Análise de Risco e Avaliação de Estratégias de Prolongamento da Vida Útil de Condutas de Grande Diâmetro

Carlos André Lima Brito

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Júri

Presidente: Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira
Orientador: Professor Doutor António Jorge Silva Guerreiro Monteiro
Vogal: Engenheiro Francisco Isidro Fialho Serranito

Outubro 2013

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi possível graças à disponibilidade, colaboração e compreensão por parte de algumas pessoas. Quero expressar o meu agradecimento a todas elas.

Em particular ao professor António Jorge Monteiro, orientador científico desta dissertação, pelas suas ideias enriquecedoras, disponibilidade e apoio que sempre prestou em todas as fases da dissertação, desde a pesquisa bibliográfica às conclusões finais.

À EPAL, em especial ao Engenheiro Nuno Reis e toda a restante equipa da Direcção de Gestão de Activos-unidade de inspecções, pelo interesse e disponibilidade demonstrados tanto para o fornecimento de dados como para a partilha de experiências e conhecimentos.

Finalmente quero agradecer aos meus pais por me terem apoiado sempre ao longo da realização da presente dissertação, bem como ao longo de todo o meu percurso académico.

A todos, muito obrigado.

Resumo

A manutenção de um nível de serviço de qualidade prestado às populações é uma preocupação e prioridade das entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água.

O diagnóstico do estado de funcionamento de condutas de grande diâmetro e a modelação da respectiva deterioração ao longo do tempo constitui um desafio e uma necessidade que se coloca às entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água com o objectivo de definir as medidas a adoptar para prolongar a respectiva vida útil. A informação sobre o estado de conservação de condutas de grande diâmetro não é fácil de obter dado os elevados custos de inspecção e a reticência das próprias entidades gestoras à colocação das mesmas fora de serviço, já que raramente dispõem de redundância suficiente que permita a manutenção do abastecimento. Assim, a informação é em geral escassa e é neste ambiente que a gestão do risco da falha do adutor requer o desenvolvimento de modelos de deterioração com capacidade de previsão do estado de condição deste importante activo e a respectiva possibilidade de falha.

Elaborou-se neste trabalho uma metodologia de classificação do estado de condição das condutas e recorreu-se a cadeias de Markov para modelação da deterioração sofrida pelas mesmas, avaliando-se por fim várias estratégias de manutenção.

Como caso de estudo, a metodologia foi aplicada ao adutor de Castelo do Bode, cujos registos de inspecções foram fornecidos pela EPAL.

Por fim foi feita a análise de risco das instalações, considerando cada uma das estratégias de manutenção propostas, bem como a análise financeira dessas mesmas estratégias.

Este é um tema promissor, permitindo optimizar as estratégias de intervenção nos sistemas.

Palavras chave: Inspecção e diagnóstico de condutas de abastecimento de água de grande diâmetro; modelo de Markov em cadeia; Gestão de Activos; Análise de Risco; Prolongamento da vida útil de condutas de abastecimento de água.

Abstract

The condition rating and the deterioration modeling of large-diameter buried pipes is a challenging undertaking, because low rates of failure and high costs of inspection result in a severe scarcity of necessary data. The failure risk of these pipes must be evaluated and managed because failure of such pipes can be disastrous. Water utilities are generally very resistant to taking these pipes out of service for inspection because transmission systems often have no built-in redundancy to accommodate the loss of service.

This document was conducted to identify and characterize the state of art for structural condition assessment of water mains.

Statistical models can be an important tool to the utilities, contributing to a surgical planning of inspections and intervention.

Among the statistical models, the Markov chain model can be particularly useful for the management of the facilities in the study because their peculiarities allow obtaining a forecast of the development of condition state, based on only the state of a given condition instant.

To apply the probabilistic model in question is necessary to have a pre-classification system and allocation condition states of large diameter pipes, which system was also been developed in this document.

As a case study is applied a Markov model to records of inspections to pipelines operated by EPAL. The study aims at the development and analysis of strategies for maintenance and life extension of pipelines.

This investigation theme is considered promising, providing a strong base for develops a financial model, which applied with the degradation model, may be capable to providing an integrated approach for optimizing intervention strategies in water mains.

Key words: Condition assessment of large water mains; Markovian chain model; risk analysis; Lifetime extension of pipelines for water supply.

Índice

1.Introdução 1

1.1.Relevância do tema 1

1.2.Objectivos 2

1.3.Estrutura da dissertação 3

2.Diagnóstico das condutas de grande diâmetro 5

2.1.Considerações gerais 5

2.2.Materiais usados em condutas 5

2.3.Causas e tipos de roturas 7

2.3.1.Considerações gerais 7

2.3.2.Causas de roturas 7

2.3.3.Tipos de roturas 9

2.3.4.Tipos de roturas mais comuns por tubagem 11

2.4.Técnicas de Inspecção e diagnóstico 11

2.4.1.Introdução 11

2.4.2.Detecção e localização de condutas 14

2.4.3.Detecção de fugas 14

2.4.4.Avaliação estrutural de condutas 14

2.4.5.Aplicabilidade das técnicas de inspecção e diagnóstico 15

2.5.Técnicas de Reabilitação 15

2.5.1.Descrição geral 15

2.5.2.Classificação das técnicas de reabilitação de condutas 16

2.5.3.Selecção da técnica de reabilitação a utilizar 19

3.Modelos de avaliação do risco de rotura 24

3.1.Considerações iniciais 24

3.2.Modelos estatísticos usados na modelação do processo de deterioração de infraestruturas 24

