação do desempenho semelhante é necessário ter em conta que esta pode não representar adequadamente a degradação de desempenho de cada uma das pontes. Considerando que, no ano de construção, o índice de condição é 1, a condição de cada ponte poderá afastar-se mais da média quanto mais tempo passar desde sua construção. Assim, torna-se necessário, no cálculo da degradação de uma ponte específica dar mais importância à informação relativa a essa mesma ponte. Para tal, pode-se considerar que ao índice de condição no ano inicial, C_0 está associada uma distribuição de probabilidades, em vez de se considerar que o índice de condição é $C_0 = 1$.

3.9 Actualização Bayesiana

3.9.1 Interesse

De modo a obter informação sobre a degradação de uma ponte específica que faça parte de um conjunto de pontes semelhantes, é usada a actualização Bayesiana. Com este método é possível combinar a informação dada pela previsão inicial com a informação resultante de uma ou várias inspecções, de modo a obter uma previsão da degradação do desempenho mais fiável para uma ponte específica.

De modo a conjugar a previsão inicial, dada pela cadeia de Markov, com os dados obtidos em inspecções é usado o processo de Actualização Bayesiana. Este processo, baseado no teorema de Bayes, é dado por[25]:

$$f''(C_T) = K \cdot L(C_T) \cdot f'(C_T) \quad (3.23)$$

em que $f''(C_T)$ é a distribuição de probabilidade actualizada considerando a previsão e o resultado da inspecção, também designada por distribuição posterior, $f'(C_T)$ é a distribuição de probabilidade dada pela previsão inicial, obtida a partir de dados históricos, também designada distribuição anterior e $L(C_T)$ é a função de verosimilhança, dada pelo resultado da inspecção. K é uma constante que tem como função normalizar a distribuição de probabilidade $f''(C_T)$ e define-se como[25]:

$$K = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} L(C_T) \cdot f'(C_T) dC_T} \quad (3.24)$$

Caso seja usada simulação de Monte Carlo para determinar o índice de condição actualizado, a média e o desvio padrão do índice de condição podem ser calculados usando as seguintes expressões[25]:

$$\mu_C^\tau = \frac{\sum_{i=1}^n C_\tau^i \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} \quad (3.25)$$

$$\sigma_C^\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_\tau^i)^2 \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n C_\tau^i \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} \right)^2} \quad (3.26)$$

onde μ_C^τ e σ_C^τ são a média e o desvio padrão do índice de condição no instante τ considerando a previsão e o resultado da inspecção, C_τ^i é o índice de condição no instante τ associado à amostra i , C_T^i é o índice de condição no instante da inspecção T associado à amostra i e n é o número de amostras.

3.9.2 Incerteza no resultado das inspecções

Ao realizar uma inspecção, é obtida informação sobre a condição de uma ponte num determinado instante. Uma vez que a informação dada pela inspecção tem sempre um erro associado, não é possível considerar o seu resultado como perfeito, não representando por isso a condição exacta da ponte aquando da realização da inspecção[25]. Os factores que influenciam o erro associado a uma

inspecção são:

- **Discretização dos índices de condição** - Uma vez que uma inspecção tem como resultado um índice discreto, o número de condições possíveis para esse índice influenciará a incerteza da inspecção. Um aumento do número de índices possíveis diminuirá a incerteza do resultado da inspecção. Por outro lado, ao aumentar o número de índices tornam-se menos evidentes as diferenças entre cada condição, dificultando a classificação da estrutura.
- **Meios usados na inspecção** - Os meios disponíveis para a inspecção influenciam a informação disponível para que o inspector possa classificar a estrutura. É necessário ter em conta os custos associados aos meios usados para a inspecção, bem como a possível interrupção do tráfego.
- **Experiência do inspector** - Um inspector com maior experiência é capaz de analisar com maior detalhe uma estrutura. Assim sendo, a incerteza associada a uma inspecção realizada por um inspector mais experiente será menor.

3.10 Simulação de Monte Carlo

De modo a obter uma previsão da degradação de uma ponte no futuro, com base numa previsão inicial e nos dados resultantes de inspecções, tornou-se necessário usar um método de cálculo que permitisse obter não só a distribuição de probabilidades actualizada no ano da inspecção mas também uma previsão para o futuro que englobasse essas duas componentes. Para tal, optou-se por usar o método de Monte Carlo para o cálculo da previsão da degradação da ponte após a inspecção.

O método de Monte Carlo consiste numa amostragem aleatória que segue as mesmas distribuições probabilísticas que regem o sistema a modelar. É um método estocástico com aplicações muito variadas, permitindo resolver problemas cuja solução analítica não existe[23]. Ao simular a degradação de uma ponte específica usando o método de Monte Carlo são associadas variáveis aleatórias à matriz de intensidade e ao resultado da inspecção, de modo a modelar a respectiva incerteza.

A degradação do desempenho de uma ponte específica usando o método de Monte Carlo, partindo de uma matriz de intensidade Q e de informação relativa a inspecções é calculada da seguinte forma:

- Gerar uma amostra de $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ e θ_4 , para compor a matriz Q amostral, usando o gerador de variáveis do Matlab.
- Gerar o valor da condição inicial, C_0 . A partir da distribuição inicial de $C_0 = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5]^T$ em que $P_i = P(C_0 = i)$ é definida a função de distribuição cumulativa:

$$P_{cumul} = \begin{bmatrix} 1 \\ \sum_{i=1}^1 P_i \\ 2 \\ \sum_{i=1}^2 P_i \\ 3 \\ \sum_{i=1}^3 P_i \\ 4 \\ \sum_{i=1}^4 P_i \\ 5 \\ \sum_{i=1}^5 P_i \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Gerando um valor aleatório uniforme e utilizando a inversa da distribuição cumulativa determinar o valor da condição inicial amostral.

- Calcular a matriz P para um intervalo $\Delta t = 1$ ano através da expressão 3.20: $P = \exp(Q \cdot \Delta t)$.
- Para cada ano $t > 0$, partindo da condição do ano anterior, C_{t-1} , e da linha da matriz P correspondente a essa condição, gera-se o novo estado de condição, usando um algoritmo igual ao utilizado para calcular C_0 .
- Calcular as propriedades estatísticas do desempenho, como a média e o desvio padrão, não considerando inspeções.
- Determinar o valor da verosimilhança, $L_i = P(C_T - 0.5 < C_{insp} < C_T + 0.5)$.
- Calcular as propriedades estatísticas do desempenho, como a média e o desvio padrão, considerando as inspeções, através das expressões 3.25 e 3.26:

$$\mu_C^\tau = \frac{\sum_{i=1}^n C_T^i \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} \quad (3.28)$$

$$\sigma_C^\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_T^i)^2 \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n C_T^i \cdot L(C_T^i)}{\sum_{i=1}^n L(C_T^i)} \right)^2} \quad (3.29)$$

O método descrito pode ser representado pelos seguintes fluxogramas:

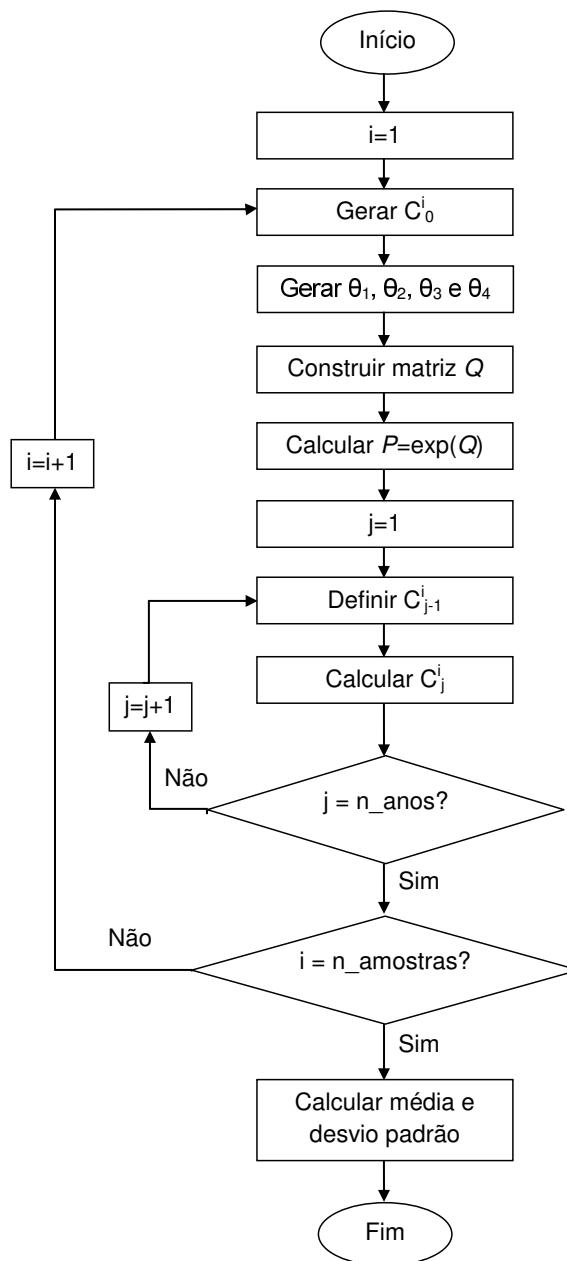


Figura 3.4: Fluxograma da simulação do modelo de degradação usando o método de Monte Carlo

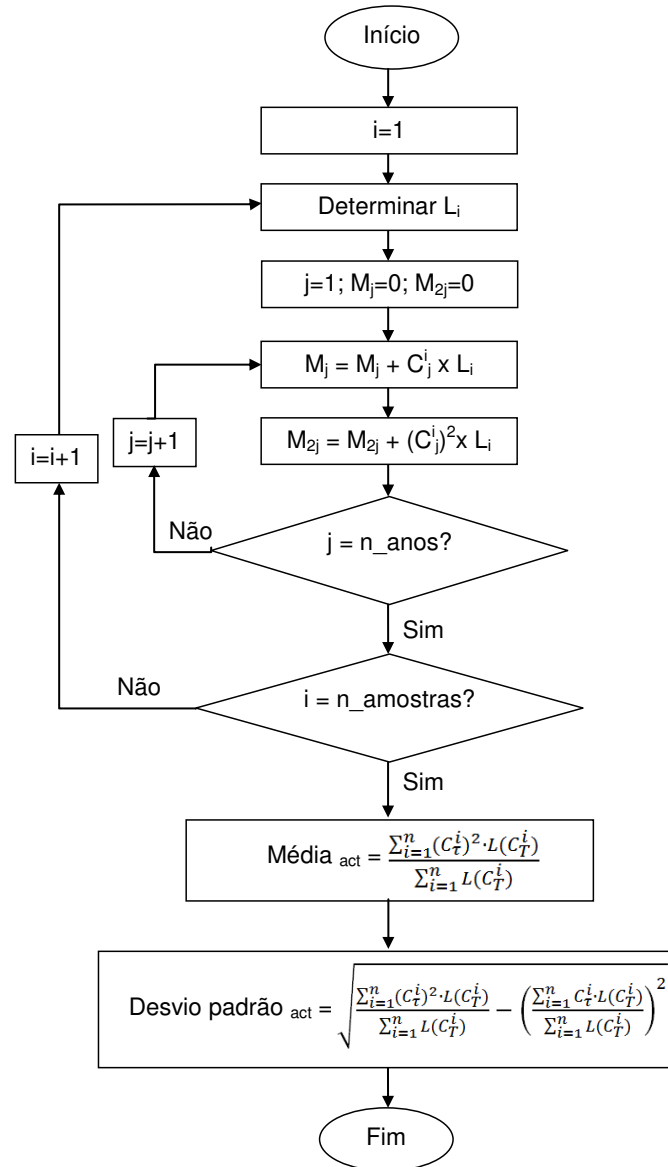


Figura 3.5: Fluxograma da simulação do modelo de actualização usando o método de Monte Carlo

3.10.1 Modelação da incerteza no modelo de degradação

Tendo em conta que cada elemento θ_i tem que ser positivo, optou-se por usar uma distribuição lognormal para gerar as matrizes Q de cada ponte usada no método de Monte Carlo.

De modo a modelar a incerteza associada à previsão inicial, os elementos θ_i da matriz $Q_{inicial}$ de cada ponte são gerados segundo uma distribuição lognormal, tendo como média o valor θ_i da previsão inicial. O desvio padrão é variável, reflectindo o nível de confiança a atribuir à previsão inicial. Considerando que as

médias dos valores de θ_i são diferentes, assumiu-se um coeficiente para θ_i para cada caso

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\theta_1} \\ \sigma_{\theta_2} \\ \sigma_{\theta_3} \\ \sigma_{\theta_4} \end{bmatrix} = \sigma_Q \cdot \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

onde σ_Q é o desvio padrão associado à matriz Q e, por consequência, ao modelo de degradação.

3.10.2 Modelação da incerteza no resultado da inspeção

A função $f''(C_T)$, de modo a representar o resultado da inspeção de forma realista, deve ter em conta a incerteza a ela associada, como referido em 3.9.2. Esta incerteza deve ser tida em conta ao determinar o desvio padrão da distribuição de probabilidades que representa o resultado da inspeção.

Assim sendo, a sua distribuição de probabilidades foi calculada a partir de uma distribuição normal com média igual ao resultado da inspeção e desvio padrão variável. Assim sendo, a probabilidade de cada condição corresponde à área debaixo do gráfico entre os limites de cada condição, como se mostra na figura seguinte:

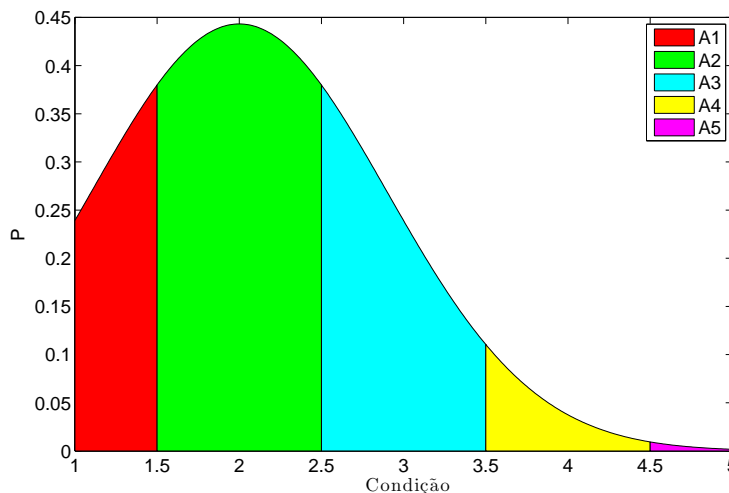


Figura 3.6: Distribuição de probabilidades da inspeção para $\mu = 2$ e $\sigma = 0.9$

A probabilidade correspondente a cada condição é dada pela seguinte expressão:

$$P(C = i) = \frac{A_i}{\sum_{j=1}^5 A_j} \quad (3.31)$$

em que A_i é a área da condição i , mostrada no gráfico.

Capítulo 4

Exemplo de aplicação e estudo paramétrico

4.1 Introdução

Neste capítulo é mostrado um exemplo de aplicação dos modelos apresentados no capítulo 3, tendo como objectivo calcular a degradação do desempenho de uma ponte específica, partindo de informação histórica de inspecções. Posteriormente é realizado um estudo paramétrico, de modo a analisar de que forma o desvio padrão da matriz de intensidade e da função de verosimilhança associada à inspecção afectam a previsão da degradação do desempenho.

4.2 Exemplo de aplicação

Pretende-se calcular a distribuição de probabilidades, média e desvio padrão da condição de uma ponte, ao longo de 100 anos. A informação disponível sobre a ponte em causa é a seguinte:

- A ponte em causa pertence a um conjunto de pontes semelhantes, para o qual existem dados históricos de inspecções em quantidade suficiente, descritos em [19]. Segundo [19], a matriz Q correspondente a esse conjunto de pontes é a seguinte:

$$Q = \begin{bmatrix} -0.3 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.08 & 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.05 & 0.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.03 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

- Para esta ponte específica, existe informação relativa a uma inspeção, realizada no ano 30, com resultado $C_{insp} = 2$. Tendo em conta a experiência do inspetor e os meios usados, considera-se que ao resultado da inspeção está associado um valor de desvio padrão $\sigma = 0.9$
- A Condição inicial, C_0 , é dada pela seguinte distribuição de probabilidades:

$$C_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (4.2)$$

4.2.1 Condição inicial

A $C_{inicial}$, correspondente ao ano 1, é definida de forma probabilística. Supondo que a esta está associada uma distribuição de probabilidades multinomial da seguinte forma:

Para calcular a condição inicial, C_0 , é calculada a função de distribuição cumulativa a partir da distribuição de probabilidades de C_0 :

$$P_{cumul} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^1 P_i \\ \sum_{i=1}^2 P_i \\ \sum_{i=1}^3 P_i \\ \sum_{i=1}^4 P_i \\ \sum_{i=1}^5 P_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Sendo a deterioração da condição um processo estocástico, para determinar a $C_{inicial}$ é necessário gerar um numero aleatório, $rnd \in [0, 1]$. Gerando esse número obteve-se 0.5814. Logo, $C_{inicial} = 1$. Note-se que, para a distribuição de probabilidades apresentada, qualquer que fosse o número aleatório gerado, a condição inicial seria sempre $C_{inicial} = 1$.

4.2.2 Previsão inicial

De modo a determinar a distribuição de probabilidades correspondente a cada ano, torna-se necessário calcular a matriz de Markov $P^{(1)}$, para $\Delta t = 1$, através da expressão 3.20:

$$P^{(1)} = \exp \left(\begin{bmatrix} -0.3 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.08 & 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.05 & 0.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.03 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) =$$

$$= \begin{bmatrix} 0.7408 & 0.2486 & 0.0104 & 0.0001 & 0.0000 \\ 0 & 0.9231 & 0.0750 & 0.0019 & 0.0000 \\ 0 & 0 & 0.9512 & 0.0480 & 0.0007 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9704 & 0.0296 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

O índice de condição para cada ano é calculado de forma semelhante à condição inicial. Para tal, é necessário calcular a função de probabilidades cumulativa:

$$P_{cumul} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^1 P_i \\ \sum_{i=1}^2 P_i \\ \sum_{i=1}^3 P_i \\ \sum_{i=1}^4 P_i \\ \sum_{i=1}^5 P_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7408 \\ 0.9894 \\ 0.9999 \\ 1.0000 \\ 1.0000 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Usando o gerador de variáveis do Matlab, é gerado um número aleatório uniforme, obtendo-se 0.3289. Uma vez que 0.3289 é menor que 0.7408, o índice de condição no ano 2 é $C_{t=2} = 1$.

Repetindo o cálculo para os instantes $t = 3, 4, \dots, 100$, obtêm-se a distribuição de probabilidades correspondente a cada ano, ao longo do ciclo de vida da ponte.

4.2.3 Distribuição de probabilidades da condição ao longo do ciclo de vida da estrutura

Aplicando a simulação de Monte Carlo a 50000 amostras, ao longo de 200 anos, foi calculado o índice de condição, sem considerar inspecções.

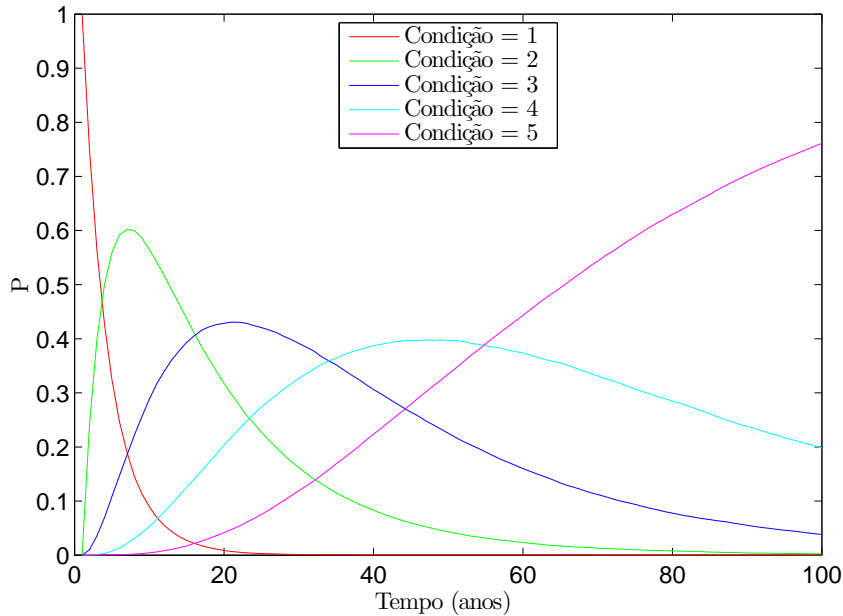


Figura 4.1: Probabilidade de cada condição ao longo de 100 anos

Como se pode observar na figura 4.1, no ano 1, todas as pontes se encontram na condição $C = 1$, cuja probabilidade é 1, tendo todas as outras condições probabilidade nula. Nos anos seguintes, a probabilidade de uma ponte se encontrar na condição $C = 1$ diminui, tendendo para zero, à medida que a probabilidade das outras condições aumenta. No ano 7, a probabilidade de $C = 2$ é máxima, tendendo depois a diminuir. O mesmo acontece com a probabilidade das condições $C = 3$ e $C = 4$, que atingem o seu valor máximo nos anos 22 e 46, respectivamente. Uma vez que uma ponte na condição $C = 5$ não pode transitar para qualquer outro estado, a probabilidade de uma ponte se encontrar na condição $C = 5$ aumenta sempre ao longo do tempo, tendendo para 1, à medida que todas as outras tendem para zero.

Análise da condição média

Calculando a condição média ao longo de 100 anos e a distribuição de probabilidades nos anos 1, 20, 40, 60 e 80, obtém-se:

Como se pode observar na figura 4.2, no ano 1, a condição média é $C = 1$, tendendo a aumentar ao longo do tempo, à medida que ocorre a degradação. A velocidade de degradação tende a diminuir ao longo de todo o ciclo de vida, tendendo para zero, quando todas as pontes se encontrarem na condição $C = 5$.