3.2.1.Considerações Iniciais 24

3.2.2. Ciclo de vida de uma tubagem enterrada 25

3.2.3.Modelos estatísticos 26

3.3. Modelos mecânicos/físicos usados para modelar o processo de deterioração de infra-estruturas 33

3.4. Software de suporte à decisão 34

3.4.1.Introdução 34
3.4.2.CARE-W-Computer Aided Rehabilitation of Water Networks 34
3.4.3.KANEW 35
3.4.4. Pipeline Asset and Risk Management System (PARMS) 35
3.4.5. Water Main Rehabilitation Planner(WARP) 36
3.4.6.WilCO 36
3.5. Modelo de Markov 37
3.5.1.Considerações gerais 37
3.5.2.Processos estocásticos 37
3.5.3.Propriedade Markoviana 38
3.5.4.Cadeias de Markov em tempo contínuo 38
3.5.5.Probabilidades estacionárias (Steady-State Probabilities) 39
3.5.6.Classificação de estados em cadeias de Markov 40
3.5.7.Intensidade de transição 41
3.5.8.Diagrama de transições 42
3.5.9.Função probabilidade de transição em tempo contínuo 42
4.Atribuição do estado de condição à conduta em função das Inspecções 46
4.1.Considerações gerais 46
4.2.Metodologias existentes 46
4.2.1. Técnica de avaliação difusa 46
4.2.2.Protocolos de atribuição de pontuação para colectores de águas residuais 48
4.3.Metodologia proposta 51
5.Caso de Estudo 58
5.1.Sistema de Abastecimento de Água da EPAL 58
5.2.Sistema de Distribuição 59
5.3.Sistema de Adução 60
5.3.1.Considerações gerais 60
5.3.2.Adutor de Castelo do Bode 60
5.4.Procedimentos operacionais de inspecção 62
5.5.Análise dos resultados das inspecções e atribuição de estados 63
5.5.1.Modelo em vigor 63
5.5.2.Análise Efectuada 64
5.6.Previsão de estados futuros 66
5.6.1.Processo de Markov em tempo contínuo 66
5.6.2.Modelo de deterioração 66
5.6.3.Estimativa da matriz intensidade Q 68
5.6.4.Estimativa do tempo de permanência nos vários estados de condição 70

5.6.5.Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo 71
5.6.6.Aplicação do modelo de deterioração a um conjunto de condutas 75
5.6.7.Análise dos Resultados 83
5.7.Considerações sobre prioridades de intervenção 86
5.7.1.Consequências das roturas 86
5.7.2.Risco associado à ocorrência de roturas 87
5.8.Estratégias de prolongamento da vida útil 90
5.8.1.Cenários de manutenção 91
5.8.2.Comparação económica entre cenários de manutenção 91
5.8.3.Contribuição e quantificação do risco na tomada de decisão 104
6.Conclusões e Desenvolvimentos Futuros 111
6.1.Conclusões 111
6.2.Desenvolvimentos Futuros 113
7.Referências Bibliográficas 116
ANEXOS i
Anexo I-Técnicas de Inspecção e Diagnóstico III
Anexo II-Técnicas de Reabilitação IV
Anexo III-Atribuição de pontuações às anomalias V
ANEXO IV-Probabilidades de transição de estado XIV

Índice de figuras

Figura 1-Conduta de betão com alma de aço (Fonte: www.hinduhosting.com) 6
Figura 2-Rotura em tubagem (Fonte: Michael DeMocker, The Times-Picayune archive) 7
Figura 3-Reparação com argamassa do tipo Vandex Plug (Fonte: EPAL) 16
Figura 4- Bathtube Curve (Fonte:Kleiner e Rajani,2001) 25
Figura 5-Desenvolvimento de N(t) 28
Figura 6-Diagrama de transições 42
Figura 7-Relação entre modelo de classificação proposto e metodologia EPAL 53
Figura 8-linha de tendência para modelos de avaliação 54
Figura 9- Aqueduto das Águas Livres 58
Figura 10-Rede de distribuição de água, por zona altimétrica, na cidade de Lisboa (Fonte:EPAL) 59
Figura 11- Disposição da rede de adução por diâmetro das tubagens 60
Figura 12--Disposição do Adutor do Castelo do Bode por diâmetro das tubagens 60
Figura 13- Disposição do Adutor de Castelo do Bode por materiais 61
Figura 14-Sistema de adução da EPAL (Fonte:EPAL) 62
Figura 15-Inspecção Técnica Visual (Fonte:EPAL) 63
Figura 16- Distribuição dos trechos pelos estados de condição 66
Figura 17- Matriz de intensidade 70
Figura 18- Tempo de permanência esperado 71
Figura 19- Evolução de Pij para estado de condição inicial 1 73
Figura 20- Evolução de Pij para estado de condição inicial 2 73
Figura 21- Evolução de Pij para estado de condição inicial 3 74
Figura 22- Evolução de Pij para estado de condição inicial 4 74
Figura 23- Evolução de Pij para estado de condição inicial 5 75
Figura 24--Evolução do estado de condição médio do Túnel do Bode 79
Figura 25- Evolução do estado de condição médio do troço V16B-Túnel da Azambuja 79
Figura 26- Evolução do estado de condição médio do troço V11V12-Santarém montante 80
Figura 27- Evolução do estado de condição médio do troço V13B-V14 80
Figura 28- Evolução do estado de condição médio do túnel de Malpique 81
Figura 29- Evolução do estado de condição médio do troço V7-V8 81
Figura 30- Evolução do estado de condição médio do troço P71-V17 82
Figura 31-Evolução do estado de condição médio da totalidade dos troços analisados 82
Figura 32- Distribuição dos trechos pelos estados de condição da totalidade dos troços analisados . 83
Figura 33-Conduta de Abastecimento (Fonte:Redecor) 84

Figura 34- Fases do ciclo de vida das tubagens analisadas 85
Figura 35-- Matriz de Risco-Grau de Risco (Fonte: Proteção Civil) 88
Figura 36-- Probabilidade de pelo menos um trecho se encontrar no estado 5 89
Figura 37-- Interceção da vida útil recomendada com a probabilidade de transição do estado 1 para o estado 5 90
Figura 38-Custo actualizado da totalidade das substituições futuras 94
Figura 39-Evolução do número de trechos no estado 5 99
Figura 40-Evolução do número de trechos no estado 5 101
Figura 41-VAL considerando t.a=4% 102
Figura 42- VAL considerando t.a=6% 102
Figura 43- VAL considerando t.a=8% 103
Figura 44-VAL considerando intervalos entre substituições de 20 anos 103
Figura 45-Pior estado de condição global admissível 106
Figura 46-Melhor estado de condição global possível 106
Figura 47- Relação benefício/custo-intervalo entre intervenções com periódicas de 10 anos em 10 anos 110
Figura 48- Relação benefício/custo-intervalo entre intervenções periódicas de 20 em 20 anos 110

Índice de Quadros

Quadro 1-Materiais usados no fabrico de condutas 5
Quadro 2- Factores que contribuem para a deterioração de condutas 8
Quadro 3-Tipos de roturas 9
Quadro 4- Tipos de roturas mais comuns por diâmetro e material 11
Quadro 5- Classificação das técnicas de reabilitação de condutas de adução e distribuição de água 17
Quadro 6- Tipificação de problemas em condutas, requisitos para melhoria de desempenho e potenciais técnicas de reabilitação. 21
Quadro 7-Modelos determinísticos exponenciais 28
Quadro 8- Modelos determinísticos lineares 29
Quadro 9- Modelos probabilísticos de múltiplas variáveis 30
Quadro 10- Modelos probabilísticos com um único grupo de variáveis 31
Quadro 11-Modelos físicos 33
Quadro 12- Indicadores de desgaste e respectiva pontuação 50
Quadro 13- Comparação entre os dois protocolos 50
Quadro 14-Estados de condição 52
Quadro 15- Intervalos de pontuação relativos aos cinco estados de condição 54
Quadro 16- Características dos troços utilizados na calibração da atribuição de pontuações 55
Quadro 17- Comparação das classificações atribuídas 56
Quadro 18- Definição dos estados de condição 64
Quadro 19-Troços usados na construção da matriz de intensidade 68
Quadro 20-Nº de transições de estado registadas 69
Quadro 21- Somatório dos intervalos de tempo entre observações, cujo estado inicial é i (anos) 70
Quadro 22- Distribuição inicial dos trechos do Túnel do Bode pelos estados de condição 76
Quadro 23- Probabilidades de transição do estado de condição inicial 1 76
Quadro 24- Probabilidades de transição do estado de condição inicial 2 76
Quadro 25- Probabilidades de transição do estado de condição inicial 3 76
Quadro 26- Probabilidades de transição do estado de condição inicial 4 77
Quadro 27-Estado de condição do Túnel do Bode no ano 10 77
Quadro 28- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do Túnel do Bode 78

Quadro 29- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço entre V16B e o Túnel da Azambuja 79
Quadro 30— Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço entre V11V12-Santarém-montante 79
Quadro 31- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço entre V13B-V14 80
Quadro 32- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do Túnel de Malpique 80
Quadro 33- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço V7-V8 81
Quadro 34- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço P71-V17 81
Quadro 35- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição da totalidade dos troços analisados 82
Quadro 36- Definição do estado de condição 5 88
Quadro 37- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição 89
Quadro 38-Custo actualizado das substituições a realizar 94
Quadro 39- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 10 anos [cenário 0] 96
Quadro 40- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 10 anos [cenário 1] 96
Quadro 41- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 10 anos [cenário 2] 98
Quadro 42- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 10 anos [cenário 3] 98
Quadro 43- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 20 anos [cenário 1] 100
Quadro 44- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 20 anos [cenário 2] 100
Quadro 45- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 20 anos [cenário 3] 101
Quadro 46-Risco actualizado do pior estado de condição global admissível 107
Quadro 47-Risco actualizado, considerando intervalos entre intervenções de 10 anos 107
Quadro 48-Risco actualizado , considerando intervalos entre intervenções de 20 anos 107
Quadro 49-Ordem decrescente do risco actualizado respectivo aos cenários de manutenção 108
Quadro 50-Factor de segurança dos cenários de manutenção em estudo-Intervalo entre intervenções de 10 anos 109

Quadro 51-Factor de segurança dos cenários de manutenção em estudo- Intervalo entre intervenções de 20 anos 109
Quadro 52-Relação benefício/custo-intervalo entre intervenções com periódicas de 10 anos em 10 anos 109
Quadro 53-Relação benefício/custo-intervalo entre intervenções periódicas de 20 em 20 anos 110