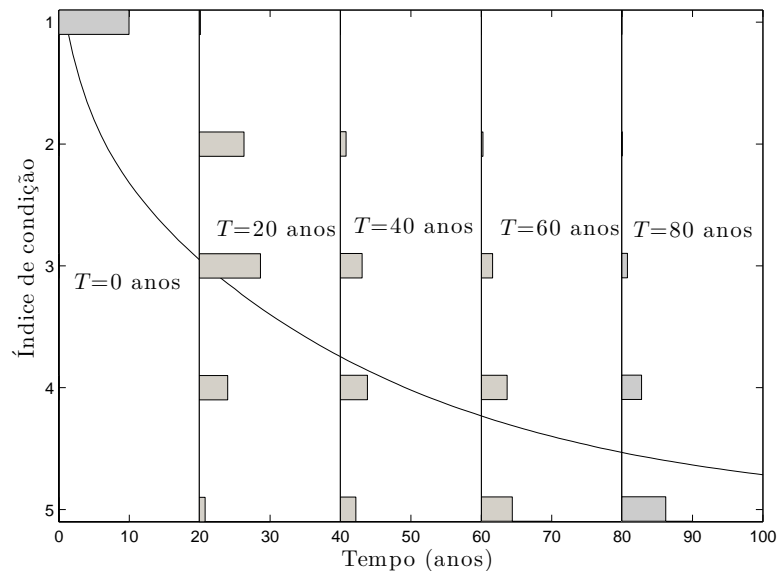


Figura 4.2: Índice de condição médio ao longo de 100 anos e respectiva distribuição de probabilidades aos anos 0, 20, 40, 60 e 80

Análise do desvio padrão da previsão da condição

O desvio padrão ao longo de 100 anos é apresentado na figura 4.3. Observa-se numa primeira fase, um aumento do valor de σ , até atingir o valor máximo, à medida que as pontes passam da condição inicial para as seguintes, como se pode observar no gráfico 4.2. À medida que as pontes se acumulam na condição 5, o desvio padrão diminui, tendendo para zero, quando todas as pontes se encontrarem na condição 5. A condição 5 funciona como estado absorvente pois, uma vez que uma ponte atinja esta condição, já não pode transitar para outra.

4.2.4 Actualização Bayesiana

Tendo como distribuição de probabilidades da inspecção o caso mostrado em 3.10.2 e como condição prevista no ano da inspecção $C = 2$, é possível calcular a distribuição de probabilidades actualizada.

O resultado da inspecção foi assumido como $C_{insp} = 2$ e o desvio padrão considerado foi $\mu = 0.9$, a distribuição de probabilidades da função de verosimilhança no instante da inspecção é, de acordo com 3.31, igual a:

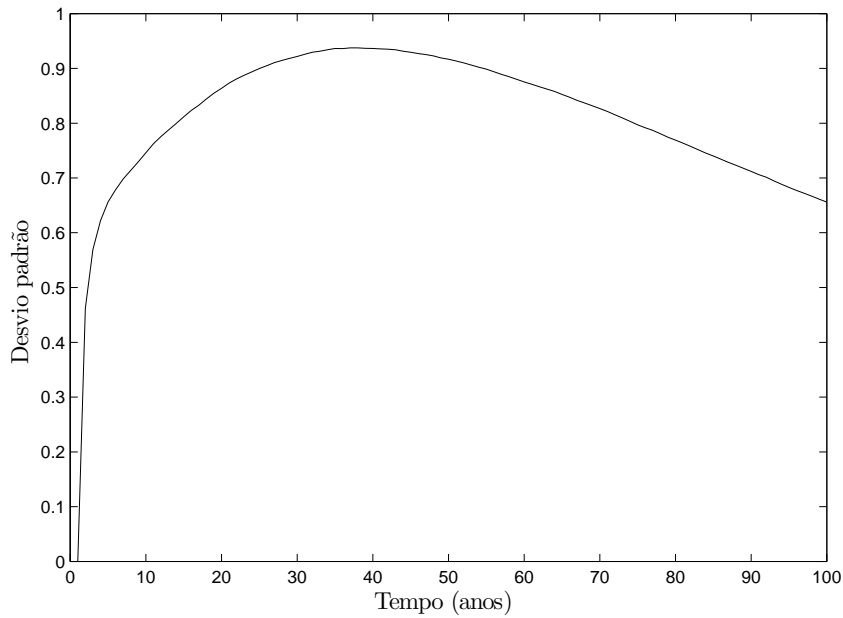


Figura 4.3: Desvio padrão do índice de condição ao longo de 100 anos

$$f''(C_T) = \begin{bmatrix} 0.1801 \\ 0.4865 \\ 0.2787 \\ 0.0521 \\ 0.0027 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Assumindo que a condição prevista, no instante da inspeção é $C_{t=t_{insp}} = 2$, a média da condição actualizada, no instante da inspeção será dado aplicando a expressão 3.25:

$$\mu_C^\tau = \frac{2 \cdot 0.4865}{0.4865} = 2 \quad (4.7)$$

Usando a simulação de Monte Carlo, para calcular o índice de condição de 5 amostras, no instante da inspeção, τ e no instante $\tau + \Delta\tau$, teremos:

Amostra	C_τ	$C_{\tau+\Delta\tau}$
1	2	2
2	1	2
3	3	4
4	2	2
5	4	5

Tabela 4.1: Dados históricos de 5 amostras, no instante da inspeção, τ e no instante $\Delta\tau$

Assim, a média e desvio padrão da condição actualizada, no instante da inspecção, τ , serão:

$$\mu_C^\tau = \frac{2 \cdot 0.4865 + 1 \cdot 0.1801 + 3 \cdot 0.2787 + 2 \cdot 0.4865 + 4 \cdot 0.0521}{0.4865 + 0.1801 + 0.2787 + 0.4865 + 0.0521} = 2.1367 \quad (4.8)$$

$$\sigma_C^\tau = 0.6565 \quad (4.9)$$

A média e desvio padrão da condição actualizada, no instante $\tau + \Delta\tau$ serão:

$$\mu_C^\tau = \frac{2 \cdot 0.4865 + 2 \cdot 0.1801 + 4 \cdot 0.2787 + 2 \cdot 0.4865 + 5 \cdot 0.0521}{0.4865 + 0.1801 + 0.2787 + 0.4865 + 0.0521} = 2.4810 \quad (4.10)$$

$$\sigma_C^\tau = 0.9143 \quad (4.11)$$

4.2.5 Avaliação do impacte da incerteza

Incerteza no modelo de degradação

De modo a analisar como a incerteza na matriz Q afecta a previsão, foi calculada a condição prevista de 50000 pontes ao longo de 200 anos, tal como em 4.2.3 para vários valores de desvio padrão. Foram considerados 4 valores possíveis para o desvio padrão do modelo de degradação: 0.0001, 0.2, 0.5 e 0.9.

Como se pode observar na figura 4.4, ao aumentar o desvio padrão, há um aumento da condição média da previsão ao longo dos 100 anos, apesar de a média ser a mesma para cada caso.

Como seria de esperar, o desvio padrão do índice de condição, apresentado na figura 4.5, é tanto maior quanto maior o desvio padrão da matriz Q . Observa-se que o desvio padrão aumenta até atingir o valor máximo, que ocorre em anos diferentes para cada valor de desvio padrão. Este máximo ocorre entre o ano 32, para $\sigma_Q = 0.0001$ e o ano 48, para $\sigma_Q = 0.9$.

Depois de atingido o máximo, o desvio padrão diminui, tendendo para zero, à medida que as pontes se acumulam na condição 5, que, como foi referido em 4.2.3, funciona como estado absorvente.

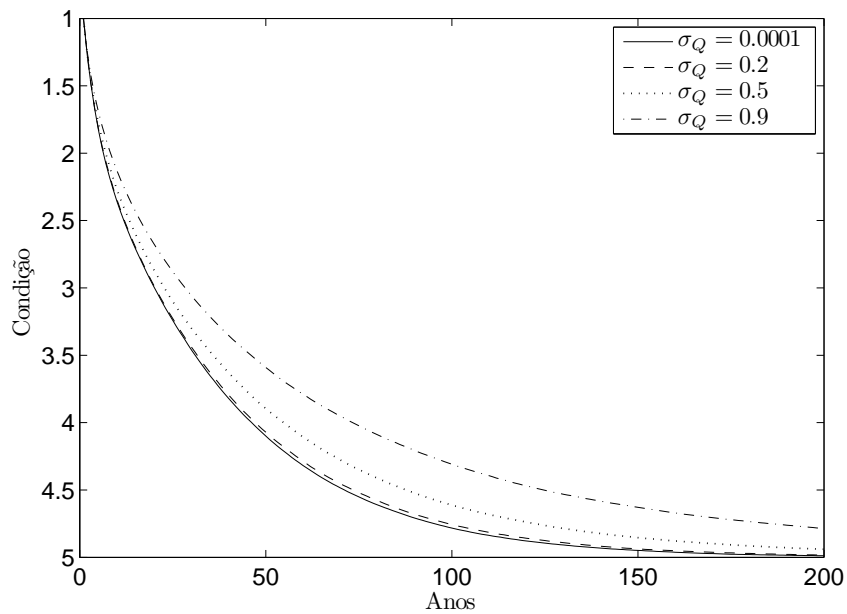


Figura 4.4: Índice de condição médio, para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

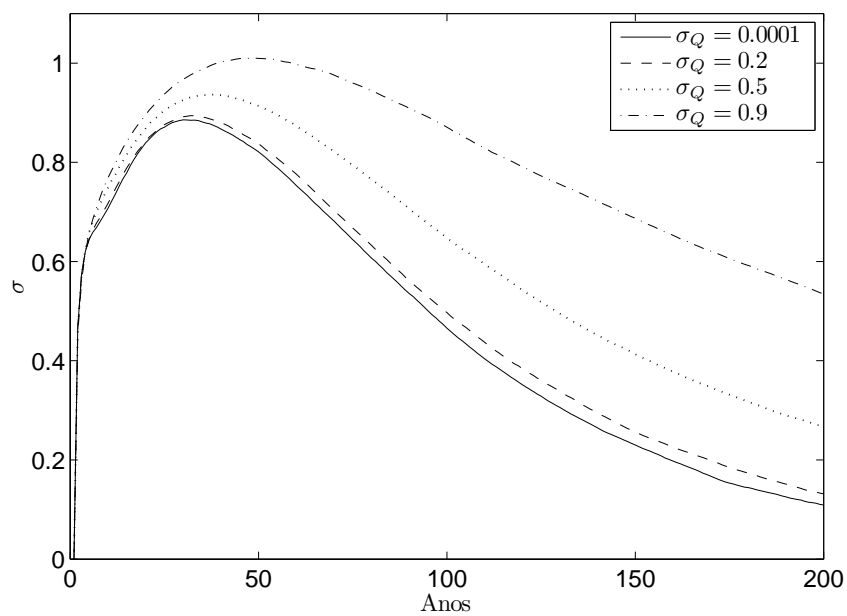


Figura 4.5: Desvio padrão do índice de condição médio, para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

Incerteza na condição inicial

Como foi descrito em 3.8.2, a condição de uma estrutura no ano de construção pode não ser 1. De modo a analisar como esta incerteza afecta a previsão do desempenho, foi calculada a previsão considerando duas hipóteses para a condição inicial: num primeira hipótese assume-se que a condição inicial é $C_0 = [1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$, enquanto na segunda hipótese se assume que a condição inicial tem a distribuição de probabilidades $C_0 = [0.5\ 0.3\ 0.2\ 0\ 0]^T$.

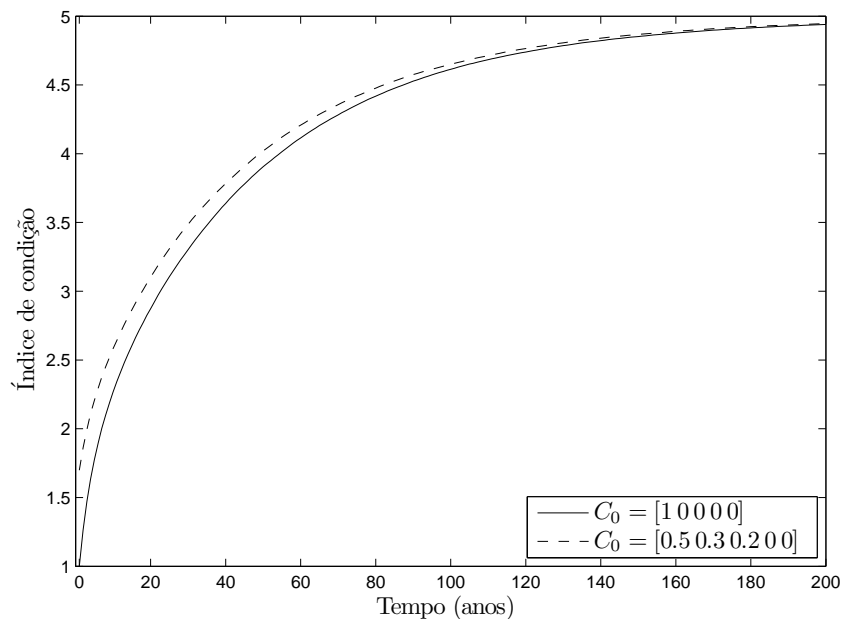


Figura 4.6: Índice de condição médio, considerando dois casos para condição inicial, $C_0 = [0.5\ 0.3\ 0.2\ 0\ 0]^T$ e $C_0 = [1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$

Como se pode observar na figura 4.6, o índice de condição médio, considerando $C_0 = [1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ apresenta um desempenho ligeiramente melhor ao longo do ciclo de vida quando comparado com o caso em que $C_0 = [0.5\ 0.3\ 0.2\ 0\ 0]^T$, sendo que esta diferença diminui ao longo do tempo. A degradação do desempenho ao longo do ciclo de vida evolui de forma bastante semelhante para os dois casos. Analisando o desvio padrão do índice de condição, apresentado na figura 4.7, observa-se que no caso em que $C_0 = [0.5\ 0.3\ 0.2\ 0\ 0]^T$, o desvio padrão apresenta valores superior ao caso em que $C_0 = [1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$, até ao ano 31. A partir deste ano, o desvio padrão para os dois casos evolui de forma bastante semelhante, sendo que, para o caso em que $C_0 = [0.5\ 0.3\ 0.2\ 0\ 0]^T$ o valor é inferior.

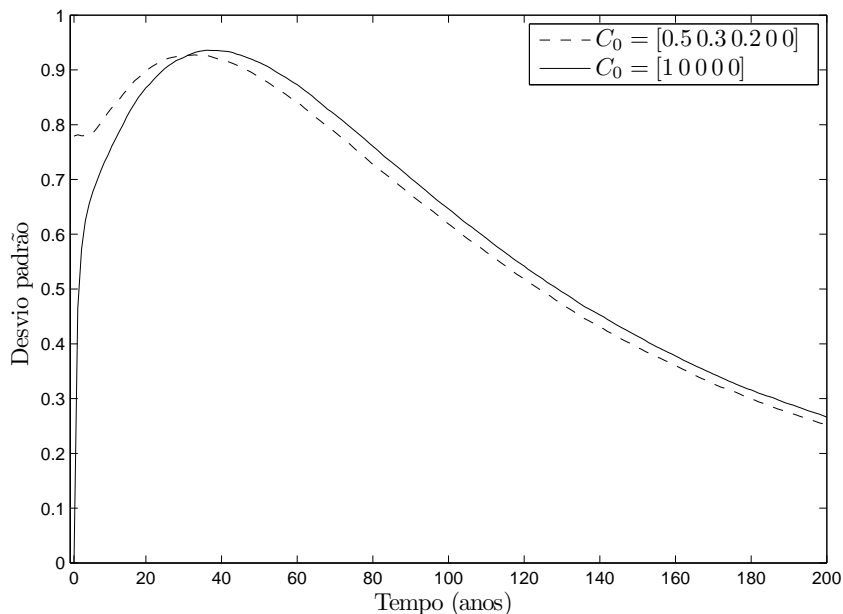


Figura 4.7: Desvio padrão do índice de condição, considerando dois casos para condição inicial, $C_0 = [0.5 \ 0.3 \ 0.2 \ 0 \ 0]^T$ e $C_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$

4.3 Estudo paramétrico

De modo a compreender como os vários parâmetros influenciam os resultados, foi realizado um estudo paramétrico. As variáveis estudadas foram o resultado da inspeção, C_{insp} , o desvio padrão da função de verosimilhança, σ_{insp} e o desvio padrão do modelo de degradação, σ_Q .

4.3.1 Influência da incerteza na previsão do desempenho na condição actualizada

Na primeira série de exemplos foi estudada a influência da incerteza no modelo de degradação, modelado através do desvio padrão da matriz de intensidade Q , na previsão do desempenho ao longo da vida da estrutura. Assim sendo, em cada um dos ensaios manteve-se constante a média e desvio padrão da inspeção e foi calculada a previsão inicial e actualizada para cada um dos casos de σ_Q .

As condições prevista e actualizada foram calculadas usando o modelo apresentado em 3.10, efectuando uma simulação com 100000 amostras, ao longo de 200 anos. São avaliados 12 exemplos, cujos parâmetros são os seguintes:

- São considerados quatro casos possíveis para o resultado da inspeção: $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$, $C_{insp} = 4$ e $C_{insp} = 5$.

- Para cada um dos casos de C_{insp} , são considerados 3 valores possíveis para o desvio padrão do resultado da inspeção: $\sigma_{insp} = 0.3$, $\sigma_{insp} = 0.5$ e $\sigma_{insp} = 0.7$.
- A incerteza na previsão do desempenho é considerada assumindo que os termos da matriz de intensidade de deterioração, Q , tem desvio padrão σ_Q toma os seguintes valores: $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$.

Análise da média e desvio padrão da condição inicial e actualizada

Em seguida é apresentada a média e desvio padrão do índice de condição, inicial e actualizado, e a respectiva análise.

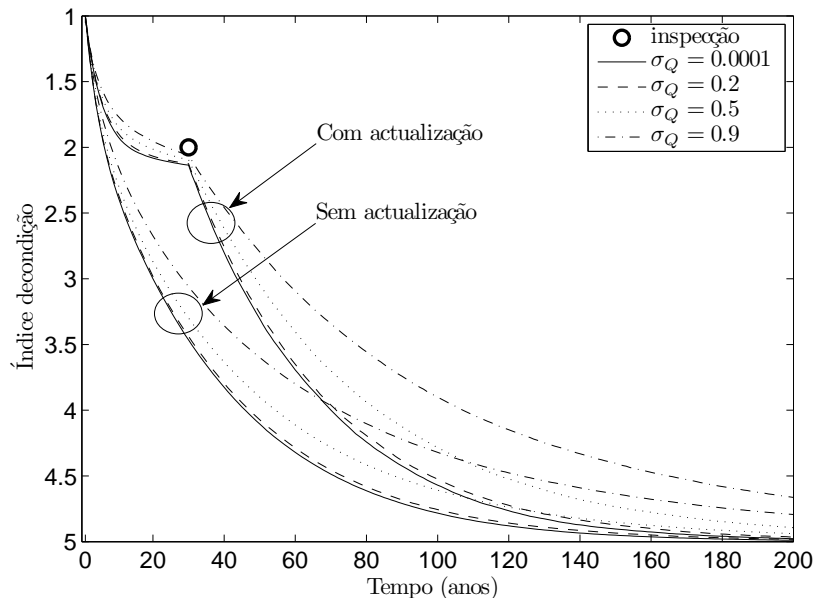


Figura 4.8: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

Nos casos mostrados nas figuras 4.8 a 4.13, o resultado da inspeção no ano 30 foi $C_{insp} = 2$, enquanto que o valor esperado era $C_{media} = 3.4$. Assim, a inspeção mostrou que a ponte se encontrava num estado melhor que o previsto inicialmente.

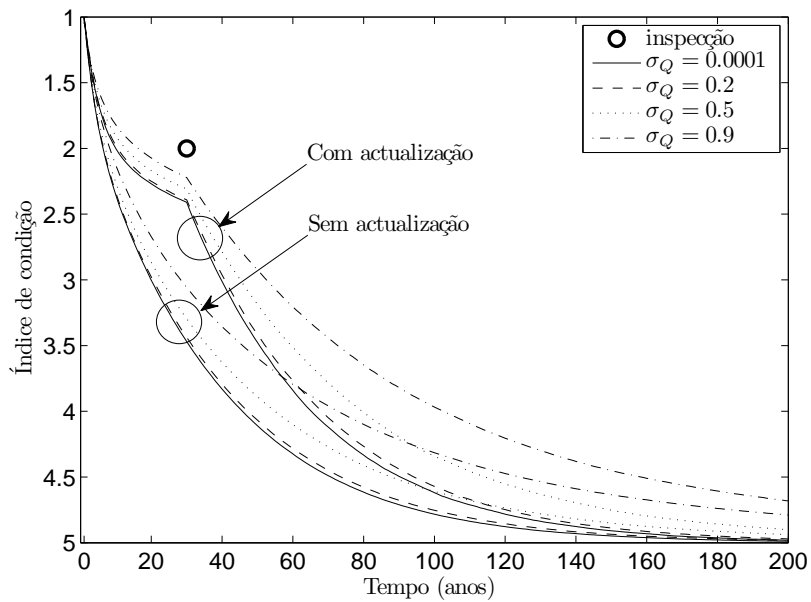


Figura 4.9: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

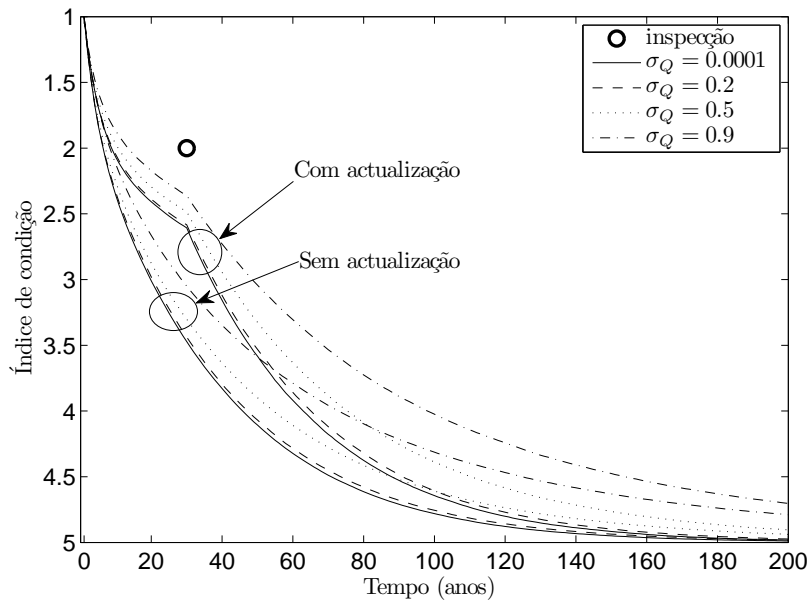


Figura 4.10: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 0.7$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

Observa-se que a condição média actualizada, para o mesmo valor de σ_Q é sempre inferior à condição média dada pela previsão inicial, o que quer dizer que a degradação do desempenho tem uma progressão mais lenta que a dada pela previsão inicial. Este resultado é de esperar, uma vez que a inspecção revela que a ponte, no ano da inspecção, tem um desempenho melhor que a média do conjunto de pontes. A degradação do desempenho após a inspecção tem uma progressão mais rápida do que antes da inspecção, mas sempre inferior à da previsão inicial.