Índice de Quadros em Anexo

Quadro A 1- Síntese das técnicas de Inspecção e Diagnóstico III
Quadro A 2- Síntese das principais características das técnicas de reabilitação de condutas IV
Quadro A 3-Pontuações atribuídas às anomalias V
Quadro A 4-Ficha de registo de anomalias X
Quadro A 5-Ficha de inspecção principal-Condutas XI
Quadro A 6-Probabilidades de transição do estado 1 XIV
Quadro A 7- Probabilidades de transição do estado 2 XV
Quadro A 8- Probabilidades de transição do estado 3 XVII
Quadro A 9- Probabilidades de transição do estado 4 XIX

1.Introdução

1.1.Relevância do tema

O facto de o solo /subsolo estar cada vez mais ocupado pelas mais diversas infraestruturas, a necessidade de gerir da melhor forma os recursos financeiros assim como a exigência de uma maior qualidade do serviço por parte das populações em relação às entidades gestoras de sistemas de saneamento e de distribuição de água, faz com que estas sintam a necessidade de possuir ferramentas que contribuam para uma gestão optimizada dos seus activos.

Nos sistemas de abastecimento de água, as condutas, por se tratarem de estruturas enterradas, tendem a ser negligenciadas, tendo-se apostado durante muitos anos em acções de reparação/renovação reactivas. Este paradigma tem vindo a ser mudado, estando as entidades gestoras um pouco por todo o mundo a apostar na realização de intervenções preventivas.

Dada a relevância dos sistemas de adução e distribuição de água para as sociedades actuais e sendo as condutas parte fundamental dos mesmos, pretende-se elaborar neste documento sistemas de avaliação e previsão do desempenho de condutas de grande diâmetro bem como estratégias de prolongamento da respectiva vida útil.

Geralmente, a importância estratégica das condutas é tanto maior quanto maior o seu diâmetro, sendo também mais graves as consequências de uma eventual rotura.

Directamente relacionada com a importância dos activos citados está a dificuldade em inspeccioná-los, dado ser necessário por vezes a colocação dos mesmos fora de serviço, para além de alguns dos procedimentos envolvidos serem bastante onerosos.

Surge então a necessidade de recorrer a outras metodologias, podendo os modelos estatísticos ser uma importante ferramenta ao dispor das entidades gestoras, contribuindo para um planeamento cirúrgico das acções de inspecção e intervenção.

Os modelos estatísticos tanto podem recorrer ao histórico das instalações como às características das mesmas de modo a identificar padrões de ocorrência de roturas. Os modelos formulados são classificados como determinísticos ou probabilísticos. Num processo determinístico, o estado de condição dos activos desenvolve-se de acordo com uma função. Um modelo probabilístico prevê estados de condição futuros segundo uma distribuição de probabilidades.

A ocorrência de roturas é um fenómeno pouco vulgar em condutas de grandes diâmetros, contrariamente ao que sucede em tubagens de pequenos diâmetros, onde pode ser tolerável que estas ocorram com maior frequência. Embora ocorram em número reduzido, as roturas registadas no primeiro grupo de condutas supra citadas originam graves consequências. A possibilidade de utilizar modelos estatísticos com o intuito de prever

a deterioração de condutas de grande diâmetro, de modo a promover uma eficiente gestão dos mesmos não poderá ter como base a análise da ocorrência de roturas, dada a sua ocorrência ser esporádica, mas sim a análise do seu estado de condição.

1.2.Objectivos

As condutas de abastecimento de água de grande diâmetro são estruturas dispendiosas e de vital importância para as populações, originando um eventual colapso das mesmas sérias consequências, podendo estas ser classificadas em: directas, indirectas e sociais.

São consequências directas os custos de reparação, a água perdida e os danos a terceiros provocados pela rotura; consequências indirectas as que ponham em causa, por exemplo, a capacidade de combate a incêndios e consequências sociais as que afectem, entre outras, as actividades comerciais.

Dada a relevância das estruturas em estudo, surge a necessidade de promover uma eficiente gestão destes activos, evitando assim todos os efeitos inerentes ao seu incorrecto funcionamento, pretendendo-se neste documento desenvolver e analisar estratégias de manutenção e prolongamento da vida útil de condutas, analisando as mesmas economicamente bem como avaliar a redução de risco com que as instalações funcionarão caso estas estratégias sejam aplicadas.

O diagnóstico do estado de funcionamento de condutas de grande diâmetro enterradas e a modelação da respectiva deterioração ao longo do tempo, constitui um desafio e uma necessidade que se coloca às entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água com o objectivo de definir as medidas a adoptar para prolongar a respectiva vida útil.

Tendo em consideração os factos já apresentados, explora-se neste documento as características de um modelo probabilístico em particular, cujo nome se associa ao seu autor, o matemático russo Andrei Markov.

De entre os modelos estatísticos existentes, o modelo de Markov em cadeia pode ser especialmente útil para a gestão das instalações em estudo, uma vez que as suas particularidades permitem obter uma previsão do desenvolvimento do estado de condição das instalações, tendo como base apenas o estado de condição num determinado instante.

Recorrendo a essa mesma previsão é ainda possível efectuar uma análise de risco da instalação ao longo da janela temporal pretendida, bem como obter o valor actualizado líquido dos custos respectivos às acções de manutenção a realizar.