Observa-se que, ao aumentar o desvio padrão da função de verosimilhança, a condição média actualizada aproxima-se da condição média inicial. Por outro lado, ao aumentar o desvio padrão do modelo de degradação, a média aproxima-se da condição da inspecção. Pode-se concluir que o desvio padrão do modelo de degradação e da função de verosimilhança representam o peso que cada componente tem na previsão actualizada. Conforme a confiança que se possa atribuir a cada uma, pode-se aumentar ou diminuir o seu desvio padrão. Por exemplo, se a inspecção for realizada por um inspector muito experiente, desvio padrão da função de verosimilhança será menor que no caso de uma inspecção realizada por um inspector menos experiente, sendo que esta componente fornece informação com menor erro.

Observa-se que, tanto na previsão inicial como na previsão actualizada, um valor de desvio padrão do modelo de degradação maior tem como consequência um desvio padrão da previsão mais alto. Nota-se uma diminuição do desvio padrão da condição actualizada, no ano da inspecção, uma vez que as pontes com maior peso na previsão actualizada são exactamente aquelas cuja condição coincide com a da inspecção, nesse ano. Esta diminuição é tanto maior quanto menor o valor do desvio padrão do modelo de degradação. Assim, um valor de desvio padrão do modelo de degradação mais baixo corresponde a uma maior certeza sobre a informação dada pela previsão inicial, resultando num desvio padrão do índice de condição menor.

Imediatamente após a data da inspecção, existe um aumento do desvio padrão da condição actualizada, atingindo valores quase iguais ou superiores aos da previsão inicial, no caso em que o desvio padrão da função de verosimilhança é $\sigma_{insp} = 0.3$. Uma vez que o resultado da inspecção é $C_{insp} = 2$, as pontes com maior peso na previsão actualizada serão as que, no ano da inspecção

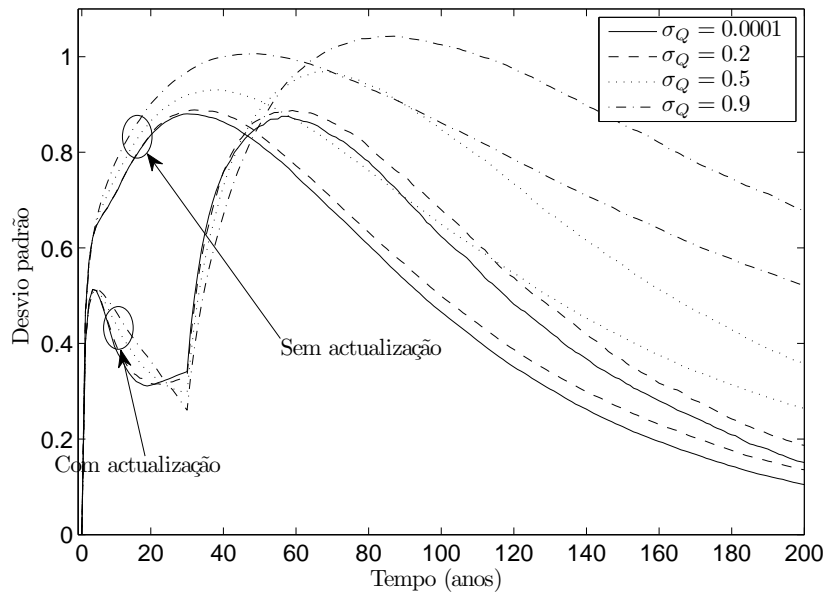


Figura 4.11: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

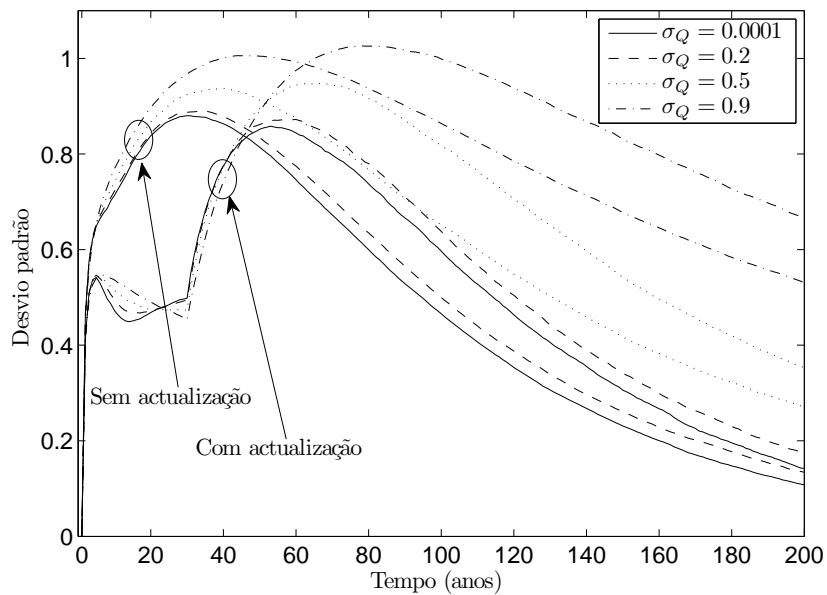


Figura 4.12: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

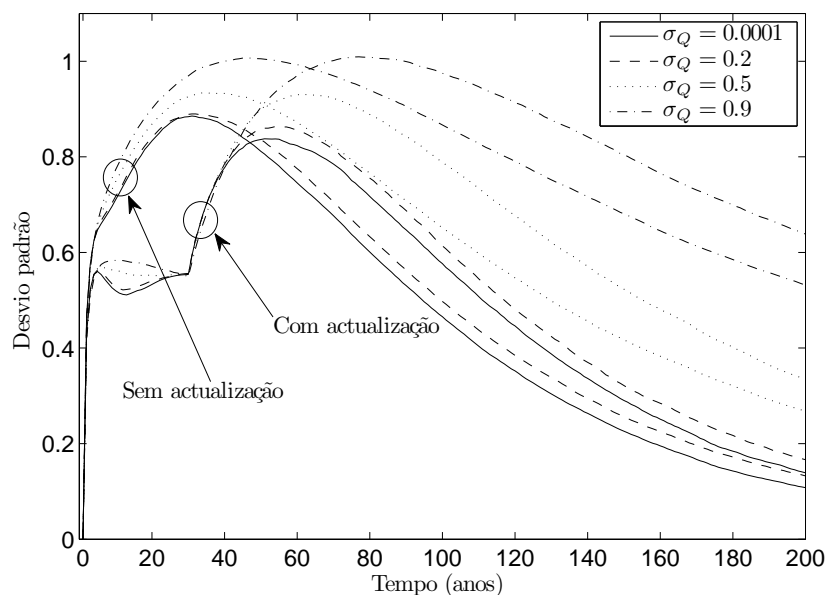


Figura 4.13: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 2$ e incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

apresentem uma condição mais próxima de 2. Na previsão inicial, a condição média para o ano da inspecção é 3.4, o que leva a que haja uma maior acumulação de pontes nas condições nas condições 4 e 5. Uma vez que se encontram numa condição mais baixa nesse ano, nos anos seguintes podem assumir qualquer uma das condições seguintes, 3, 4 ou 5, para além de se poderem manter na condição 2. A maior dispersão de pontes pelas várias condições, na previsão actualizada, leva a um maior desvio padrão, apesar de haver mais informação sobre a ponte que na previsão inicial.

Nos casos apresentados nas figuras 4.14 a 4.19, o resultado da inspecção no ano 30 foi $C_{insp} = 3$, enquanto a previsão, nesse ano, apresentava uma condição média $C_{media} = 3.4$. Assim, a inspecção mostrou que a ponte se encontrava num estado melhor que o previsto inicialmente.

Uma vez que a condição média dada pela previsão inicial para o ano 30 é de 3.4 e a inspecção tem um resultado 3, as médias do índice de condição associadas à previsão inicial e à previsão actualizada são bastante semelhantes,

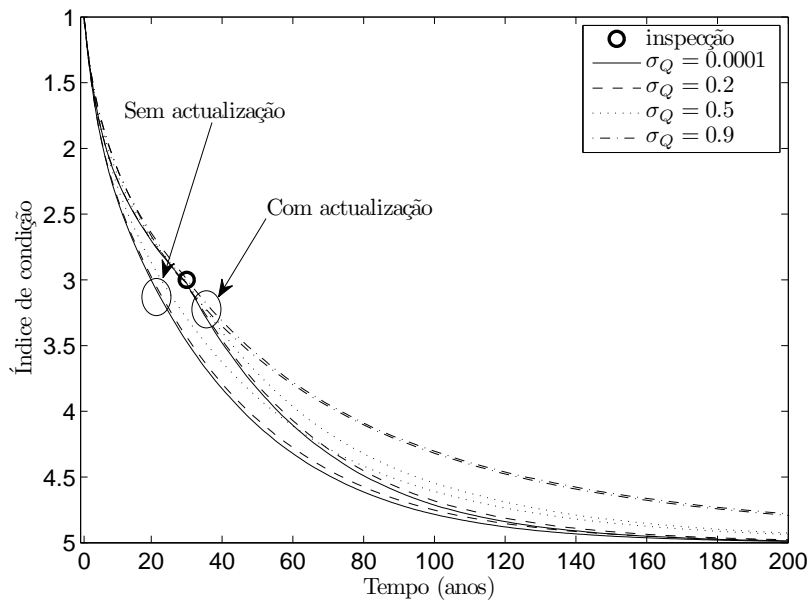


Figura 4.14: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

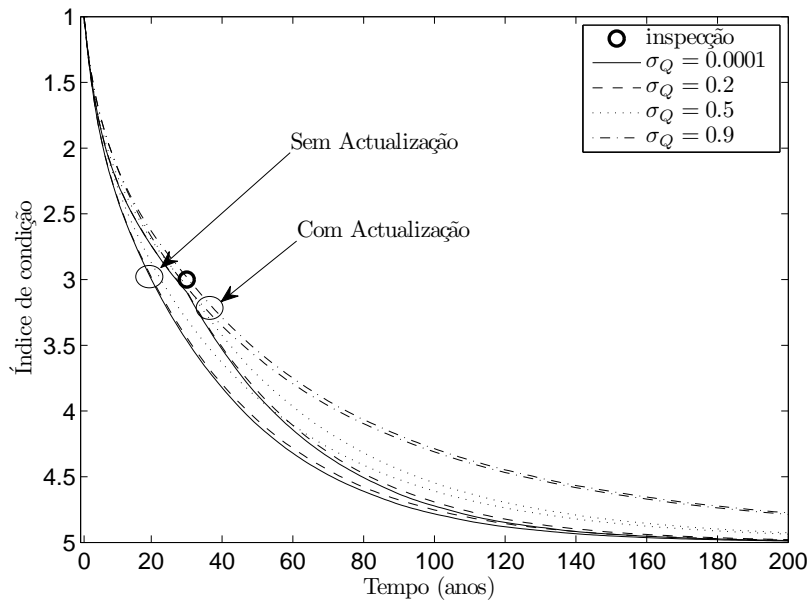


Figura 4.15: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

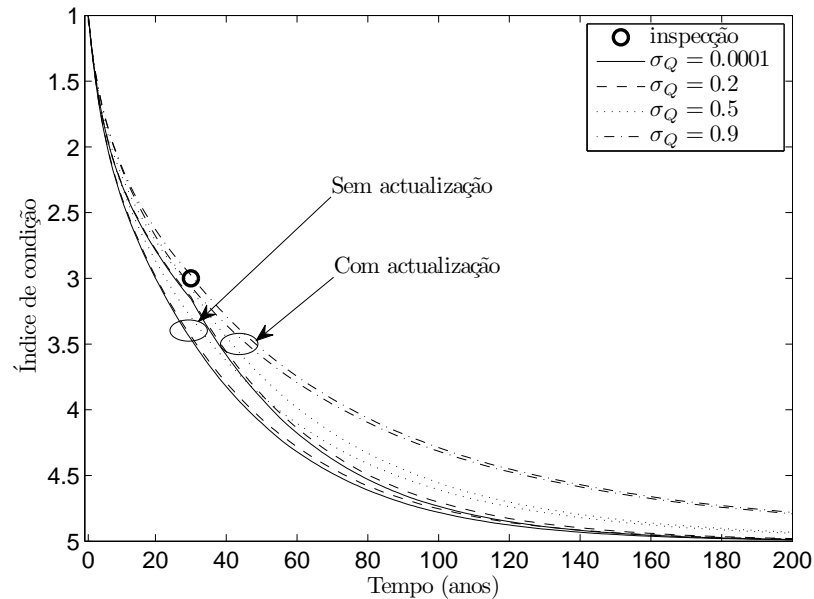


Figura 4.16: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

especialmente quando a incerteza na previsão inicial, σ_Q é maior. Sendo a condição média da previsão inicial e da actualizada tão próximas, a actualização não altera substancialmente a média do índice de condição da previsão, podendo-se dizer que a inspeção confirmou a previsão inicial.

Observa-se que o desvio padrão do índice de condição actualizado é mais alto nos anos antes da inspeção, quando comparado com os casos em que o resultado da inspeção é $C_{insp} = 2$. Uma vez que condição observada na inspeção é $C_{insp} = 3$, a gama de valores de condição que têm maior peso na previsão actualizada é maior, levando a que, nos anos que antecedem a inspeção, haja uma maior dispersão das pontes pelas várias condições e, conseqüentemente, a valores de desvio padrão mais altos. Depois da inspeção há um aumento do desvio padrão, mas ficando sempre abaixo do desvio padrão da previsão inicial, tendo um comportamento semelhante ao observado nos casos em que o resultado da inspeção é $C_{insp} = 2$.

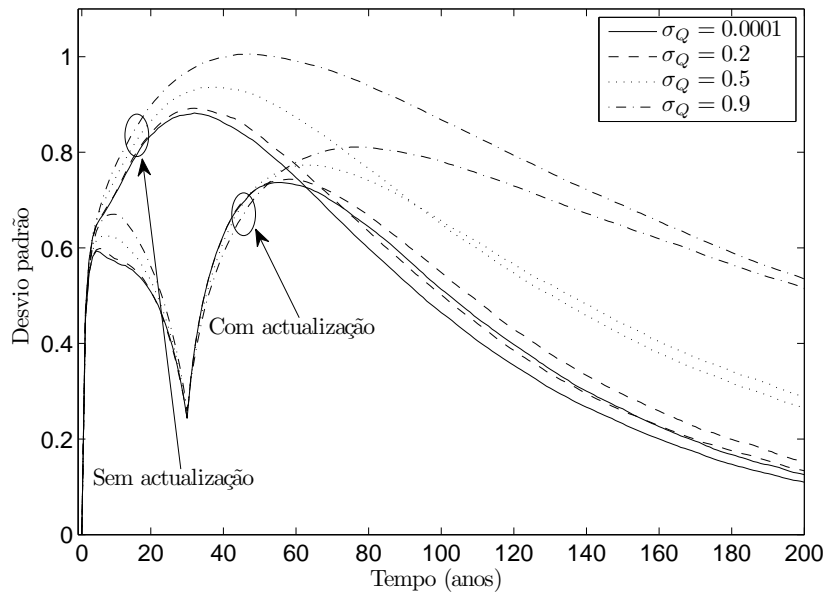


Figura 4.17: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$

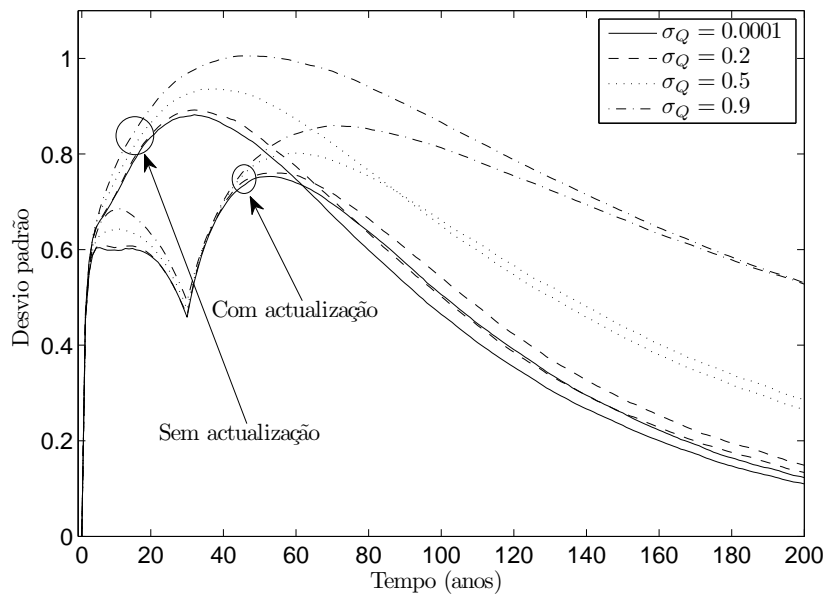


Figura 4.18: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001, \sigma_Q = 0.2, \sigma_Q = 0.5, \sigma_Q = 0.9$

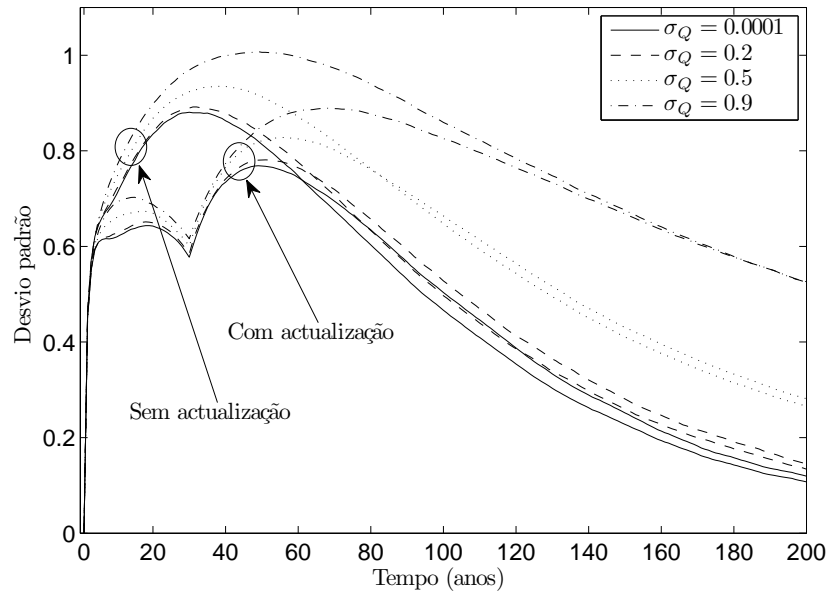


Figura 4.19: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 3$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

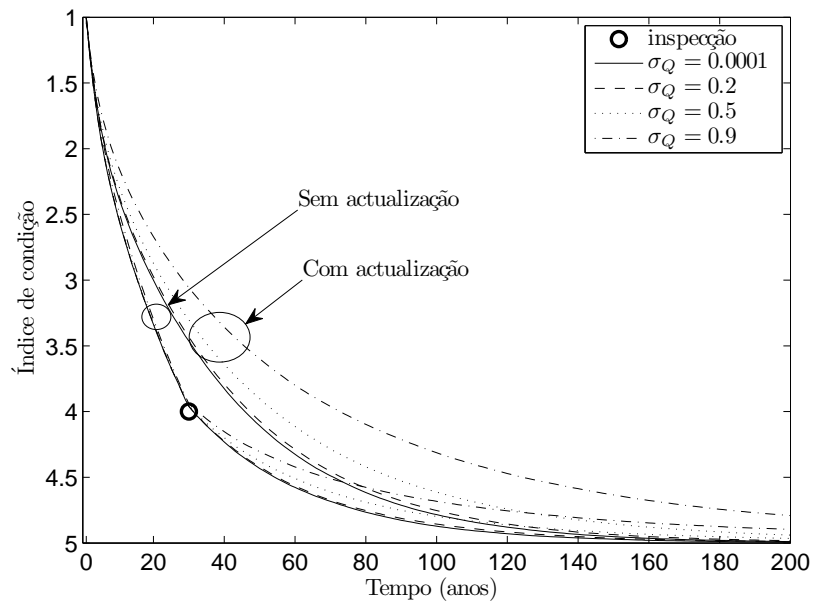


Figura 4.20: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

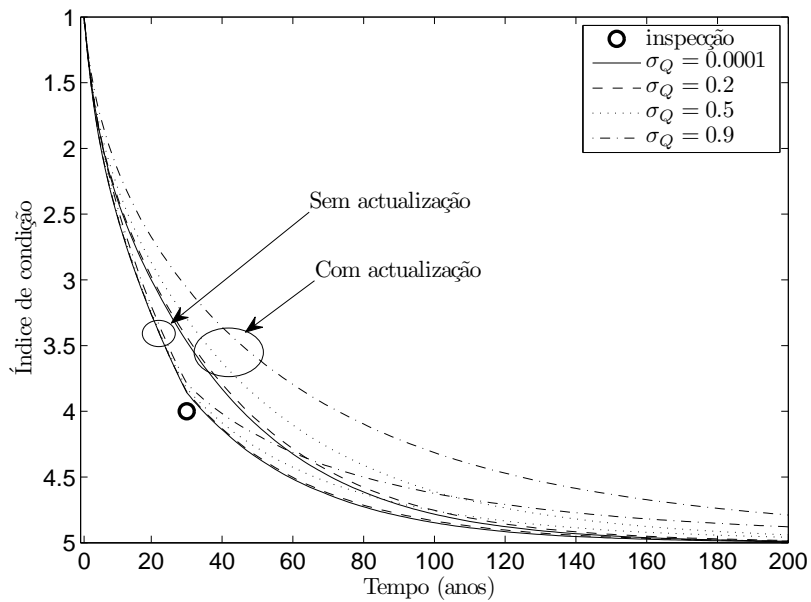


Figura 4.21: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

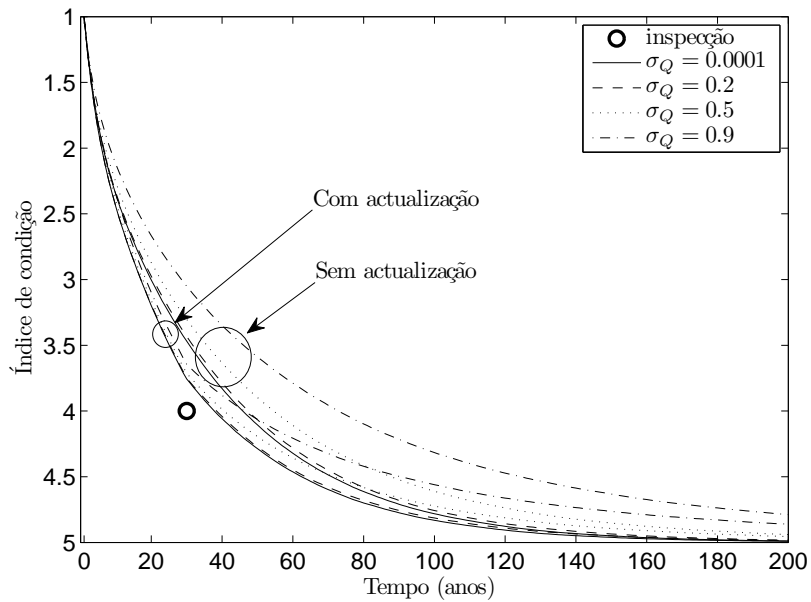


Figura 4.22: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

Nos casos mostrados nas figuras 4.20 a 4.25, o resultado da inspecção no ano 30 foi $C_{insp} = 4$, enquanto a previsão, nesse ano, apresentava uma condição média $C_{media} = 3.4$. Assim, a inspecção mostrou que a ponte se encontrava num estado pior que o previsto inicialmente.

Observa-se que, ao aumentar o desvio padrão da função de verosimilhança, a média actualizada aproxima-se da previsão inicial. Por outro lado, ao aumentar o desvio padrão do modelo de degradação, o índice de condição médio aproxima-se do índice de condição observada na inspecção. Para o mesmo valor de σ_Q , o índice de condição médio da previsão actualizada é sempre superior à condição média da previsão inicial, uma vez que a inspecção tem um resultado pior que o índice de condição médio da previsão inicial no ano da inspecção.

A degradação do desempenho do índice de condição da previsão actualizada é sempre mais rápida que a da previsão inicial, tendo uma progressão mais rápida antes da inspecção e mais lenta após a mesma. A progressão mais lenta após a inspecção deve-se ao facto de, nessa altura, já se encontrarem muitas pontes na condição 5. Uma vez chegada à condição 5, uma ponte não pode transitar para nenhuma outra, funcionando como um estado absorvente. Assim sendo, a degradação torna-se mais lenta à medida que se acumulam pontes na condição 5, tal como acontece na previsão inicial.

Observa-se que, ao aumentar o desvio padrão da inspecção, o índice de condição médio actualizada aproxima-se do índice de condição médio inicial. Por outro lado, ao aumentar o desvio padrão do modelo de degradação, o índice de condição médio aproxima-se da condição observada na inspecção. Assim sendo, também neste caso o desvio padrão pode representar a confiança que se pretenda atribuir à inspecção e à previsão inicial.

Tal como nos casos anteriores, há uma diminuição do desvio padrão do índice de condição actualizado no ano da inspecção, uma vez que as pontes com maior peso na previsão actualizada são as que, no ano da inspecção, tenham um índice de condição mais próximo do que foi observada na inspecção. O valor do desvio padrão no ano da inspecção é tanto menor quanto menor for o desvio padrão da inspecção, uma vez que um desvio padrão da função de verosimilhança mais baixo implica uma maior certeza sobre a informação fornecida pela inspecção.

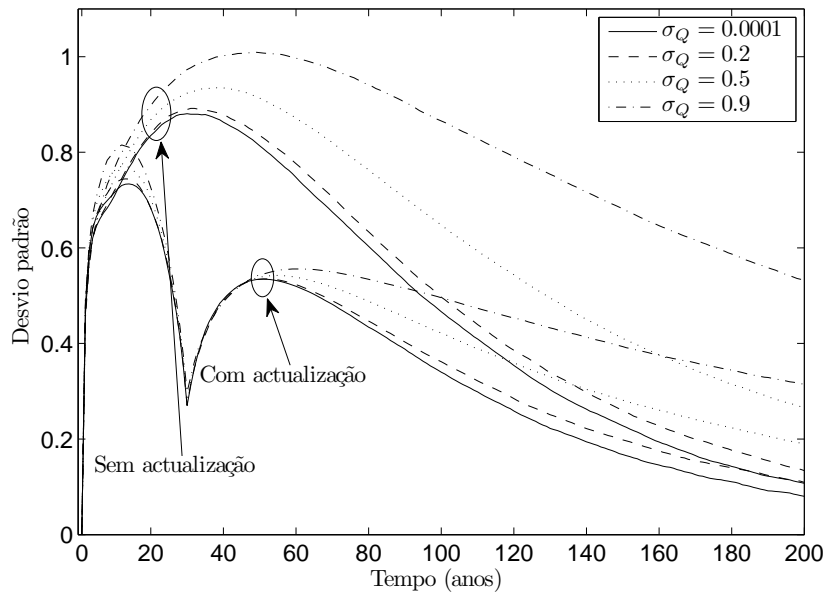


Figura 4.23: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

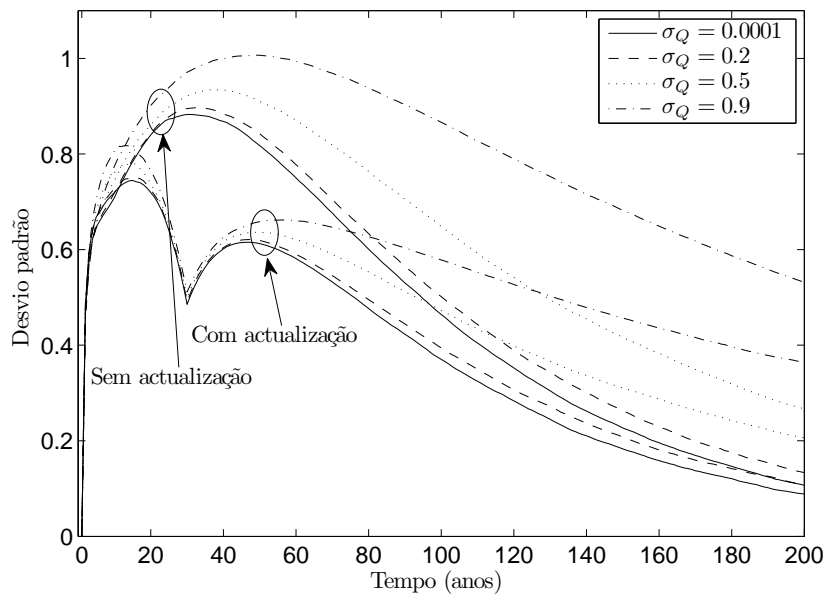


Figura 4.24: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

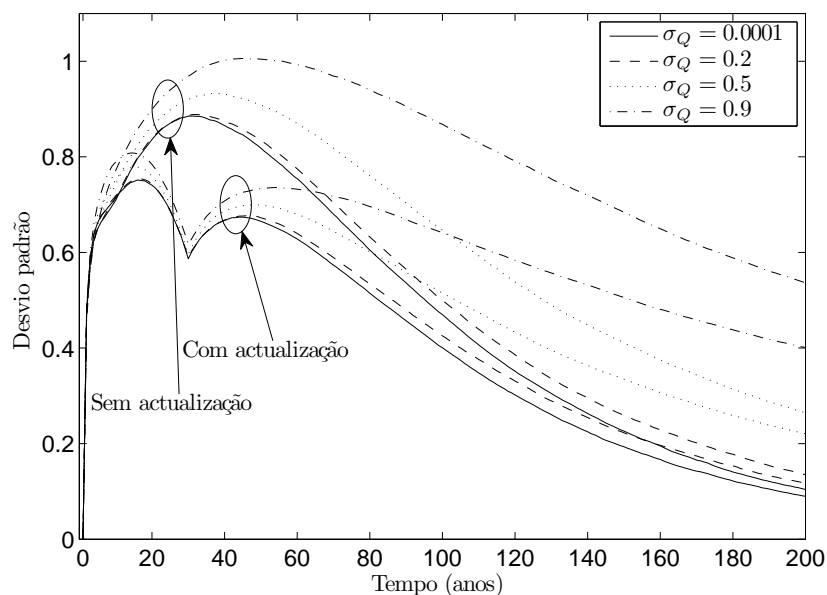


Figura 4.25: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 4$ e incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

Depois da inspecção, há um aumento do desvio padrão do índice de condição actualizado, sem no entanto, atingir o máximo observado antes da mesma. Uma vez que o resultado da inspecção foi $C_{insp} = 4$, as pontes com maior peso na previsão actualizada terão, no ano da inspecção, um índice de condição mais próximo de 4, o que faz com que, nos anos seguintes, se distribuam pelas condições 4 e 5, o que se traduz em valores de desvio padrão do índice de condição da previsão actualizada mais baixo nos anos após a inspecção que nos casos anteriores.

Nos casos mostrados nas figuras 4.26 a 4.31, o resultado da inspecção no ano 30 foi $C_{insp} = 5$, enquanto o valor esperado era $C_{media} = 3.4$. Assim, a inspecção mostrou que a ponte se encontrava num estado bastante pior que o previsto inicialmente.

Observa-se, mais uma vez, que, ao aumentar o desvio padrão da função de verosimilhança, a média actualizada aproxima-se da previsão inicial. Por outro lado, ao aumentar o desvio padrão do modelo de degradação, o índice de

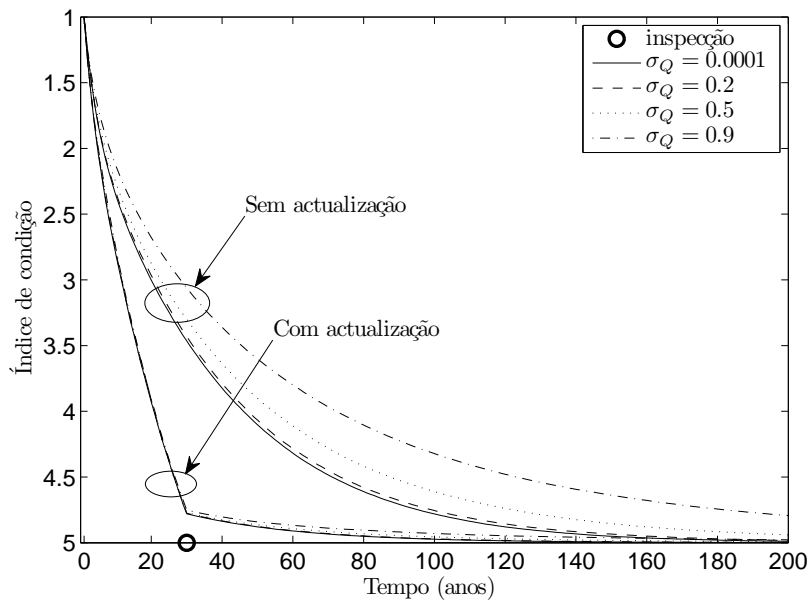


Figura 4.26: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

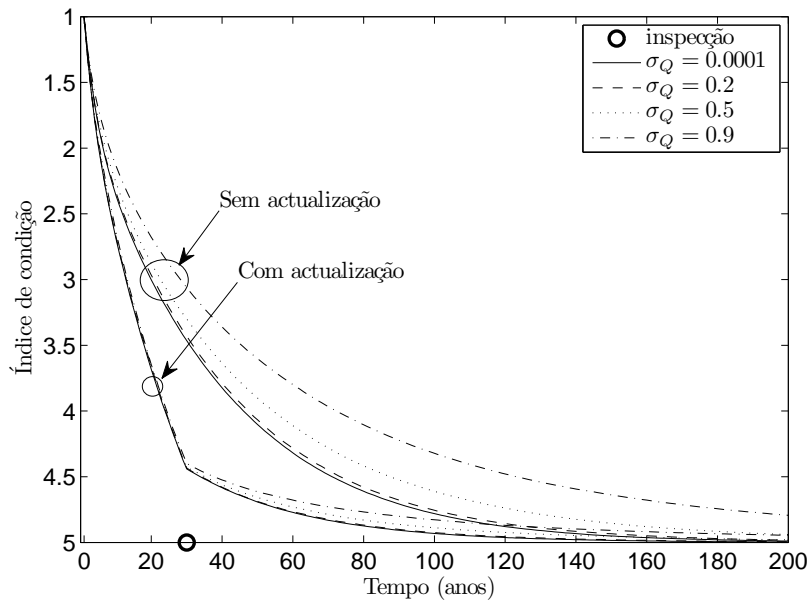


Figura 4.27: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

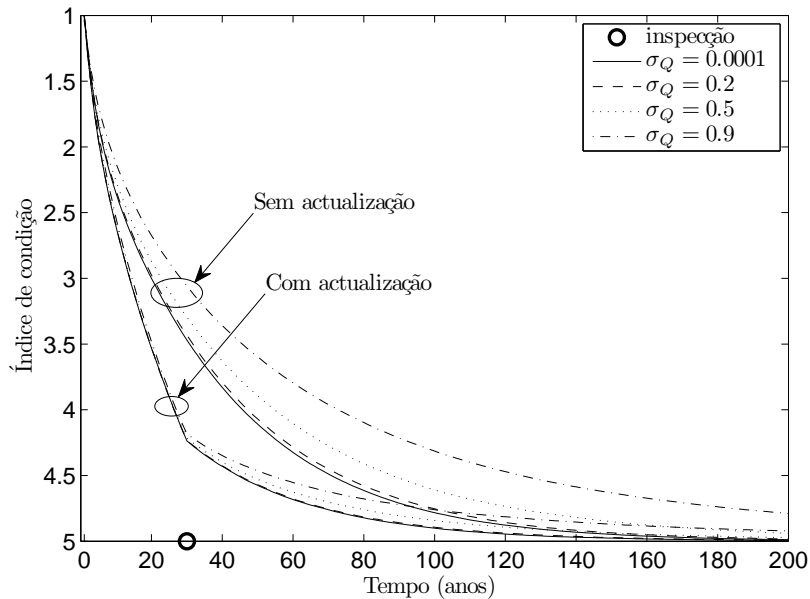


Figura 4.28: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

condição média aproxima-se da condição observada na inspeção. Para o mesmo valor de σ_Q , a condição média da previsão actualizada é sempre superior à condição média da previsão inicial, uma vez que a inspeção tem um resultado pior que a previsão inicial.

O índice de condição da previsão actualizada é sempre superior ao da previsão inicial. A degradação do desempenho da previsão actualizada apresenta uma progressão mais rápida antes da inspeção e mais lenta após a mesma, tal como acontece nos casos em que $C_{insp} = 4$ representados nas figuras 4.20 a 4.22. No entanto, nos casos em que $C_{insp} = 5$, essa diferença é mais acentuada. A progressão bastante mais lenta após a inspeção deve-se ao facto de, nessa altura, grande parte das pontes já se encontrarem na condição 5.

Observa-se que, nos anos anteriores à inspeção, o desvio padrão da condição actualizada atinge valores mais elevados que o desvio padrão da previsão inicial. Por outro lado, nos anos seguintes, o desvio padrão da previsão actualizada é sempre bastante inferior ao desvio padrão da previsão inicial. Esta tendência

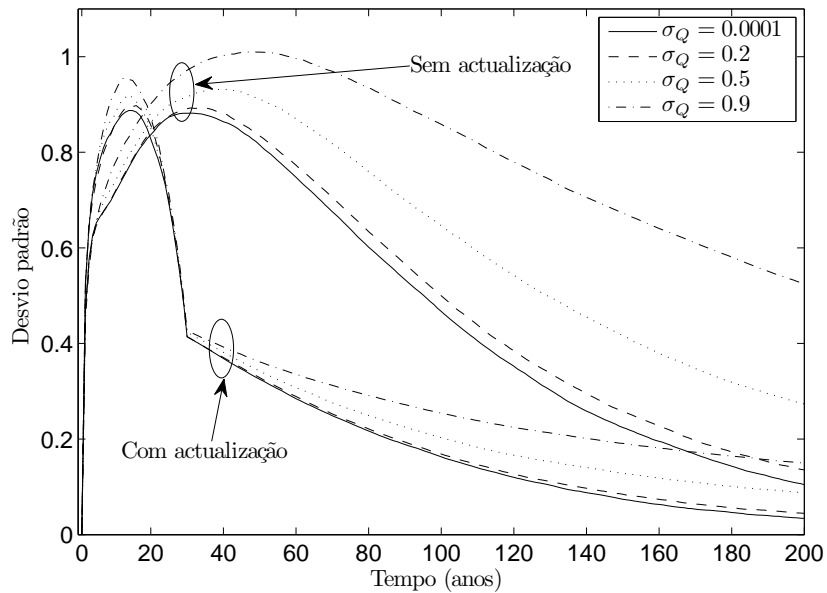


Figura 4.29: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

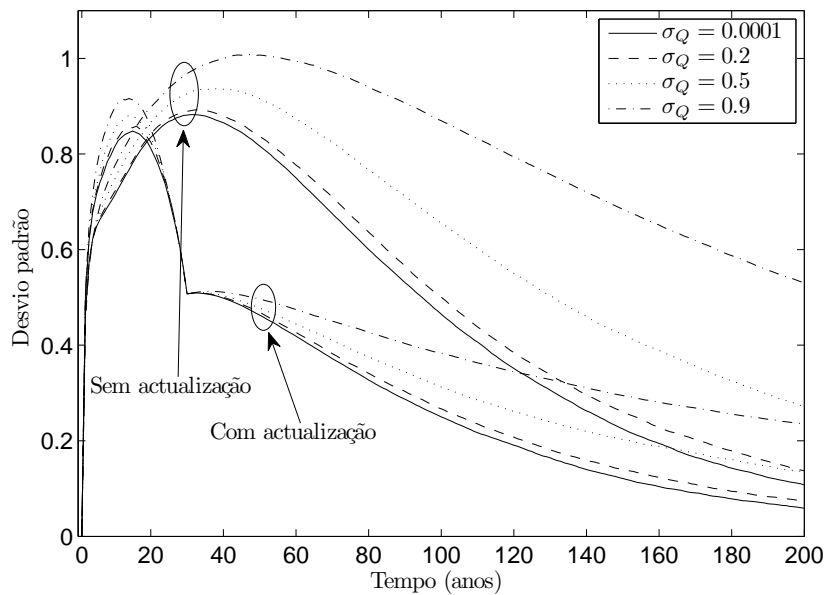


Figura 4.30: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

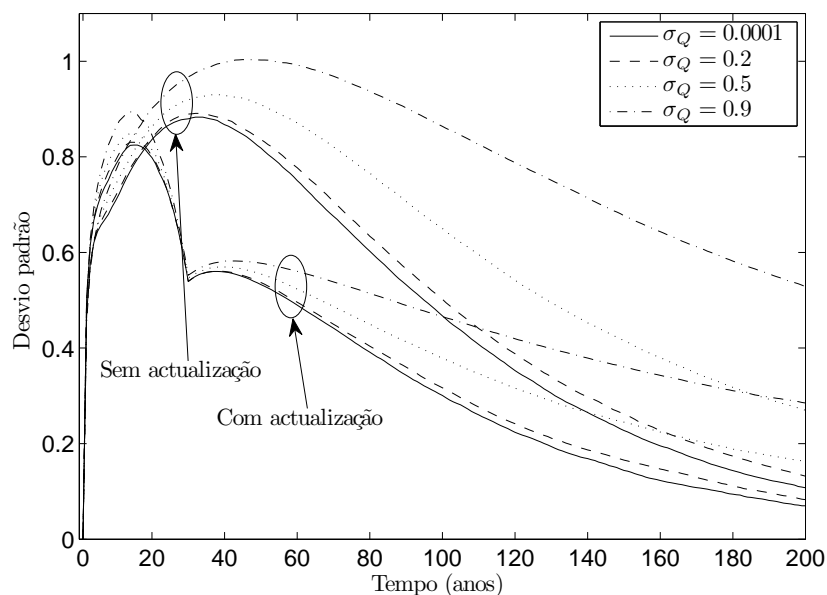


Figura 4.31: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspecção, assumindo uma inspecção no ano 30, com resultado da inspecção $C_{insp} = 5$ e incerteza na inspecção $\sigma_{insp} = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.0001$, $\sigma_Q = 0.2$, $\sigma_Q = 0.5$, $\sigma_Q = 0.9$

é especialmente notória para $\sigma_{insp} = 0.3$, uma vez que o menor valor de σ_{insp} implica uma maior certeza sobre o resultado da inspecção. Sendo o resultado da inspecção $C_{insp} = 5$, isto leva a que haja uma grande acumulação de pontes na condição 5, diminuindo bastante a dispersão dos valores de condição nos anos após a inspecção.

4.3.2 Influência da incerteza na inspecção na condição actualizada

Na segunda fase de exemplos foi estudada a influência da incerteza nos resultados da inspecção, traduzida num aumento do desvio padrão da função de verosimilhança. As condições prevista e actualizada foram calculadas usando a simulação de Monte Carlo apresentada em 3.10, para 100000 amostras, ao longo de 200 anos. São avaliados 6 exemplos, cujos parâmetros são os seguintes:

- São considerados dois casos possíveis para o resultado da inspecção: $C_{insp} = 2$ e $C_{insp} = 4$.
- Para cada um dos casos de C_{insp} , são considerados 3 valores possíveis para o desvio padrão da inspecção: $\sigma_Q = 0.3$, $\sigma_Q = 0.5$ e $\sigma_Q = 0.7$.

- A função de verosimilhança tem desvio padrão σ_{insp} , que toma os seguintes valores: $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$ e $\sigma_{insp} = 0.9$.