Como caso de estudo aplica-se o modelo desenvolvido por Markov aos registos das inspecções efectuadas às condutas exploradas pela EPAL, tendo o estudo a realizar como finalidade o desenvolvimento de estratégias de manutenção e prolongamento da vida útil das mesmas.

Para aplicação do modelo probabilístico em questão é necessário dispor previamente de um sistema de classificação e atribuição de estados de condição a condutas de grande diâmetro, sistema esse que também foi desenvolvido neste documento.

Este sistema tem como objectivo atribuir um estado de condição numérico às instalações, com base no registo de inspecções respectivo.

Em suma, este documento tem como principais objectivos os seguintes aspectos:

- Proceder ao levantamento do estado da arte de técnicas de inspecção e diagnóstico de condutas;
- Levantamento dos modelos estatísticos aplicáveis ao processo de deterioração de activos;
- Levantamento das técnicas de reabilitação existentes;
- Desenvolvimento de um sistema de transição de resultados de inspecções para estados de condição;
- Aplicação de um modelo de deterioração baseado em cadeias de Markov a uma base de dados fornecida pela EPAL;
- Elaboração de estratégias de manutenção e prolongamento da vida útil de condutas de grande diâmetro, analisando o risco às quais a instalação fica sujeita caso se aplique cada uma das estratégias analisadas, bem como efectuar uma análise económica das mesmas;
- Elaboração de recomendações e proposta de metodologia para a futura aplicação dos modelos desenvolvidos;

1.3.Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos e 4 Anexos.

O presente capítulo é de caracter introdutório, servindo apenas para transmitir a relevância do tema bem como os objectivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo seguinte clarifica-se o que se considera ser condutas de grande diâmetro e enumera-se os vários materiais utilizados no fabrico das mesmas. Enumera-se também os tipos de roturas mais comuns, referindo-se as suas principais causas bem como o tipo de tubagens onde é mais frequente a sua ocorrência.

Apresenta-se ainda uma breve descrição das técnicas de inspecção e diagnóstico, bem como das técnicas de reabilitação existentes. Aborda-se a sua aplicabilidade e os critérios a ter em conta no processo de selecção da técnica a utilizar.

No terceiro capítulo são enumerados os modelos de avaliação do risco de rotura, tanto estatísticos/empíricos como mecânicos / físicos. É dado maior enfase aos do primeiro grupo, visto que o modelo usado no caso de estudo é pertencente ao mesmo. Faz-se ainda uma breve descrição dos softwares de suporte à decisão existentes, finalizando-se o capítulo com uma detalhada descrição do modelo de Markov.

No capítulo 4 pretende-se descrever algumas das metodologias existentes que permitem a atribuição de um estado de condição às condutas, em função das inspecções efectuadas. Este é um processo que envolve alguma subjectividade, não existindo uma metodologia normalizada. Desta forma, serão apresentadas e

criticadas duas das mais consistentes metodologias existentes. Por fim será proposta uma metodologia que se pretende que seja aplicável aos registos elaborados aquando das inspecções realizadas pela EPAL.

No quinto capítulo faz-se uma breve descrição do sistema de distribuição e adução da EPAL bem como dos procedimentos operacionais de inspecção. É analisado e criticado o modelo de análise de resultados das inspecções em vigor na EPAL. Aplica-se ainda às condutas inspeccionadas pela EPAL a metodologia para atribuição de um estado de condição, proposta no capítulo 4. Posteriormente é feita a previsão da sua deterioração com base no modelo de Markov. São feitas considerações relativas às prioridades de intervenção, focando o risco de ocorrência de roturas. São finalmente analisadas e comparadas estratégias propostas de prolongamento da vida útil, relacionando os seus custos com o nível de serviço prestado.

No sexto e último capítulo é feita uma apreciação crítica dos resultados obtidos, sendo também apresentadas recomendações futuras para aplicação dos modelos desenvolvidos.

2.Diagnóstico das condutas de grande diâmetro

2.1.Considerações gerais

De referir que a generalidade dos autores considera grandes diâmetros os superiores a 500mm. No entanto , para os técnicos da EPAL responsáveis pelas inspecções de condutas, são considerados grandes diâmetros os superiores a 1800mm. Estes têm a dimensão mínima aceitável para que se realizem Inspecções Técnicas Visuais (ITV) com entrada humana. Relativamente a condutas com diâmetros inferiores a 1800 mm, a EPAL não possui um registo de inspecções considerável, sendo o existente resultante de inspecções esporádicas realizadas com o objectivo de aferir o estado de condição de troços específicos.

2.2.Materiais usados em condutas

A título introdutório, faz-se referência aos principais materiais utilizados para o fabrico de condutas, assim como um breve enquadramento histórico relativo à sua utilização. De salientar que nem todos os materiais são de utilização frequente em grandes diâmetros, nomeadamente PEAD e PVC.