Análise da média e desvio padrão do índice de condição inicial e actualizado

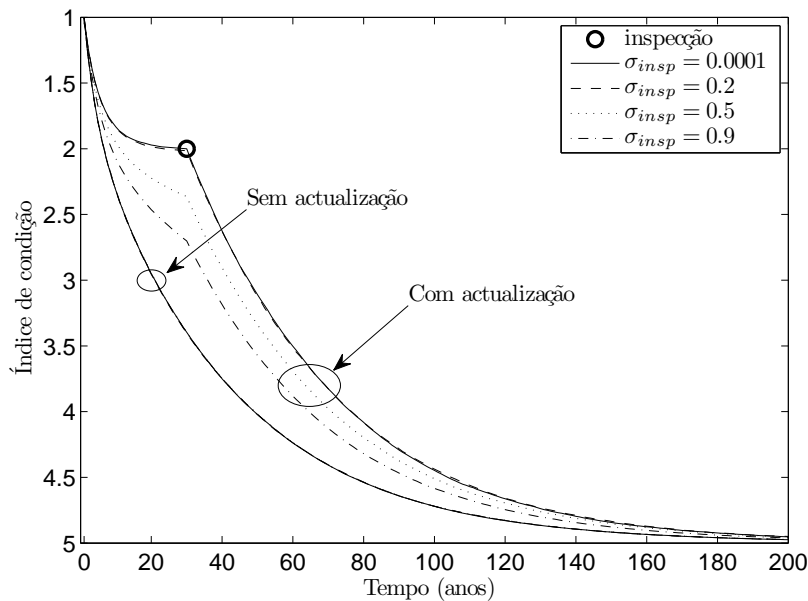


Figura 4.32: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

Nos casos apresentados nas figuras 4.32 a 4.37, o resultado da inspeção foi assumido como $C_{insp} = 2$, enquanto o valor esperado era 3.4. Assim, a inspeção revelou que a ponte se encontrava numa condição substancialmente melhor que o previsto pelo modelo de degradação.

Quando se considera não existir incerteza no resultado da inspeção, assumindo $\sigma_{insp} = 0.0001$, a previsão coincide com o resultado da inspeção no instante $t=30$. Observa-se que, ao aumentar o desvio padrão da função de verosimilhança, σ_{insp} , a média actualizada aproxima-se da previsão inicial. Por outro lado, ao aumentar o desvio padrão do modelo de degradação σ_Q , a o índice de condição médio da previsão actualizada aproxima-se da condição da inspeção. Pode-se então concluir que o desvio padrão do modelo de degradação, σ_Q e da função de

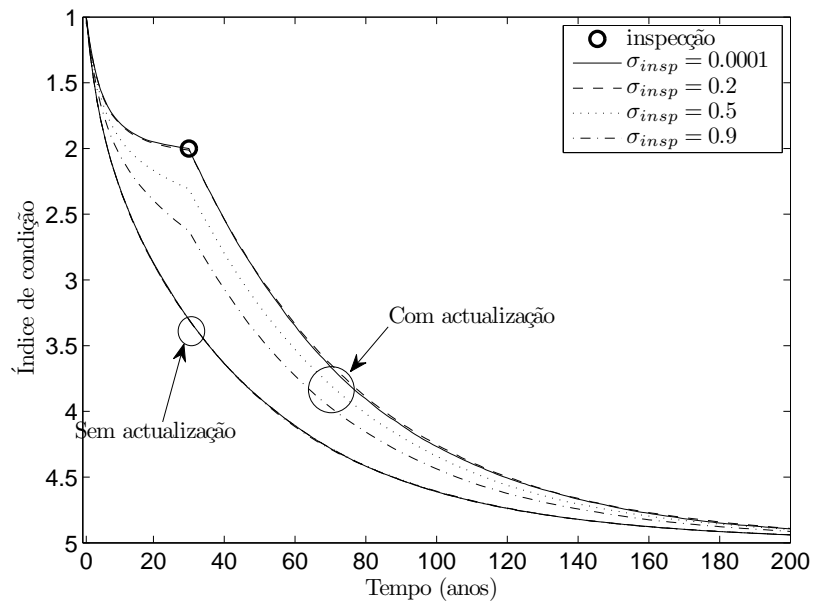


Figura 4.33: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

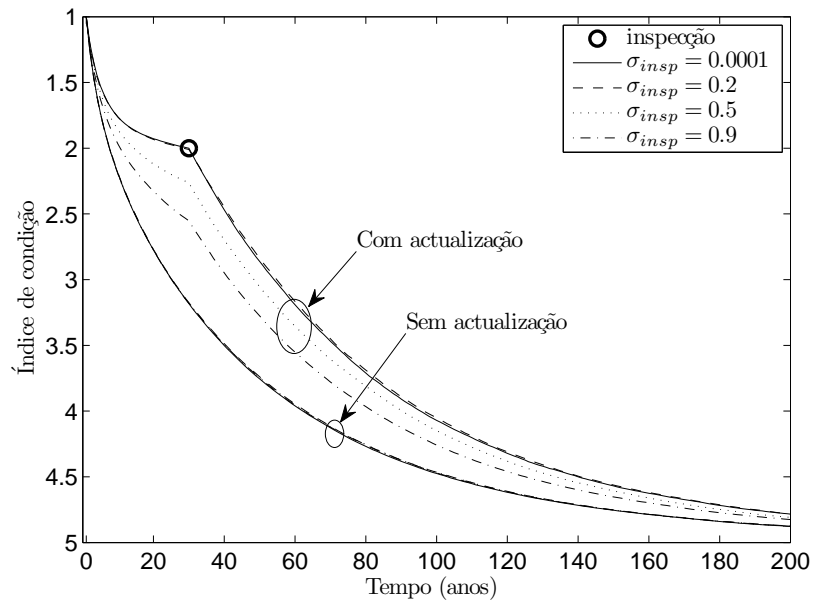


Figura 4.34: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

verossimilhança, σ_{insp} , representam o peso que cada componente tem na previsão final. Conforme a confiança que se possa atribuir a cada uma, pode-se aumentar ou diminuir o seu desvio padrão.

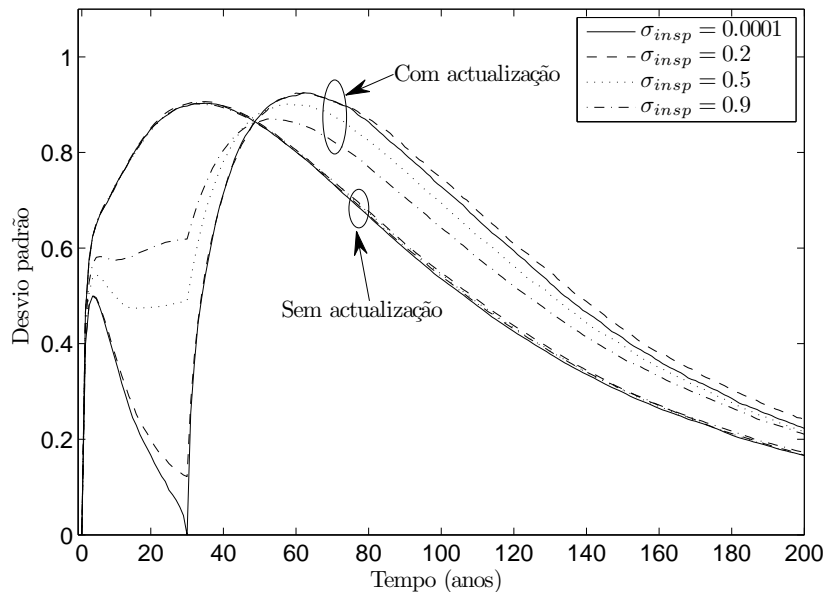


Figura 4.35: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

No ano da inspeção há uma diminuição do desvio padrão do índice de condição da previsão actualizada. Para um valor de desvio padrão da função de verossimilhança $\sigma_{insp} = 0.0001$, o desvio padrão do índice de condição actualizado atinge um valor bastante próximo de 0.0001, ou seja, igual à função de verossimilhança. Após a inspeção, o desvio padrão do índice de condição da previsão actualizada tende a aumentar, atingindo valores ligeiramente superiores ao máximo do desvio padrão da condição da previsão inicial. Uma vez que o resultado da inspeção é $C_{insp} = 2$, as pontes com maior peso na índice de condição actualizado são as que, nesse ano apresentam condição mais próxima de 2. Essas pontes, nos anos após a inspeção, podem assumir os índices de condição $C = 2$, $C = 3$, $C = 4$ ou $C = 5$, enquanto as amostras que fazem parte da previsão inicial já apresentam maior probabilidades associadas a índices de

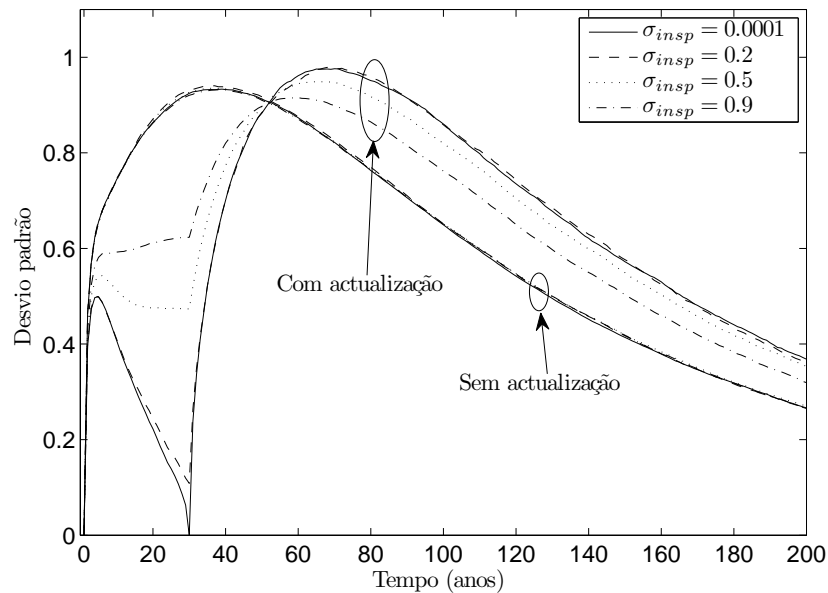


Figura 4.36: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

condição superiores, limitando assim as condições possíveis nos anos seguintes. Depois de atingir o máximo, o desvio padrão, tanto da previsão inicial como da actualizada, tende para zero, à medida que as pontes se acumulam no índice de condição $C = 5$.

Nos casos apresentados nas figuras 4.38, a 4.43, o resultado da inspeção foi assumido como $C_{insp} = 4$, enquanto o valor esperado era 3.4. Assim, a inspeção revelou que a ponte se encontrava numa condição pior que o previsto pelo modelo de degradação.

A ponte apresenta uma degradação ligeiramente mais rápida que o valor esperado. Observa-se que o índice de condição dado pela previsão actualizada é sempre mais alto que o dado pela previsão inicial, sendo a diferença tanto maior quanto menor for o valor do desvio padrão da função de verosimilhança, σ_{insp} . Observa-se ainda que, quanto maior o valor de desvio padrão do modelo de actualização, σ_Q , mais a previsão inicial se afasta da previsão actualizada.

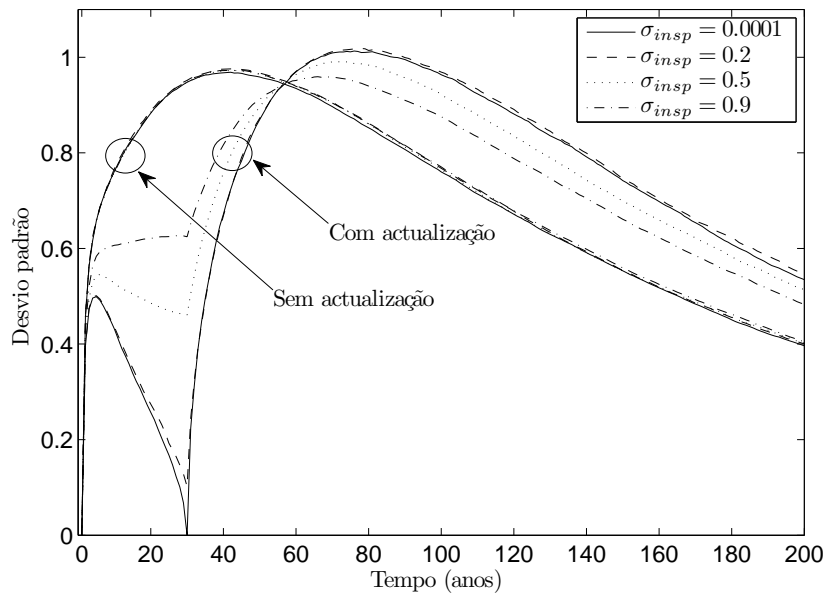


Figura 4.37: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 2$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

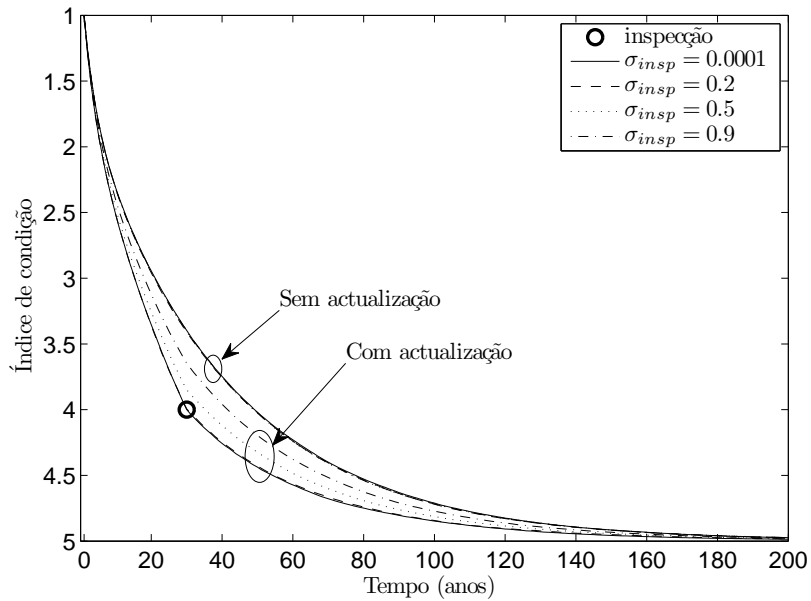


Figura 4.38: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

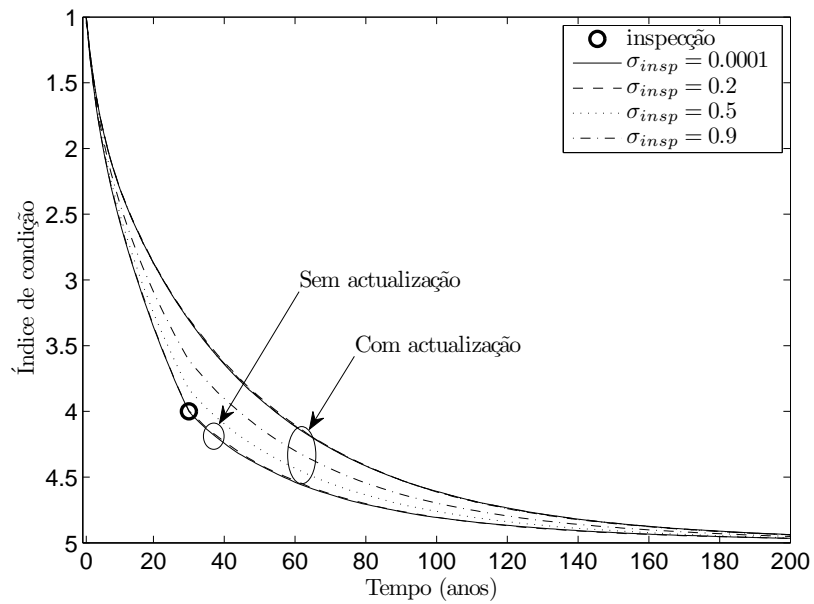


Figura 4.39: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

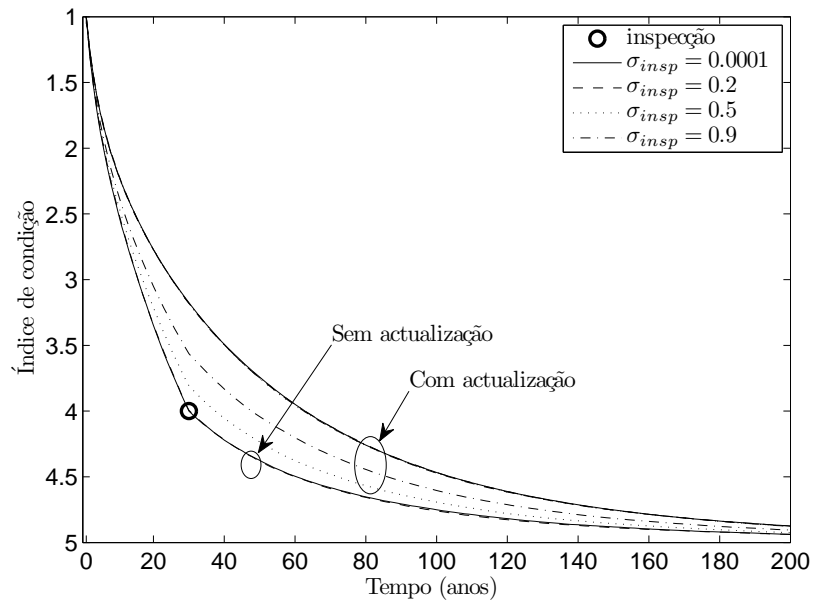


Figura 4.40: Índice de condição médio, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

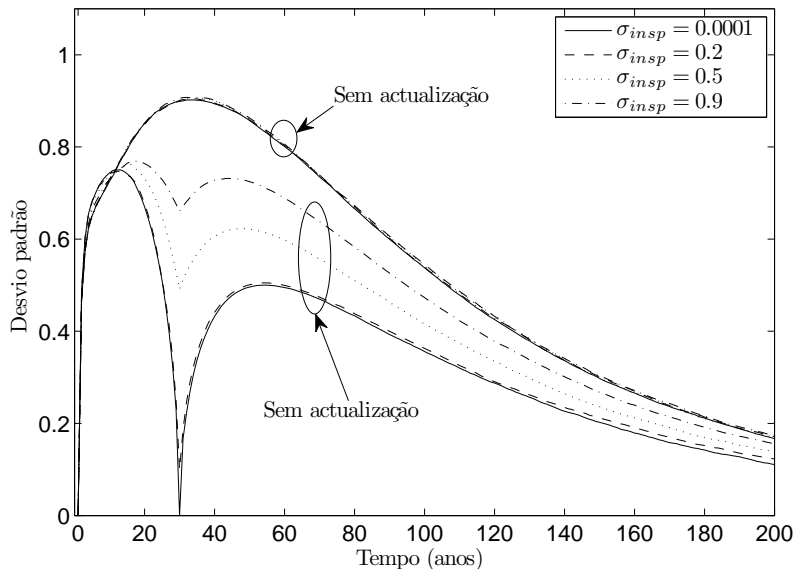


Figura 4.41: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.3$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

Nestes casos, o desvio padrão da condição dada pela previsão inicial aumenta desde o primeiro ano até atingir o máximo, para em seguida diminuir, tendendo para zero.

Como se pode observar, nos anos antes da inspeção, o desvio padrão do índice de condição actualizado aumenta, numa fase inicial, diminuindo depois até ao ano da inspeção. Nesse ano, o desvio padrão diminui, sendo aproximadamente zero para $\sigma_{insp} = 0.0001$. Nesses casos, uma vez que o desvio padrão da função de verosimilhança é quase nulo, as amostras que têm mais peso na condição actualizada são as que, no ano da inspeção, apresentam um índice de condição igual ao resultado da inspeção. No ano da inspeção, o desvio padrão da condição actualizada é tanto maior quanto maior for o valor do desvio padrão da função de verosimilhança, σ_{insp} , uma vez que isso implica uma maior incerteza associada ao resultado da inspeção.

Nos anos após a inspeção, há um aumento desvio padrão do índice de condição

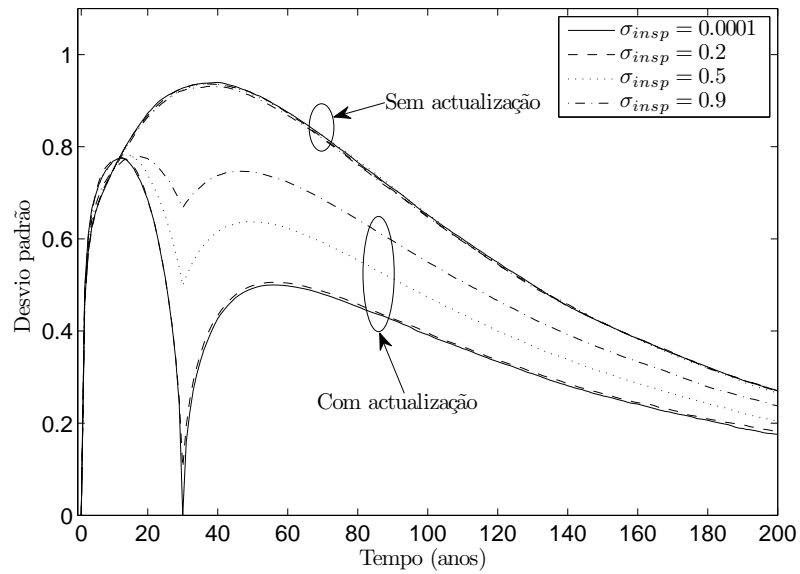


Figura 4.42: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.5$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

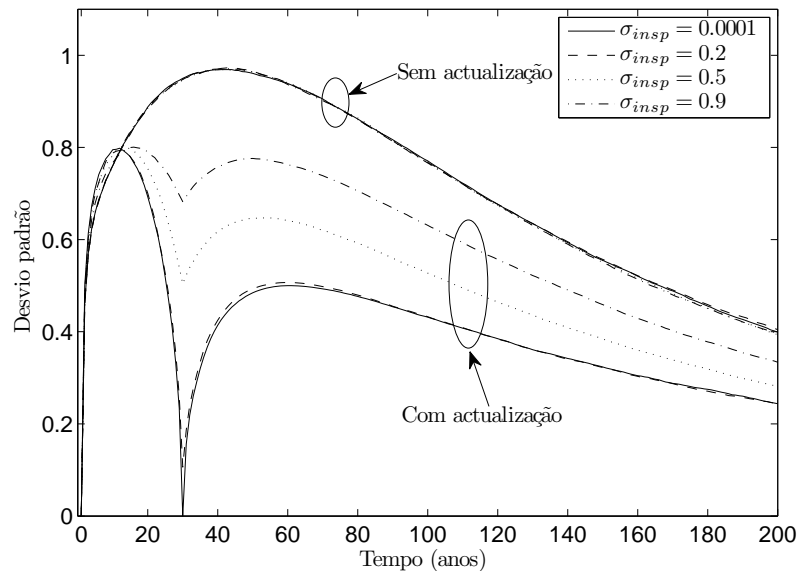


Figura 4.43: Desvio padrão do índice de condição, com e sem incorporar o resultado da inspeção, assumindo uma inspeção no ano 30, com resultado da inspeção $C_{insp} = 4$ e incerteza no modelo de deterioração $\sigma_Q = 0.7$ para diferentes níveis de incerteza na inspeção $\sigma_{insp} = 0.0001$, $\sigma_{insp} = 0.2$, $\sigma_{insp} = 0.5$, $\sigma_{insp} = 0.9$

actualizado sem, no entanto, atingir o valor máximo registado antes da inspecção. Observa-se ainda que quanto maior o valor do desvio padrão do modelo de degradação, σ_Q , maior o desvio padrão da previsão do índice de condição actualizado e maior a diferença entre os vários casos de desvio padrão da função de verosimilhança, σ_{insp} , para os anos após a inspecção.

4.3.3 Influência do número de inspecções

De modo a analisar a influência do número de inspecções, foram realizados exemplos considerando 1, 2 e 3 inspecções, analisando a média e o desvio padrão das previsões actualizadas do desempenho ao longo do ciclo de vida. Em todos os ensaios foi assumido como desvio padrão do modelo de degradação $\sigma_Q = 0.3$ e desvio padrão da função de verosimilhança $\sigma_{insp} = 0.5$. Os valores de índice de condição assumidos para o resultado das inspecções foram escolhidos de forma a representar o que seria de esperar de uma ponte cuja degradação de desempenho é ligeiramente mais lenta que a média. Como tal, sendo os valores esperados para a condição nos anos 15, 30 e 55 são 2.7, 3.4 e 4.1, os resultados das inspecções para os mesmos anos serão $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$, respectivamente.

Foi calculada a média e o desvio padrão do índice de condição considerando quatro situações:

- a) Sem inspecção
- b) Uma inspecção no ano 15, com resultado $C_{insp} = 2$
- c) Duas inspecções, nos anos 15 e 30, ambas com resultado $C_{insp} = 3$
- d) Três inspecções, nos anos 15, 30 e 45, todas com resultado $C_{insp} = 4$

Análise da média e do desvio padrão

Como se pode observar na figura 4.44, o índice de condição médio da previsão actualizada, nos casos b) a d) evolui de forma bastante semelhante ao longo do tempo. Para os casos b) a d), em que foram consideradas inspecções, o índice de condição actualizado evolui de forma mais lenta que o índice de condição inicial, representado pelo caso a).

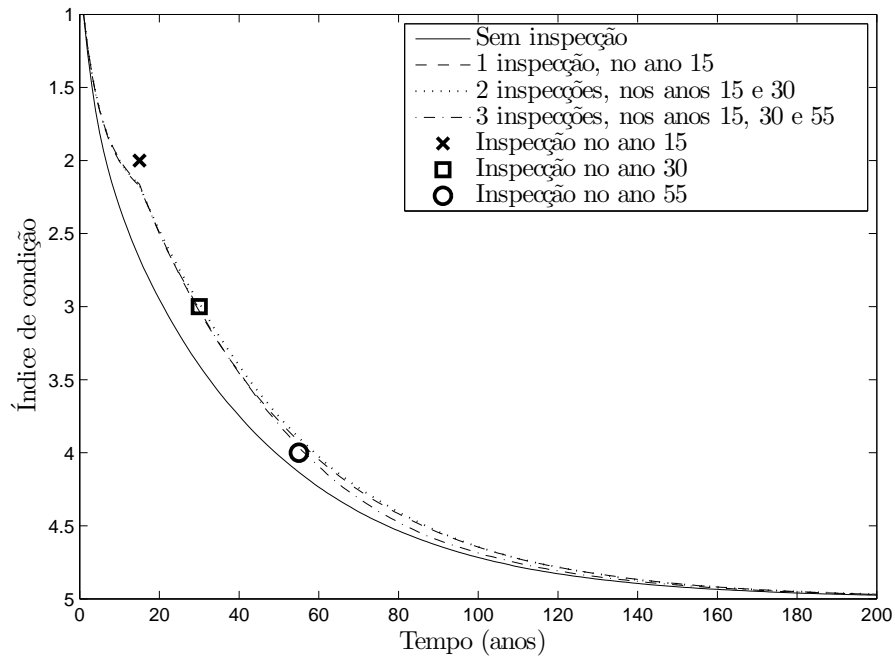


Figura 4.44: Índice de condição médio, para quatro situações: sem considerar inspeções, considerando uma inspeção no ano 15 com resultado $C_{insp} = 2$, considerando duas inspeções nos anos 15 e 30 com resultados $C_{insp} = 2$ e $C_{insp} = 3$, respectivamente e considerando três inspeções, nos anos 15, 30 e 45, com resultados $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$, respectivamente

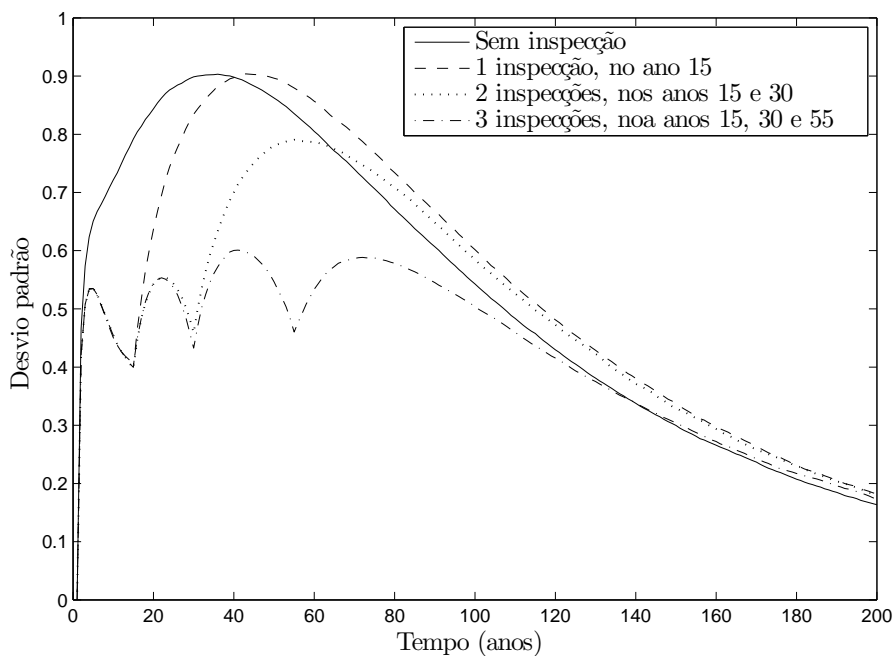


Figura 4.45: Desvio padrão da condição inicial e da condição actualizada, com uma, duas e três inspeções

Como se pode observar na figura 4.45, no caso b), o desvio padrão do índice de condição apresenta um mínimo no ano da inspeção, reflectindo a menor incerteza na previsão para esse ano. Após a inspeção, tem uma evolução semelhante à do caso a), em que não é considerada inspeção, atingindo o máximo no ano 43, próximo do desvio padrão do caso a). Depois de atingido o máximo, diminui, tendendo para zero.

O desvio padrão do índice de condição no caso c) atinge dois mínimos, nos anos das duas inspeções, devido à menor incerteza na previsão. Até ao ano 15, a evolução é bastante semelhante ao do caso b). Após a inspeção do ano 30, aumenta até atingir o máximo no ano 55, com um valor inferior ao atingido pelo desvio padrão dos casos a) e b). Depois de atingir o máximo, o desvio padrão diminui, tendendo para zero.

O desvio padrão do índice de condição do caso d) atinge três mínimos, nos anos das três inspeções. Evolui de forma bastante semelhante ao do caso c), até ao ano 30. Após o ano 55, o desvio padrão aumenta, mas sem atingir um valor superior aos atingidos anteriormente. Após atingir este máximo, o desvio padrão do índice de condição diminui, tendendo para zero. Uma vez que, neste caso, o desvio padrão do índice de condição se mantém em valores relativamente baixos, quando comparados com os restantes casos, pode-se dizer que este é o mais favorável, ao nível da incerteza, permitindo uma previsão da condição mais eficaz.

De modo a analisar como o número de inspeções influencia a capacidade do modelo para prever o número de pontes em mau estado, foi analisada a probabilidade associada às condições 4 e 5, para cada um dos casos a) a d).

Como se pode observar na figura 4.46, para o caso b), em que é considerada uma inspeção no ano 15, a probabilidade associada às condições 4 e 5 é aproximadamente zero até ao ano 15. Após o ano 15, esta tende a aumentar, sendo sempre inferior ao caso a), em que não é considerada qualquer inspeção.

No caso c), em que são consideradas duas inspeções, nos anos 15 e 30, a probabilidade associada às condições 4 e 5 é aproximadamente nula até ao ano 15, tal como no caso b). Entre o ano 15 e o ano 30 tende a aumentar, mas de forma mais lenta que no caso b), até ao ano 30. A partir do ano 30, a probabilidade aumenta da forma mais rápida, mas apresentando sempre valores inferiores aos casos a), b) e c).

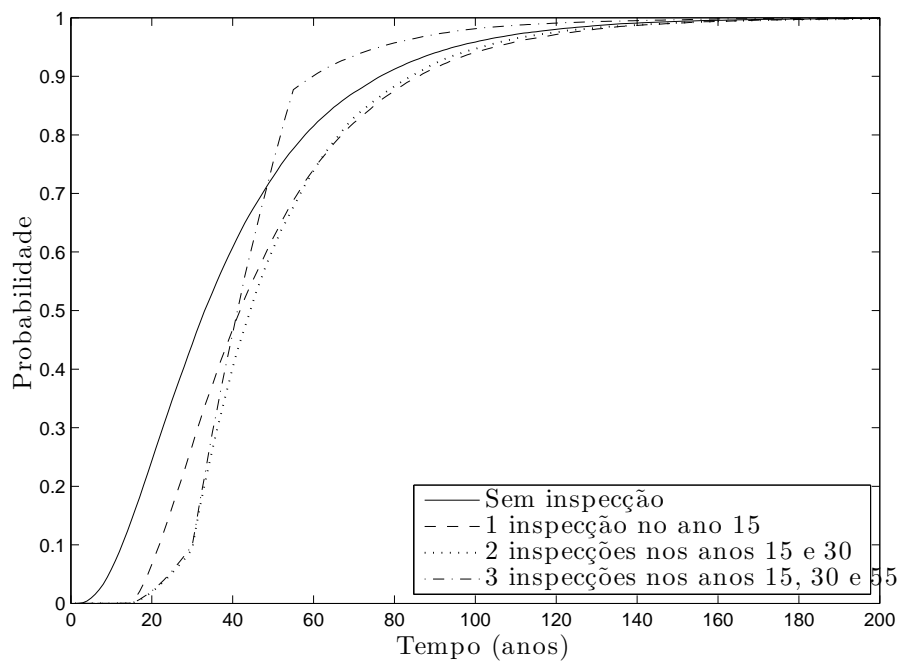


Figura 4.46: Probabilidade associada às condições 4 e 5, ao longo de 200 anos, para quatro situações: sem considerar inspeções, considerando uma inspeção no ano 15 com resultado $C_{insp} = 2$, considerando duas inspeções nos anos 15 e 30 com resultados $C_{insp} = 2$ e $C_{insp} = 3$, respectivamente e considerando três inspeções, nos anos 15, 30 e 45, com resultados $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$, respectivamente

No caso d), em que são consideradas 3 inspecções, nos anos 15, 30 e 55, a probabilidade associada aos índices de condição 4 e 5 apresenta uma evolução bastante semelhante à do caso c), até ao ano 30. A partir desse ano, e até ao ano 55, a probabilidade aumenta de forma mais rápida que qualquer um dos outros casos, sendo que, a partir do ano 49, apresenta um valor superior ao do caso a). A partir do ano 55, a probabilidade evolui de forma mais lenta, apresentando, no entanto, um valor superior ao de qualquer um dos outros casos. Uma vez que a inspecção assumida no ano 55 apresenta um resultado $C_{insp} = 4$, as amostras com maior peso no índice de condição actualizado serão as que, no ano 55 se apresentem um índice de condição 4, o que aumenta a probabilidade associada aos índices 4 e 5.

4.4 Conclusões

Neste capítulo foi aplicado a um conjunto de pontes o modelo desenvolvido no capítulo 3 descrito por [19]. Assumindo uma condição inicial e uma matriz de intensidade, foi calculado o índice de condição ao longo do ciclo de vida de uma estrutura. Posteriormente foi calculada a previsão actualizada, assumindo informação relativa a uma inspecção. Foi também realizado um estudo paramétrico, com o objectivo de analisar de que forma as variáveis de cada um dos modelos influenciam a previsão, considerando inspecções.

De modo a modelar a incerteza na previsão do desempenho e na inspecção foram usados os desvios padrão associados ao modelo de degradação e ao modelo de actualização, respectivamente. Concluiu-se que a incerteza associada a cada um dos modelos representa a confiança dada a cada uma das componentes. Tendo um modelo de degradação construído com base em informação histórica fiável e em quantidade suficiente, pode-se dar a esta componente um maior peso na previsão actualizada. Para tal, é usado um menor valor de desvio padrão associado ao modelo de degradação. Por outro lado, caso as inspecções cujo resultado é usado no modelo de actualização tenham sido realizadas por um inspector experiente, o desvio padrão associado ao modelo de degradação pode ter um valor menor.

Para analisar a influência do número de inspecções foram analisados três casos: considerando uma, duas e três inspecções. Observou-se que, quanto maior o número de inspecções, menor o desvio padrão da previsão actualizada, que

atinge valores mínimos nos anos em que são realizadas as inspecções, o que conduz a uma maior eficácia da previsão actualizada. Assim, é possível obter um valor mais fiável para a probabilidade de a ponte em causa atingir um nível de desempenho inaceitável.

Capítulo 5

Acções de Reabilitação

5.1 Introdução

Para além de serem estruturas de importância crítica, as pontes são também estruturas com tempo de vida útil muito longo e com custos de construção altos, quando comparadas com os restantes elementos de uma rede viária. Como tal, torna-se necessário proceder a acções de manutenção e reabilitação, de modo a minimizar o custo total ao longo do ciclo de vida da estrutura.

Dois dos principais objectivos de um sistema de gestão de pontes são o controlo de custos e a manutenção das condições de segurança para os utentes. De modo a que as estruturas mantenham um desempenho aceitável, torna-se necessário proceder a acções de manutenção e, quando necessário, de reabilitação ou de substituição.

Um modelo de previsão da degradação do desempenho permite o planeamento das intervenções a realizar nas estruturas. Deste modo, torna-se possível controlar os custos de manutenção, minimizar as interrupções de tráfego e garantir a segurança dos utilizadores.

Neste capítulo são estudados os custos associados à reabilitação de pontes, usando a Actualização Bayesiana para considerar a informação proveniente de inspecções em conjunto com a previsão inicial, como descrito no capítulo 3. Inicialmente é calculado o custo ao longo do ciclo de vida, usando apenas a previsão inicial. Posteriormente é calculado o custo de uma ponte específica, considerando a previsão inicial em conjunto com informação proveniente de inspecções. Para conjugar a previsão inicial com a informação dada pela inspecção é usada a Actualização Bayesiana, descrita no capítulo 3.9. Por fim é

analisada a influência do ano de inspecção no custo acumulado ao longo do ciclo de vida da estrutura.

5.1.1 Intervenções de reabilitação

Uma intervenção de reabilitação tem como objectivo a melhoria do desempenho da ponte, através de reparação e substituição de partes da estrutura que se encontrem danificadas. Uma intervenção deste tipo torna-se necessária quando a ponte deixa de apresentar o nível de serviço adequado, pondo em risco a segurança dos utilizadores, devido ao risco de colapso, ou quando os danos existentes possam vir a causar a necessidade de substituição da ponte. Apesar dos custos de uma intervenção de reabilitações serem altos, tanto a nível monetário, como de incómodo para os utilizadores, são menores que os custos de uma substituição.

Efeitos e custos

Uma intervenção de reabilitação tem como resultado a diminuição da degradação da estrutura, levando a uma melhoria na sua condição. O critério geralmente usado para intervenções de reabilitação é o estado. Quando a estrutura atinge um nível de desempenho inaceitável, é sujeita a reabilitação. Uma intervenção deste tipo tem custos tanto a nível monetário como ao nível do incómodo para os utilizadores, devido à interrupção do tráfego. Neste trabalho, só foi tido em conta o custo monetário. O custo monetário de uma reabilitação dependerá da extensão da degradação e do tipo de estrutura em causa. Uma vez que a única informação disponível é a condição total da estrutura, não existe informação que permita tirar conclusões sobre o custo real de cada intervenção. Como tal, não foi feita qualquer distinção entre o custo de intervenções mais ou menos dispendiosas.

5.1.2 Intervenções de manutenção preventiva

Uma intervenção de manutenção tem como objectivo diminuir a velocidade de degradação. Segundo [26], as acções de manutenção podem-se dividir em dois tipos, baseada no tempo e baseada no estado, segundo o critério usado para a altura de intervenção:

- **Manutenção baseada no tempo** - A manutenção é aplicada a intervalos de

tempo fixos, independentemente do estado de condição em que se encontra a estrutura, como se pode observar na figura seguinte:

- **Manutenção baseada no estado** - A manutenção é aplicada quando a estrutura atinge um determinado estado de condição. Geralmente esta condição corresponde a um nível de serviço considerado inaceitável, tanto em relação ao nível de serviço, como ao risco de colapso da estrutura. Na figura seguinte,

Uma intervenção de manutenção tem um carácter preventivo, parando a evolução da degradação durante um intervalo de tempo, não sendo capaz de melhorar a condição da ponte. Tem um custo mais baixo que uma intervenção de reabilitação, podendo ser aplicada mais vezes ao longo do ciclo de vida da ponte. No entanto, as intervenções de manutenção não serão abordadas neste trabalho.

5.1.3 Actualização do custo

De modo a ter em conta a data em que é feita a reabilitação, torna-se necessário actualizar o custo de intervenções futuras para valores presentes. Assim sendo, o valor no presente é dado pela seguinte fórmula[27]:

$$C_0 = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (5.1)$$

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

5.2 Estratégia de Reabilitação

Para estudar como o ano de inspecção e o respectivo resultado influenciam o custo, foi definida uma estratégia de reabilitação, com base na qual vai ser realizado um estudo paramétrico. A estratégia estudada consiste em:

- Proceder à reabilitação no ano em que a ponte atingir a condição $C = 4$, passando a sua condição a ser $C = 1$.
- Sempre que for realizada uma reabilitação, contabilizar o custo. O valor do custo deve ser actualizado, usando a expressão 5.1
- Quando for atingido o ano de inspecção, a contar desde a última reabilitação ou inspecção, proceder à actualização Bayesiana.

- Calcular a média da actualização Bayesiana de todas as inspecções e usar esse valor como ponderação para o custo actualizado.

A degradação do desempenho e a actualização Bayesiana são calculadas com base nos modelos de degradação e actualização, descritos no capítulo 3.

5.2.1 Exemplo de aplicação

De seguida é apresentado um exemplo de aplicação da estratégia de reabilitação descrita anteriormente. A matriz de intensidade e distribuição de probabilidades associada à condição inicial usadas no modelo de degradação são os mesmos que foram apresentados em 4.2. Considerou-se que o custo de cada intervenção de reabilitação é de 100 u.m. e que a taxa de juro é 2% ao ano. Inicialmente foi calculada a degradação de uma amostra, ao longo de 100 anos.

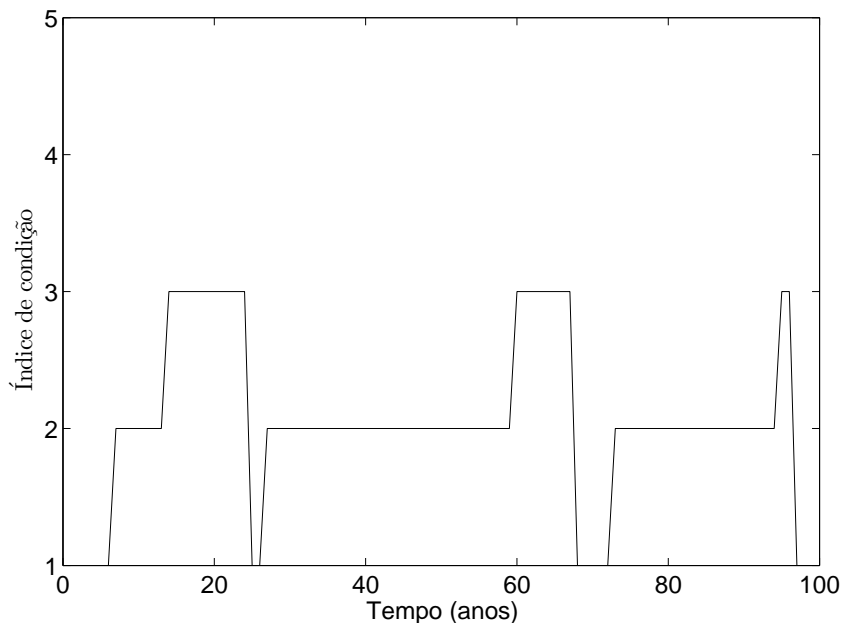


Figura 5.1: Índice de condição, considerando uma estratégia de reabilitação

Como se pode ver na figura 5.1, são realizadas três intervenções de reabilitação, nos anos 25, 68 e 97. Aplicando a expressão 5.1, é possível calcular o custo actualizado da reabilitação realizada no ano 25:

$$C_0 = \frac{100}{(1 + 0.02)^{25}} = 60.95 u.m. \quad (5.2)$$

Procedendo de igual forma para as outras inspecções, obtêm-se os valores 26.01 u.m., para a reabilitação realizada no ano 68 e 14.65 u.m. para a reabilitação

realizada no ano 97, o que dá um total de 101.61 u.m.. Assim, o custo acumulado ao longo dos 100 anos, é mostrado na figura 5.2.

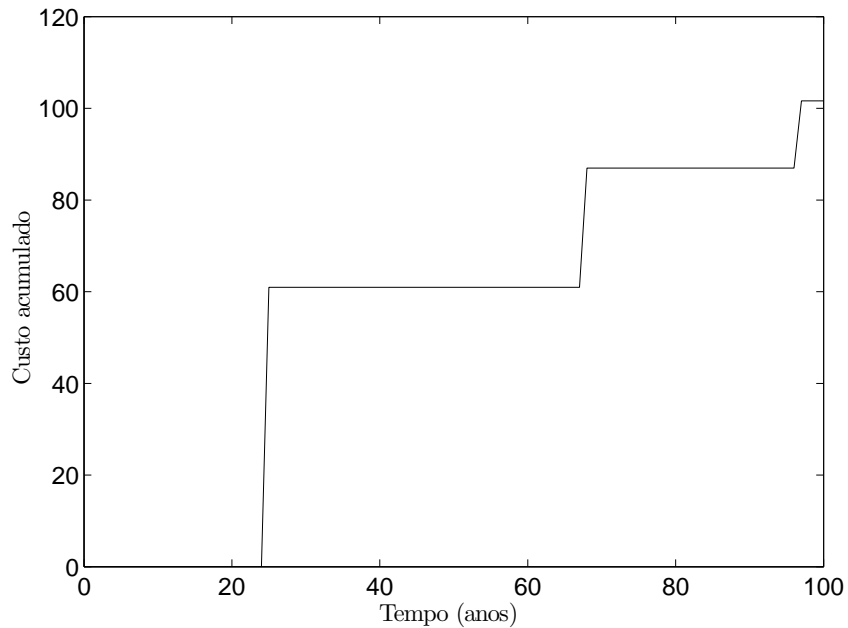


Figura 5.2: Custo actualizado acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação

Aplicando a estratégia de reabilitação para 50000 amostras, é possível calcular custo acumulado médio em cada ano, ao longo do ciclo de vida, e a média e desvio padrão do índice de condição.