Quadro 1-Materiais usados no fabrico de condutas

Material	Descrição
Fibrocimento	A técnica de fabrico de fibrocimento na Europa desenvolveu-se no final do século XIX , tendo sido aproveitado para o fabrico de condutas(Young e Trott,1984). Podem ser revestidas exteriormente por uma camada de base betuminosa, epoxídica ou por uma manga de polietileno, evitando assim ataques químicos. Internamente é frequente utilizar revestimento de epoxídica juntamente com revestimento de PVC, podendo também as condutas ser revestidas com tintas específicas.
Betão	Em meados do século XX, surgiram várias técnicas que permitiram um melhoramento na colocação do betão em moldes. Desta forma foi possível criar condutas com uma qualidade e resistência elevadas, tornando-se assim o betão um bom material para condutas (Young e Trott,1984). Actualmente é frequente a utilização de condutas de betão com estrias pré esforçadas.
Betão com alma de Aço	É constituído por um cilindro de aço revestido interior e exteriormente com betão. O revestimento exterior é de betão armado, enquanto o interior é argamassa ou betão ligeiramente armado.
Aço	O fabrico de condutas em aço teve um forte ascendente durante a segunda metade do século XIX, tendo-se aproveitado o grande aumento na produção do mesmo material, registando-se alguns problemas durante a fase de operação. Mais tarde este problema ficou resolvido, tendo-se desenvolvido novos processos de soldadura (Young e Trott,1984).
Ferro fundido	Surgiram no século XIX em Inglaterra. Estas são susceptíveis a ataques químicos, podendo estes causar perfurações nas paredes das mesmas. Estas condutas podem ser revestidas exteriormente por uma solução de zinco com camada de acabamento de tinta epóxi, enquanto pelo lado interior é frequente aplicar um revestimento de cimento aluminoso centrifugado (Young e Trott,1984).

	Condutas em ferro fundido têm boa resistência mecânica a pressões internas, têm boa impermeabilidade a gases e óleos, tendo ainda uma longevidade relativamente alargada. O elevado peso do material é uma desvantagem a assinalar.
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	A indústria termoplástica teve uma expansão nas décadas de 1950 e 1960, tendo surgido então a possibilidade de produção massificada de PEAD. Este material permite um bom comportamento relativamente ao golpe de aríete e suporta pressões de serviço elevadas.
Policloreto de vinilo (PVC)	Trata-se de um material termoplástico sólido, sendo possível produzir condutas deste material dentro de uma vasta gama de diâmetros e espessuras de paredes (Young e Trott,1984). São condutas de peso reduzido e apresentam preços competitivos, sendo no entanto sensíveis no que diz respeito à exposição solar e apresentam elevado risco de ovalização.

Figura 1-Conduta de betão com alma de aço (Fonte: www.hinduhosting.com)

2.3.Causas e tipos de roturas

2.3.1.Considerações gerais

Uma vez que a ocorrência de roturas pode causar enormes constrangimentos, é importante conhecer as várias causas e formas como estas podem ocorrer.

Nesta parte do documento será inicialmente feita referencia às principais causas de roturas, passando-se posteriormente à descrição dos vários tipos de roturas registados, sendo feita por fim a associação entre o tipo de roturas e o tipo de material e diâmetro das tubagens onde estas ocorrem.

2.3.2.Causas de roturas

A deterioração das condutas, bem como o tipo ou forma de roturas a que pode dar origem está dependente de vários factores, podendo estes ser colocados em três grandes grupos:

- Aspectos físicos dos elementos do sistema;
- Factores ambientais e da envolvente;
- Factores relacionados com o funcionamento/operação do sistema;

No Quadro 2 apresentam-se os diferentes factores agregados em cada um dos três grandes grupos supracitados.

Uma vez que múltiplos destes factores actuam conjuntamente sobre as tubagens, a previsão do desempenho das mesmas com base nestes torna-se um processo algo complexo e muito susceptivel a imprecisões.

Figura 2-Rotura em tubagem (Fonte: Michael DeMocker, The Times-Picayune archive)

Quadro 2- Factores que contribuem para a deterioração de condutas

Grupo	Factores	Breve descrição
Componente Física do sistema	Material da tubagem	Diferentes materiais originam diferentes falhas
	Espessura da parede	A corrosão penetra mais rapidamente em paredes mais finas
	Idade da tubagem	Os efeitos da degradação aumentam com a idade
	Época de instalação	Tubagens instaladas em determinadas alturas podem ser mais vulneráveis à ocorrência de falhas
	Diâmetro	Pequenos diâmetros são mais susceptiveis
	Tipo de juntas	Determinado tipo de juntas são mais susceptíveis
	Revestimento/forro	Os elementos revestidos são menos vulneráveis
	Diferentes metais	São susceptíveis a corrosão por galvanização
	Instalação da tubagem	Más práticas de instalação tornam a tubagem vulnerável futuramente
	Fabrico da tubagem	Defeitos de fabrico tornam a tubagem vulnerável
Envolvente	Camada de assentamento	Camada imprópria pode originar falhas prematuras
	Tipo de solo	Solos podem ser corrosivos, sofrer alterações volumétricas devido à humidade originando assim tensões nefastas na tubagem.
	Água de percolação	A água pode ser agressiva para certos materiais
	Clima	O clima contribui para a criação de gelo e humidade existente no solo
	Localização da tubagem	A taxa de corrosão pode aumentar devido à migração de sal usado nas estradas
	Perturbações	Perturbações na vizinhança da tubagem podem criar sérios danos à tubagem
	Correntes eléctricas "perdidas"	Induz corrosão electrolítica
	Actividade sísmica	Induz tensões nas tubagens que podem levar ao colapso
Operacional	Pressão interna/transitórios	Alterações na pressão interna são negativas para a tubagem
	Fugas	Causam erosão no leito de assentamento
	Qualidade da água	Alguma água é agressiva e promove a corrosão
	Velocidade de escoamento	A erosão da tubagem aumenta com o aumento da velocidade
	Práticas de manutenção	Podem comprometer a esperança de vida útil da instalação

2.3.3.Tipos de roturas

O tipo de roturas mais provável de surgir numa conduta depende do material e do diâmetro das tubagens. Apresenta-se no Quadro 3 uma listagem das roturas/falhas mais comuns e uma breve descrição das suas causas. Por fim associa-se cada uma das falhas/roturas referenciadas com o tipo de material e diâmetro das tubagens nas quais é mais comum registar a sua ocorrência.