Como se pode observar na figura 5.3, o custo médio é próximo de zero nos primeiros quatro anos, devido à baixa probabilidade de ser necessária uma reabilitação nesses anos. Uma vez passada esta fase inicial, o custo aumenta ao longo do tempo, sendo que, a partir do ano 40, aproximadamente, esse aumento é cada vez menos pronunciado. O crescimento do custo mais lento a partir do ano 40 acontece devido ao menor custo de uma intervenção, considerando a actualização, quanto mais tarde esta for realizada.

Como seria de esperar, o índice de condição médio, apresentada na figura 5.4, considerando a estratégia de reabilitação, é sempre mais baixo que o índice de condição médio, quando não considerada qualquer reabilitação. A partir do ano

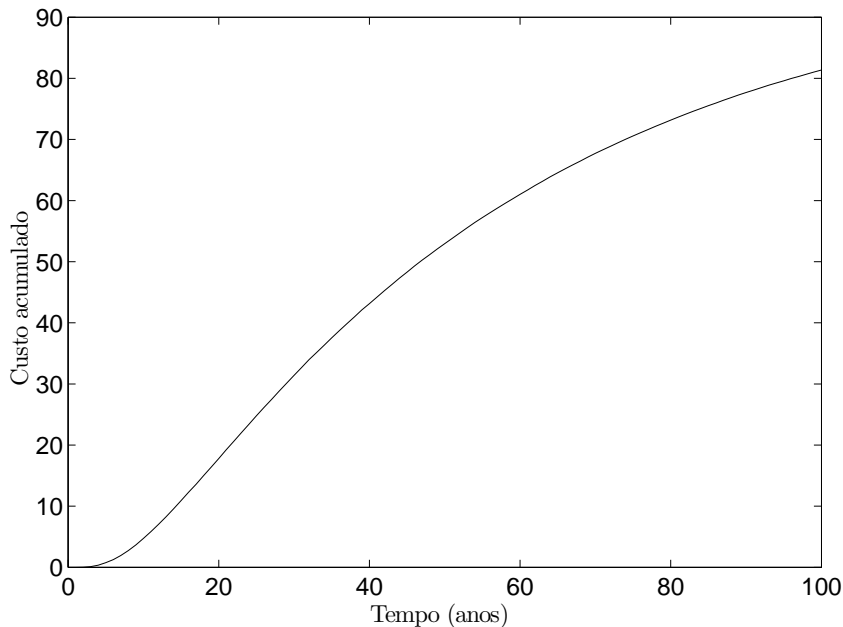


Figura 5.3: Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação

30, aproximadamente, é atingido o equilíbrio, e a condição média estabiliza entre os valores 2.43 e 2.45. Mantendo o índice de condição média num valor baixo, é possível garantir um nível de serviço aceitável em todo o inventário de pontes.

O desvio padrão do índice de condição, apresentado na figura 5.5, apresenta uma evolução bastante semelhante para os dois casos, até ao ano 5, aproximadamente. A partir do ano 5, o desvio padrão do índice de condição considerando reabilitação toma valores inferiores ao desvio padrão sem reabilitação. Este valor mais baixo quando é considerada a estratégia reabilitação deve-se ao menor número de estados possíveis para o índice de condição, quando são realizadas reabilitações, como se pode observar na figura 5.4. Quando é considerada reabilitação, os estados possíveis para o índice de condição são apenas $C = 1$, $C = 2$ e $C = 3$, enquanto sem reabilitações, cada ponte pode assumir qualquer um dos cinco índices de condição possíveis. A partir do ano 79, o desvio padrão do índice de condição, não considerando reabilitações, passa a ser inferior ao desvio padrão com reabilitação. Uma vez que não são realizadas reabilitações, ocorre a acumulação de amostras no índice de condição $C = 5$, enquanto, com reabilitações, as pontes distribuem-se pelas condições referidas anteriormente, $C = 1$, $C = 2$ e $C = 3$, mantendo o desvio padrão em valores aproximadamente constantes.

De forma a calcular uma previsão mais precisa do custo com uma ponte

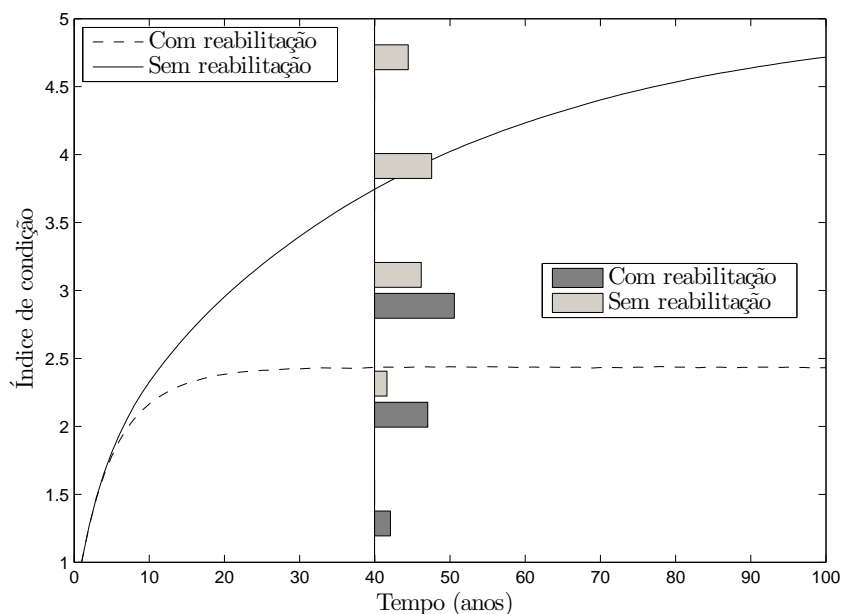


Figura 5.4: Índice de condição médio e respectiva distribuição de probabilidades no ano 40, com e sem considerar uma estratégia de reabilitação

específica, é usada a actualização Bayesiana. Para tal, no ano da inspecção, é calculada a actualização Bayesiana, tal como apresentado em 4.2.4. O custo médio resultante é calculado como uma média ponderada, usando como peso de ponderação a função de verosimilhança. Inicialmente é considerada uma inspecção no ano 30, com resultado $C_{insp} = 2$ e calculada a respectiva média e desvio padrão do custo.

Uma vez que o valor esperado para o índice de condição, no ano 30 é 3.4, uma ponte que, nesse ano, apresente uma condição $C_{insp} = 2$, terá uma degradação do desempenho mais lenta que a média, e, por consequência, menores necessidades de reabilitação e menores custos, como se pode observar na figura 5.6. O desvio padrão, apresentado na figura 5.7, apresenta uma evolução semelhante para ambos os casos, sendo mais baixo no caso em que é considerada a inspecção. Uma vez que a inspecção revela que a ponte tem uma degradação de desempenho mais lenta que o previsto inicialmente, o custo acumulado será também menor, o que implica um desvio padrão menor.

5.2.2 Influência do ano de inspecção no custo

De modo a analisar como o ano de inspecção influencia o custo ao longo do ciclo de vida de uma ponte, foi calculado o custo actualizado, considerando

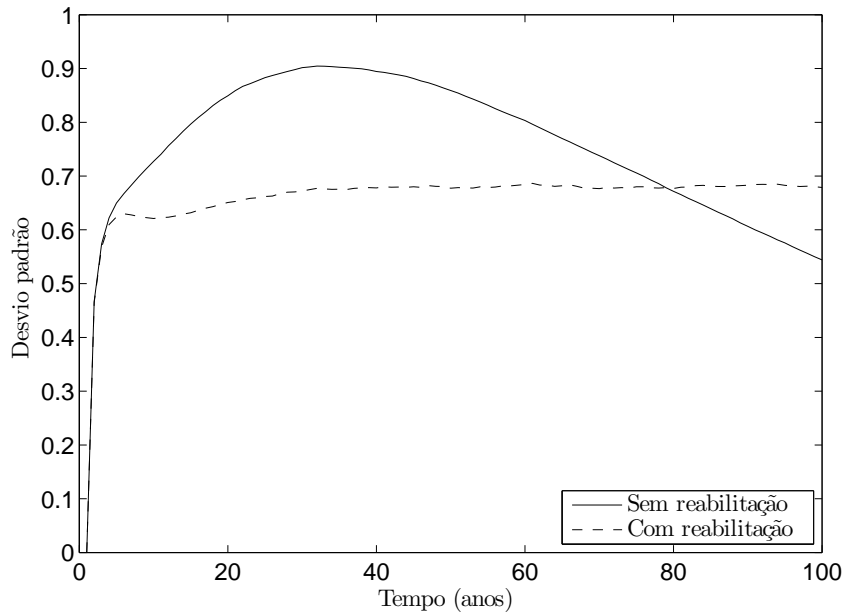


Figura 5.5: Desvio padrão do índice de condição, com e sem considerar uma estratégia de reabilitação

inspecções realizadas nos anos 10, 30 e 50. Para cada ano foi calculado o custo actualizado e o respectivo desvio padrão, para vários resultados da inspecção: $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$, e comparado com o custo e desvio padrão iniciais, apresentado na figura 5.2.1.

O custo acumulado médio e o respectivo desvio padrão, considerando uma inspecção no ano 10 são apresentados nas figuras 5.8 e 5.9. Sendo o valor esperado para o índice de condição médio, no ano 10, 2.32, uma ponte que, nesse ano, apresenta um resultado $C_{insp} = 2$ tem uma degradação mais lenta que a média, e, por consequência, um custo acumulado mais baixo que o custo acumulado sem considerar a inspecção. Caso o resultado da inspecção seja $C_{insp} = 3$, o custo será mais alto, uma vez que a ponte, uma degradação do desempenho mais rápida que a média. Para o caso em que o resultado da inspecção é $C_{insp} = 4$, a degradação será ainda mais rápida, e portanto, o custo acumulado será mais alto que qualquer um dos outros casos. O desvio padrão é menor nos casos em que a degradação do desempenho é mais lenta que o previsto inicialmente e maior quando esta é mais rápida, reflectindo o valor do custo acumulado.

O custo acumulado médio e o respectivo desvio padrão, considerando uma

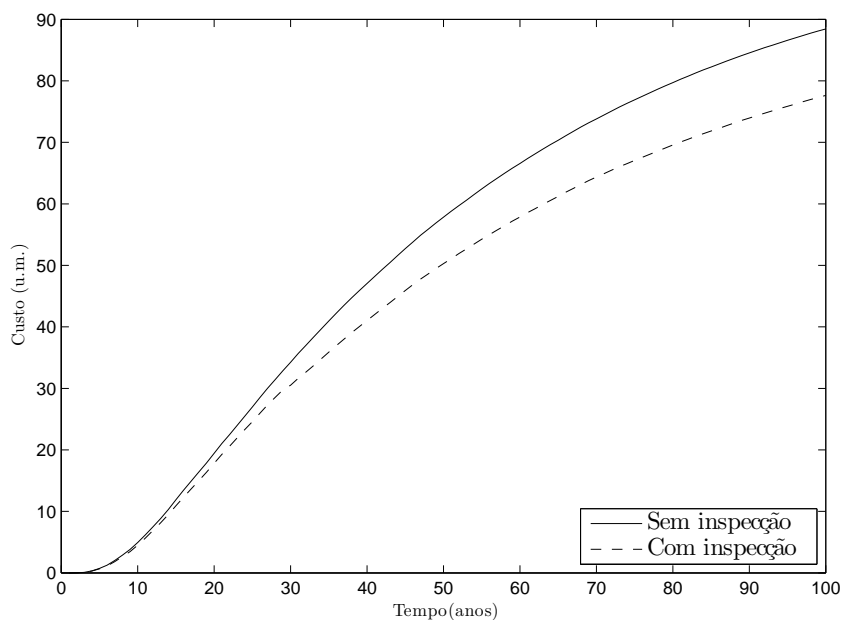


Figura 5.6: Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 30, com resultado $C_{insp} = 2$

inspeção no ano 30 são apresentados nas figuras 5.10 e 5.11. Uma vez que o valor esperado para o índice de condição, no ano 30, é 3.4, uma ponte que, nesse ano, apresente uma inspeção com resultado $C_{insp} = 3$ terá uma degradação ligeiramente mais lenta que o esperado, como se pode observar no gráfico. A diferença entre a previsão e o resultado da inspeção não é suficiente para ter um impacto significativo no custo actualizado. No caso em que $C_{insp} = 2$, a ponte terá uma degradação consideravelmente mais lenta que o esperado, tendo, por isso, menores custos ao longo do ciclo de vida que a média, como se pode observar. No caso em que $C_{insp} = 4$, a ponte terá uma degradação mais rápida que a média, uma vez que apresenta, no ano da inspeção, uma condição superior à prevista. Neste último caso observa-se um aumento súbito no custo no ano 30, uma vez que as amostras com maior peso no custo acumulado actualizado serão as que, no ano da inspeção, apresentem uma condição igual ao resultado da inspeção. O desvio padrão, quando são consideradas inspeções é sempre inferior ao caso em que estas não são consideradas. Este valor mais baixo para o desvio padrão deve-se aos custos mais baixos, quando a inspeção mostra que a degradação é mais lenta que o esperado, e à menor incerteza na previsão actualizada.

O custo acumulado médio e o respectivo desvio padrão, considerando uma

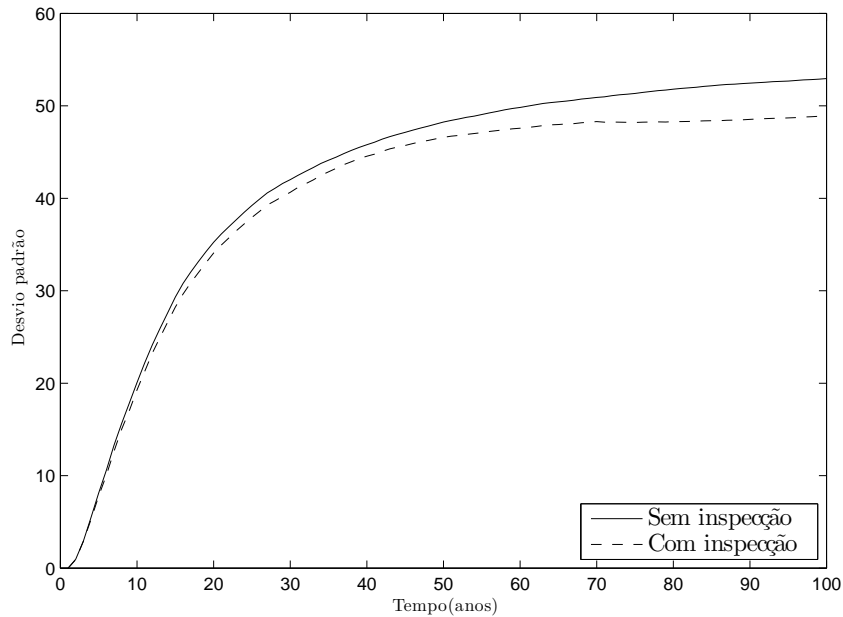


Figura 5.7: Desvio padrão do custo acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 30, com resultado $C_{insp} = 2$

inspeção no ano 50 são apresentados nas figuras 5.12 e 5.13. O valor esperado para o índice de condição, no ano 50, é 4.02. Observa-se que o custo, considerando inspeções, é sempre menor que quando estas não são consideradas. Nos casos em que a condição observada na inspeção é $C_{insp} = 2$ e $C_{insp} = 3$, a degradação é mais lenta que o esperado, o que implica menores custos. No caso em que o resultado da inspeção é $C_{insp} = 4$, apesar de confirmar o resultado da inspeção, o custo é menor. Uma vez que as amostras com maior peso na previsão actualizada serão as que apresentem, no ano da inspeção, índice de condição $C = 4$, será dado menos peso às que apresentem um índice de condição $C = 5$, diminuindo assim o desvio padrão. Uma vez que é dado menor peso às amostras que se encontram na condição $C = 5$, o custo actualizado é menor. O desvio padrão do índice de condição, para os três casos em que é considerada inspeção, é sempre menor que no caso em que esta não é considerada. Estes valores mais baixos para o desvio padrão devem-se ao menor desvio padrão do índice de condição actualizado.

5.3 Conclusões

Neste capítulo foi estudado o efeito das intervenções de reabilitação ao longo do ciclo de vida das estruturas. Foi desenvolvida uma estratégia de reabilitação,

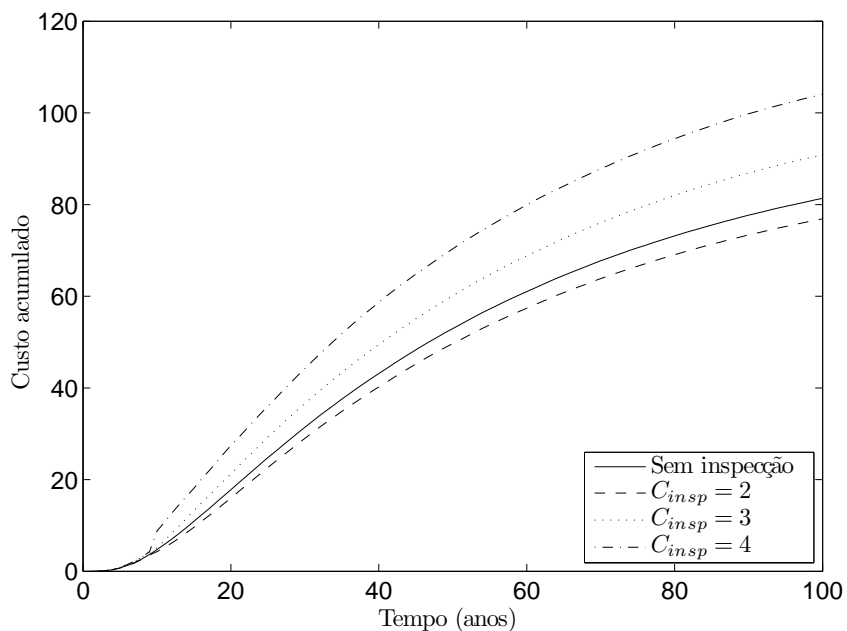


Figura 5.8: Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 10, para diferentes resultados possíveis da inspeção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$

consistindo em realizar uma reabilitação quando a estrutura atinge um nível de desempenho inaceitável. Com base nesta estratégia foi analisada a influência do resultado da inspeção e do ano em que é realizada na previsão do desempenho e do custo ao longo do ciclo de vida. Concluiu-se que, ao realizar uma inspeção, caso esta revele que a degradação do desempenho é mais rápida que o esperado, o custo acumulado ao longo do ciclo de vida será maior. Caso a inspeção revele que o desempenho é mais lento que o esperado, o custo acumulado será menor. Observa-se ainda que, em grande parte dos casos, a realização de inspeções reduz substancialmente a incerteza na previsão de custos, ao longo do ciclo de vida.