No quadro seguinte a classificação dos tipos de roturas/falhas mais comuns e as respectivas causas de acordo com (Deterioration and Inspection of Water Distribution Systems Issue,2003):

Quadro 3-Tipos de roturas

Tipo de rotura	Causas	Ilustração
Circunferencial	Este tipo de rotura é causado por tensões de flexão induzidas pela contracção devido à acção térmica, formação de gelo no solo bem como pela tensão longitudinal criada na proximidade de válvulas	
Longitudinal	Pode ser causada por tensões devidas a vários factores, tais como: pressão exercida pela água a nível interno; cargas exercidas pelo solo; congelamento da água; cargas devidas ao tráfego bem como a assentamentos.	
Longitudinal de junta	O principal fenómeno que contribui para que ocorra este tipo de rotura é a expansão dos materiais existentes nas juntas. Caso seja usado um material para a selagem da junta diferente do utilizado na restante tubagem este fenómeno tende a acontecer	
Corte de junta	As tubagens de grande diâmetro geralmente têm um momento de inercia muito elevado para que nelas ocorram roturas circunferenciais, pelo que é frequente ocorrerem roturas do tipo corte de junta.	

Espiral	Inicialmente é uma rotura circunferencial que posteriormente se propaga ao longo do comprimento da tubagem em forma de espiral**.** A ocorrência deste tipo de roturas é associada a variações da pressão interna.	
Pontos de corrosão	Um ponto de corrosão reduz a espessura e consequentemente resistência mecânica da tubagem. A partir de um certo estado, a pressão interna provoca o aparecimento de orifícios. Para além deste factor, podem contribuir ainda para o desenvolvimento deste tipo de anomalias fenómenos relativos ao próprio material, tal como falhas de fundição.	
Rotura com destacamento	Este tipo de roturas ocorre devido à pressão exercida internamente pela água. No caso das tubagens de betão pré esforçado, a corrosão e posterior quebra das estrias de pré-esforço, providencia o acontecimento dos mesmos.	

As figuras são adaptadas de Makar,J.M, R.Desnoyers e S.E.McDonald(2001) e Deterioration and Inspection of Water Distribution Systems,(2003).

Constata-se que podem ocorrer roturas de múltiplas formas e devido a motivos vários, tornando a previsão da sua ocorrência um processo bastante complexo e subjectivo.

2.3.4.Tipos de roturas mais comuns por tubagem

Conforme referido anteriormente, o tipo de roturas verificado depende directamente do material e do diâmetro das tubagens. De acordo com (deterioration_and _inspectio_of water_destrbution_system (2003), os tipos de roturas mais frequentes, consoante o material e o diâmetro da tubagem em questão encontram-se no quadro 4.

Quadro 4- Tipos de roturas mais comuns por diâmetro e material

Material/Diâmetro	Pequenos diâmetros (<375mm)	Médios diâmetros (375-500mm)	Grandes diâmetros (>500mm)
Ferro fundido	RC;LJ;PC	RC; LJ;PC;RL;RE	RL;PC; CJ
Ferro fundido dúctil	PC	PC	PC
Betão Armado pré esforçado	Rotura das estrias de pré esforço-D	Rotura das estrias de pré esforço-D	Rotura das estrias de pré esforço-D
Aço	PC	PC	PC
Fibrocimento	RC;RL	RC;RL	RC;RL
PVC	RL	RL	RL
PEAD	Imperfeições ao nível das juntas	Imperfeições ao nível das juntas	Imperfeições ao nível das juntas

Legenda: RC-rotura circunferencial; **R**L-Rotura longitudinal; **LJ**- Longitudinal de junta; **CJ-**Corte de junta ; **RE**-Rotura em Espiral; **PC**- Pontos de corrosão; **D**- destacamento.

2.4.Técnicas de Inspecção e diagnóstico

2.4.1.Introdução

As condutas de abastecimento de água por serem infraestruturas enterradas são de difícil inspecção. Embora em alguns casos seja possível a entrada humana, a inspecção visual nem sempre permite uma avaliação adequada do estado da conduta, uma vez que grande parte dos danos ocorre na superfície exterior (no caso das tubagens metálicas) ou na parte central da parede do tubo (no caso das tubagens de betão armado pré-esforçado).

Esta dificuldade levou a que entidades gestoras recorressem à análise do histórico das roturas e à detecção de fugas para avaliação do estado das condutas. O primeiro dos métodos citados tem aplicabilidade reduzida em condutas de grande diâmetro, uma vez que a tolerância a que ocorram roturas é baixa, o que faz com que seja um fenómeno raro neste tipo de instalações. Contrariamente, nas redes de distribuição de pequeno diâmetro os prejuízos das roturas são significativamente menores, o que torna tolerável o recurso à análise do histórico de roturas. Já a utilização da detecção de fugas para avaliar a deterioração é um processo de que existem exemplos de conduzir a leituras incorrectas. O desenvolvimento tecnológico que se tem registado nas últimas décadas fez com que se desenvolvessem novas técnicas de inspecção de tubagens.