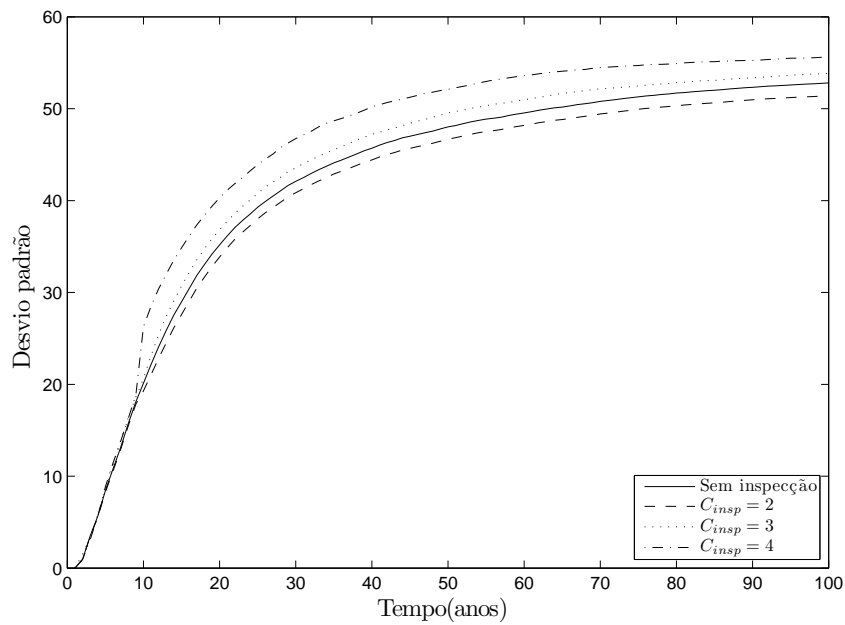


Figura 5.9: Desvio padrão do custo acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 10, para diferentes resultados possíveis da inspeção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$

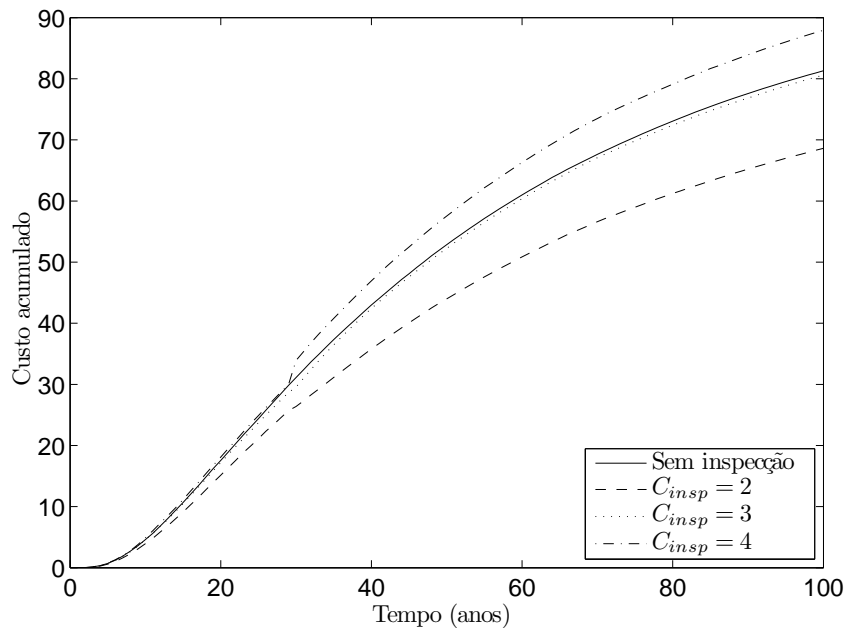


Figura 5.10: Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 30, para diferentes resultados possíveis da inspeção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$

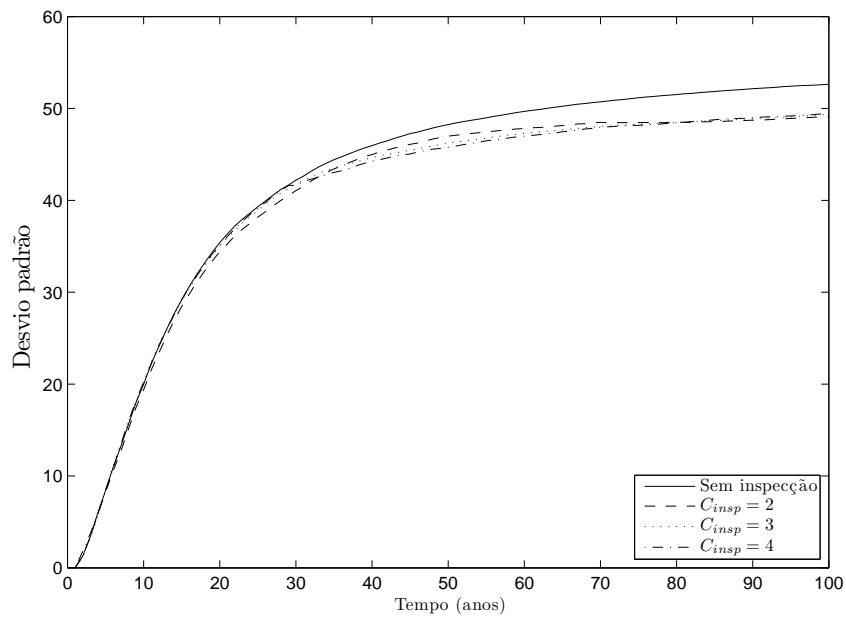


Figura 5.11: Desvio padrão do custo acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 30, para diferentes resultados possíveis da inspeção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$

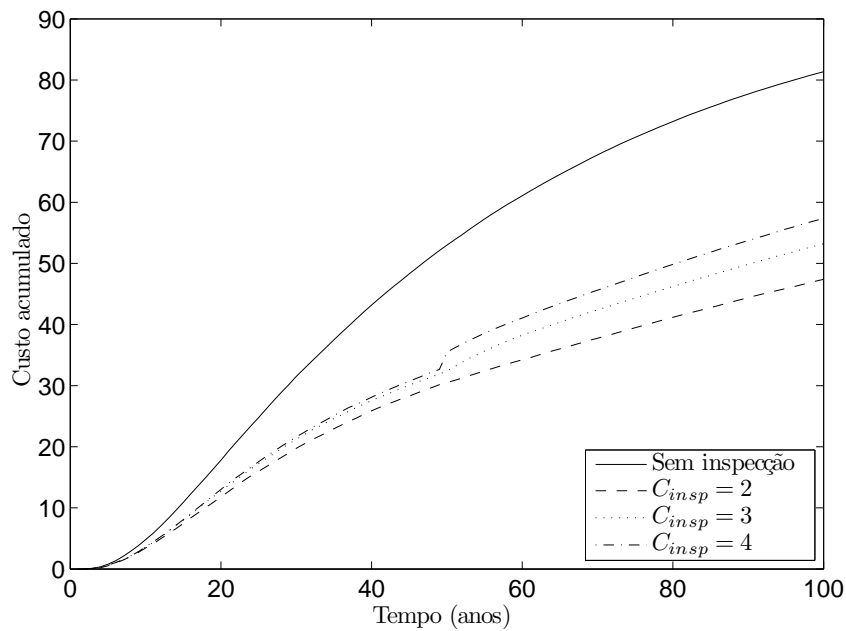


Figura 5.12: Custo acumulado médio, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 50, para diferentes resultados possíveis da inspeção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$

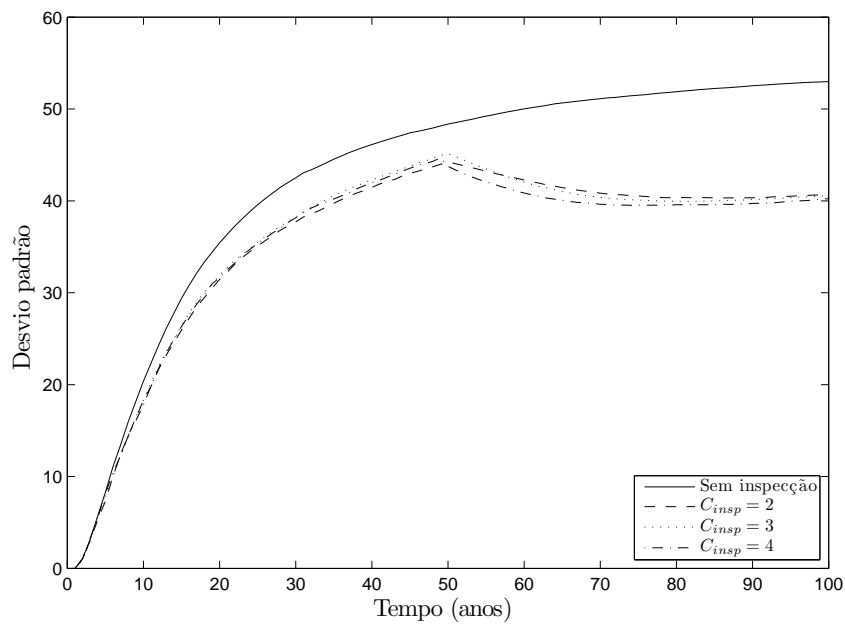


Figura 5.13: Desvio padrão do custo acumulado, considerando uma estratégia de reabilitação, com e sem considerar uma inspeção, no ano 50, para diferentes resultados possíveis da inspeção $C_{insp} = 2$, $C_{insp} = 3$ e $C_{insp} = 4$

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

Neste trabalho foram analisados vários modelos de degradação de desempenho existentes, sendo o modelo baseado em processos de Markov estudado com maior profundidade. Este modelo baseado em processos de Markov usa informação histórica de inspecções para calcular a degradação do desempenho, sendo a qualidade e quantidade desta informação histórica essenciais para garantir a eficácia da previsão.

De seguida foi desenvolvido um modelo de actualização, com o objectivo de obter uma previsão da degradação do desempenho de uma ponte específica. Este modelo é baseado em actualização Bayesiana, um método que permite conjugar a informação dada pelo modelo de degradação com a informação obtida a partir de inspecções realizadas na ponte em causa. A previsão actualizada é influenciada essencialmente por dois aspectos: a incerteza associada ao modelo de degradação e ao modelo de actualização. Cada uma destas variáveis representa a confiança que se pode ser dada ao respectivo modelo.

Um modelo de previsão, considerando ou não a informação resultante de inspecção, foi implementado usando simulação de Monte Carlo, permitindo analisar as suas propriedades estatísticas, nomeadamente média e desvio padrão.

Este modelo foi aplicado a um conjunto de pontes descrito por [19]. Inicialmente foi definida uma previsão de desempenho. Assumindo uma matriz de intensidade

e da condição inicial, foi calculado o índice de condição ao longo do ciclo de vida de uma ponte. Em seguida, assumindo informação relativa a uma inspecção, foi calculada a previsão actualizada com base na informação à priori. Posteriormente foi realizado um estudo paramétrico, de forma a analisar como as variáveis de cada um dos modelos influenciam a previsão considerando inspecções. As variáveis analisadas foram a incerteza associada aos modelos de degradação e de actualização e o número de inspecções.

De modo a modelar a incerteza na previsão do desempenho e na inspecção foram usados os desvio padrões associados ao modelo de degradação e ao modelo de actualização, respectivamente. Concluiu-se que a incerteza associada a cada um dos modelos representa a confiança dada a cada uma das componentes. Tendo um modelo de degradação construído com base em informação histórica fiável e em quantidade suficiente, pode-se dar a esta componente um maior peso na previsão actualizada. Para tal, é usado um menor valor de desvio padrão associado ao modelo de degradação. Por outro lado, caso as inspecções cujo resultado é usado no modelo de actualização tenham sido realizadas por um inspector experiente, o desvio padrão associado ao modelo de degradação pode ter um valor menor.

De modo a analisar a influência do número de inspecções foram assumidos três casos: uma, duas e três inspecções. Concluiu-se que, quanto maior o número de inspecções, menor o desvio padrão da previsão actualizada, atingindo valores mínimos nos anos em que são realizadas as inspecções, melhorando a eficácia da previsão actualizada. Um maior numero de inspecções permite também obter um valor mais fiável para a probabilidade de a ponte em causa necessitar de reabilitação.

Por último foi analisado o efeito das intervenções de reabilitação durante o ciclo de vida das estruturas, assim como o impacte da realização de inspecções na previsão do desempenho de estruturas sujeitas a acções de manutenção. Inicialmente foram descritas as intervenções de manutenção preventiva e de reabilitação. Posteriormente, foi desenvolvida uma estratégia de reabilitação, que consistiu em realizar uma intervenção de reabilitação quando a ponte estudada atingisse um nível de desempenho inaceitável. Com base nesta estratégia foi analisada a influência do ano de inspecção e do respectivo resultado na previsão do desempenho e do custo ao longo do ciclo de vida. Concluiu-se que, quando é realizada uma inspecção, caso o resultado seja melhor que o valor esperado, a degradação do desempenho dessa ponte é mais lenta que a média, o que implica

um custo mais baixo que o previsto inicialmente. Caso o resultado da inspeção seja pior que o valor esperado, a degradação da ponte é mais rápida que o esperado, o que implica um custo mais elevado que o previsto inicialmente, ao longo do ciclo de vida. Em grande parte dos casos observou-se que a realização de inspeções reduz substancialmente a incerteza na previsão de custos ao longo do ciclo de vida.

6.2 Desenvolvimentos futuros

A área de investigação onde se insere este trabalho é ainda jovem, existindo uma enorme necessidade de maiores desenvolvimentos. Ao longo deste trabalho que alguns desenvolvimentos são fundamentais para melhorar a gestão das infra-estruturas existentes. Entre esses destacam-se:

- Utilização de processos de Markov de grau superior a 1. Com processos de Markov de grau 2 e superior, o cálculo da degradação do desempenho seria baseado não só o estado anterior, mas também a sequência de eventos que o antecederam. Poder-se-ia assim obter uma previsão mais fiável e realista. No entanto, um modelo de degradação deste tipo, para além da maior complexidade, necessitaria de informação histórica mais detalhada que a necessária para processos de Markov de grau 1.
- Utilização de processos de Markov, em que a função de transição depende do tempo. Em processo de Markov deste tipo, a função de transição depende do tempo que passou desde a última transição, permitindo assim representar de forma mais realista a degradação do desempenho da estrutura.
- Aplicar os resultados obtidos nesta dissertação a sistemas de gestão de pavimentos, condutas hidráulicas ou outras estruturas.

Capítulo 7

Código

```

function [media_inicial,std_ini,media_actu,std_actu,hist_inicial,hist_act]
=plop2

n=50000; % numero de amostras
frac_desv_q=0.3; % desvio padrao do modelo de degradacao
num_anos=200; % numero de anos
matriz_q=[0.3;0.08;0.05;0.03]; % coeficientes da matriz de intensidade
ano_inspeccao=15; % ano da inspeccao
media_inspeccao=2; % resultado da inspeccao
desvio_inspeccao=.5; % desvio padrao da funcao de verosimilhanca

% gerar matrizes q amostrais
desv_q=frac_desv_q*matriz_q;
q_hipoteses=zeros(4,n);
for i=1:1:4

    media=matriz_q(i);
    desvio=desv_q(i);

    miu_q = log(media)-.5*log(1+desvio^2/media^2);
    sigma_q =sqrt( log(1+(desvio^2/media^2)));

    % matriz com Q amostral
    q_hipoteses(i,:)=random('lognormal', miu_q,sigma_q,[1,n]);

end;

% verificar se houve algum erro ao gerar a matriz q_hipoteses
if(isreal(q_hipoteses)==0)
    disp('----- Erro na matriz q_hipoteses -----')
end;

C = zeros(n,num_anos);

% distribuição de probabilidades para a condicao no ano inicial
prob_inicial=[1 0 0 0 0];

% dist. de prob. acumulada para a condicao no ano inicial
prob_inicial_ac=zeros(1,5);
for i=1:1:5
    prob_inicial_ac(i)=sum(prob_inicial(1:i));
end;

% numeros aleatorios para gerar a condicao no ano inicial
aleat_c_inicial=rand(1,n);

% numeros aleatorios uniformes, entre 0 e 1, para calcular a condicao ao
% longo do tempo
aleatorios=rand(n,num_anos);

for i=1:n

```

Figura 7.1:

```

if (round(i/500) == i/500)
    fprintf('%d ... ',i);
end

% ler os componentes da matriz Q a usar para esta amostra
q=q_hipoteses(:,i);

% compor a matriz Q
matq=zeros(5,5);
matq(1,1)=-q(1);
matq(1,2)=q(1);
matq(2,2)=-q(2);
matq(2,3)=q(2);
matq(3,3)=-q(3);
matq(3,4)=q(3);
matq(4,4)=-q(4);
matq(4,5)=q(4);

% calcular a matriz P
p=expm(matq*1);

% calcular a condicao inicial
if(aleat_c_inicial(i)<prob_inicial_ac(1))
    C(i,1) = 1;
elseif(aleat_c_inicial(i)<prob_inicial_ac(2))
    C(i,1) = 2;
elseif(aleat_c_inicial(i)<prob_inicial_ac(3))
    C(i,1) = 3;
elseif(aleat_c_inicial(i)<prob_inicial_ac(4))
    C(i,1) = 4;
else
    C(i,1) = 5;
end;

% calcular a condicao dos restantes anos
for j=2:num_anos

    condicao_inicial = C(i,j-1);
    alea = aleatorios(i,j);

    vector_transicao =[p(condicao_inicial,1) 0 0 0 0];

    for k = 2:5
        vector_transicao(k) = vector_transicao(k-1)+p(condicao_inicial,
k) ;
    end
    encontrado = 0;
    for k = 1:4
        if and(alea < vector_transicao(k), encontrado == 0)
            C(i,j)=k;

```

Figura 7.2:

```

                encontrado = 1;
            end
        end
        if encontrado == 0
            C(i,j) = 5;
        end
    end
end

% calcular a media e desvio padrao, sem considerar inspecoes
media_inicial = mean(C);
std_ini = std(C);

% calcular a funcao de verosimilhanca, a partir da condicao prevista no ano
% da inspecao, para cada amostra
weight=zeros(1,n);
for i=1:n
    weight(i) = cdf('norm',C(i,ano_inspeccao)+.5,media_inspecao,√
desvio_inspecao)-cdf('norm',C(i,ano_inspeccao)-.5,media_inspecao,√
desvio_inspecao);
end

% calcular a media e desvio padrao, considerando inspecoes
soma_actu = zeros(1,num_anos);
soma_q_actu = zeros(1,num_anos);

for i = 1:n
    soma_actu = soma_actu + C(i,1:num_anos)*weight(i);
    soma_q_actu = soma_q_actu + C(i,1:num_anos).*C(i,1:num_anos)*weight(i);
end

media_actu = soma_actu/sum(weight);
std_actu = sqrt(soma_q_actu/sum(weight) - media_actu.^2);

% Calcular a probabilidade associada a cada indice de condicao, nao
% atualizado
hist_inicial=zeros(5,num_anos);
for ano=1:1:num_anos
    for i=1:1:5
        hist_inicial(i,ano)=histc(C(:,ano),i);
    end;
end;

for ano=1:1:num_anos
    hist_inicial(:,ano)=hist_inicial(:,ano)/sum(hist_inicial(:,ano));
end;

% grafico com a probabilidade associada a cada indice de condicao, nao
% atualizado
cl=plot(1:num_anos,hist_inicial(1,:), 'r');
hold on

```

Figura 7.3:

```

c2=plot(1:num_anos,hist_inicial(2,:), 'g');
c3=plot(1:num_anos,hist_inicial(3,:), 'b');
c4=plot(1:num_anos,hist_inicial(4,:), 'c');
c5=plot(1:num_anos,hist_inicial(5,:), 'm');

%Calcular a probabilidade associada a cada indice de condicao, atualiza
hist_act=zeros(5,num_anos);
for ano=1:1:num_anos
    for j=1:1:n
        for cond=1:1:5
            if(C(j,ano)==cond)
                hist_act(cond,ano)=hist_act(cond,ano)+weight(j);
            end;
        end;
    end;
end;

for ano=1:1:num_anos
    hist_act(:,ano)=hist_act(:,ano)/sum(hist_act(:,ano));
end;

%grafico com a probabilidade associada a cada indice de condicao,
%atualizado
figure
c1=plot(1:num_anos,hist_act(1,:), 'r--');
hold on
c2=plot(1:num_anos,hist_act(2,:), 'g--');
c3=plot(1:num_anos,hist_act(3,:), 'b--');
c4=plot(1:num_anos,hist_act(4,:), 'c--');
c5=plot(1:num_anos,hist_act(5,:), 'm--');

% grafico da media do indice de condicao, inicial e atualizado
figure
plot(30,media_inspecao, 'ko', 'MarkerSize', 9, 'LineWidth', 2)
ylim([1,5])
hold on
plot(1:num_anos,media_actu(1,:), 'k');
plot(1:num_anos,media_inicial(1,:), 'k');

%grafico do desvio padrao do indice de condicao, inicial e atualizado
figure
plot(1:num_anos,std_actu(1,:), 'k');
ylim([0 1.1])
hold on
plot(1:num_anos,std_ini(1,:), 'k');

```

Figura 7.4:

Bibliografia

- [1] M.J. Ryall. *Bridge management*. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [2] L.C. Neves. *Life-Cycle analysis of bridges considering condition, safety, and maintenance cost interaction*. PhD thesis, Universidade do Minho, 2005.
- [3] L.C. Neves. Gestão de pontes ao longo da sua vida útil. *Engenharia e Vida*, pages 54–58, Maio 2008.
- [4] A G Lichtenstein. The silver bridge collapse recounted. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, pages 249–261, Novembro 1993.
- [5] Hatem Elbehairy. *Bridge Management System with Integrated Life Cycle Cost Optimization*. PhD thesis, University of Waterloo, May 2007.
- [6] Cullington D.W. Daly A.F. Vassie P.R. Hardt P. Kashner R. Astudillo R. Velando C. Godart B. Cremona C. Mahut B. Raharinaivo A. Lau Markey I. Bevc L. e Perus I. Woodward, R.J. Deliverable d14: Final report. Technical report, Brime Project (Bridge Management in Europe), 2001.
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Guidelines for bridge management systems*. Washington, D.C., 1992.
- [8] U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. State transportation agencies and pontis, May 2012. "<http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/bmcs707.cfm>".
- [9] Paul D. Thompson, Edgar P. Small, Michael Johnson, and Allen R. Marshall. The pontis bridge management system. *Structural Engineering International*, 8(4), 1998.
- [10] Lounis Z. Morcous, G. and S. M. Mirza. "life-cycle assessment of highway bridges". In C. H. Loh and M. S. Cheung, editors, *Proceedings of the Taiwan - Canada Workshop on Bridges*, pages 61–82, Taipei, Taywan, Abril 2002. National Center of Research on Earthquake Engineering.

- [11] Philbin T. Fraher M. Romack G.P. Small, E.P. The current status of bridge management system implementation in the united states. In *Eighth Transportation Research Board Conference on Bridge Management*, 1999.
- [12] M. Veijola M. K. Soderqvist. Finnish project level bridge management system. *Structural Engineering International*, 8(4), Novembro 1998.
- [13] T. P. Mendonça. *Betão estrutural*, chapter Sistema de gestão de um parque de obras de arte. LNEC, Lisboa, 2002.
- [14] R. Kelley. *PONTIS Bridge Inspection Manual*, 2007.
- [15] L. C. Neves and Frangopol. Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges. *Reliability Engineering and System Safety*, 89:185–198, 2005.
- [16] D. M. Frangopol and L. C. Neves. Life-cycle maintenance of structures by condition, reliability and cost oriented probabilistic optimization. *Innovation In Computational Structures Technology*, pages 95–110, 2006.
- [17] Sandra Saraiva. Análise probabilística do desempenho de pontes existentes. Master's thesis, Universidade Nova de Lisboa, Janeiro 2009.
- [18] G. Morcous. Performance prediction of bridge deck systems using markov chains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(2), 2006.
- [19] F. Sobreiro. Modelos de previsão de deterioração de pontes existentes: Processos de markov. Master's thesis, Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [20] C. Jackson. *Multi-state modelling with R: the msm package*. Medical Research Council Biostatistics Unit., 2007.
- [21] J.F. Kalbfleisch, J.D. e Lawless. The analysis of panel data under a markov assumption. *Journal of the American Statistical Association*, 80(392):863–871, 1985.
- [22] J. Kallen, M. e Van Noortwijk. Statistical inference for markov deterioration models of bridge conditions in the netherlands. In *Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, 2006.
- [23] A.T. Bharucha-Reid. *Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications*. Dover books on mathematics. Dover Publications, 2010.
- [24] Wai-Ki Ching and Michael K. Ng. *Markov Chains*. Springer Science Business Media, 2006.

- [25] L.C. Neves and D.M. Frangopol. Life-cycle performance of structures: combining expert judgment and results of inspection. In *Life-Cycle in Civil Engineering*, Varenna, Itália, Junho 2008.
- [26] Luís A. C. Neves, Dan M. Frangopol, and Aruz Petcherdchoo. Probabilistic lifetime-oriented multiobjective optimization of bridge maintenance: Combination of maintenance types. *Journal of Structural Engineering*, 132(11):1821–1834, 2006.
- [27] Taehoon Hong and Makarand Hastak. Memrres: model for evaluating maintenance, repair and rehabilitation strategies in concrete bridge decks. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 22(4):233–248, 2005.