O aparecimento destas novas técnicas permite não só a realização de intervenções preventivas, como um melhor planeamento de investimentos e a realização de acções de reabilitação cirúrgicas. Nesta parte do documento faz-se referência às técnicas existentes, agrupando-as consoante a sua finalidade, sendo feitas também breves considerações sobre as mesmas.

Todos os métodos apresentam vantagens e inconvenientes, nomeadamente no que respeita ao tipo de defeitos que permitem detectar, ao tipo de condutas a que se aplicam (material e diâmetro), ao rendimento da sua execução bem como aos recursos necessários para a sua aplicação.

A escolha do método de inspecção deve iniciar-se sempre por uma clara definição de quais são os objectivos da inspecção, orçamento e prazo disponíveis.

As técnicas e metodologias utilizáveis no processo de inspecção e diagnóstico podem ser agrupadas em três grandes grupos de acções, conforme o objectivo da sua aplicação (Liu et al.,2012):

- Detecção e localização de condutas;
    - Georadar(Ground Penetration Radar,GPR)
    - Termografia de infra-vermelhos
    - Detectores electromagnéticos
    - Detecção acústica

- Detecção de fugas;
    - Detecção acústica de fugas
    - Zonas de Medição e Controlo
    - Modelos baseados em regimes transitórios

- Avaliação estrutural de condutas;
    - Inspecção Visual
    - Métodos Electromagnéticos
    - Técnicas ultra-sónicas
    - Métodos acústicos
    - Métodos de avaliação da corrosão externa (External Corrosion Assesment Tool,ECAT)
    - Métodos emergentes, baseados em múltiplos sensores
    - Técnicas Indirectas (análise das propriedades electroquímicas do solo)

O primeiro grupo refere-se ao conhecimento da localização das condutas, que constitui informação de base incontornável para uma adequada gestão de activos. O segundo grupo (detecção de fugas) pode ser uma análise importante para avaliar problemas de funcionamento existentes que necessitem de resolução e que poderão indiciar a existência de problemas de deterioração das condutas ou contribuir para a sua deterioração a prazo.

O último grupo (avaliação estrutural de condutas) constitui de facto os métodos directos de diagnóstico.

2.4.2.Detecção e localização de condutas

Existe em meio urbano uma enorme densidade de infraestruturas enterradas, sendo elas integrantes da rede de abastecimento de água e da rede de drenagem de águas residuais, linhas de energia e cabos de telecomunicações.

O cadastro destas infraestruturas nem sempre é o mais adequado, estando mesmo incompleto ou desactualizado, sendo que muitas das vezes a informação existente apenas diz respeito à localização em planta, não havendo referência quanto à profundidade. Visto que a selecção do método de reabilitação mais adequado ao troço em estudo depende do conhecimento preciso da posição em planta e perfil longitudinal da conduta, as técnicas de detecção tornam-se ferramentas importantes. Estão disponíveis várias técnicas de detecção não destrutiva para a localização de condutas, incluindo detectores electromagnéticos, sistemas de localização acústica, georadares e termografia de infravermelhos.

Um dos problemas na detecção das condutas deve-se à variedade dos materiais com que estas podem ser feitas.

Deste modo, o tipo de infraestruturas e as condições do local ditam qual o equipamento mais apropriado para a sua detecção.

2.4.3.Detecção de fugas

No processo de detecção de fugas devem-se efectuar no campo e, sempre que possível, algumas acções preliminares:

- Inspeccionar as caixas acessíveis (incluindo ventosas, descargas de fundo, válvulas de seccionamento, hidrantes, etc.) para verificar se existem sinais de fugas em juntas e nos dispositivos de fácil acesso;
- Examinar se as condutas de descarga se encontram adequadamente seccionadas;
- Inspeccionar valas, diques e descargas de recurso em busca de sinais de fuga;
- Verificar todas as instalações de medição do caudal no início, meio e final da conduta (efectuar balanço do caudal em cada adutora);
- Identificar e confirmar todas as derivações e ligações da conduta;

Estas acções constituem um diagnóstico preliminar, sendo que nem sempre conduzem a um exacto diagnóstico do sistema, tornando-se necessário por vezes recorrer a técnicas mais elaboradas. Técnicas como **detecção acústica** e **métodos baseados em regimes transitórios**, são alguns dos meios disponíveis.

2.4.4.Avaliação estrutural de condutas

A inspecção directa de condutas (DN> =1800mm) permite aferir sobre o estado das mesmas com base em inspecções realizadas directamente pelo operador. No entanto, uma grande parte das condutas não tem diâmetro suficiente para que um operador entre no seu interior, sendo necessário nestes casos recorrer a

técnicas alternativas. Técnicas como **CCTV, pesquisas sonar e laser, métodos electromagneticos** entre outros podem ser utilizadas neste processo (Liu et al.,2012).

2.4.5.Aplicabilidade das técnicas de inspecção e diagnóstico

Conforme já foi referido, a aplicabilidade das técnicas de inspecção e diagnóstico está sujeita a diversos factores, entre os quais o tipo de condutas a que se aplicam (material e diâmetro), os recursos necessários para a realização das mesmas bem como a **possibilidade de colocação ou não do troço fora de serviço**. A escolha do método de inspecção a utilizar está ainda intimamente ligada aos objectivos da inspecção, bem como ao orçamento e prazo disponíveis.

Desta maneira, apresenta-se em Anexo I, Quadro A1, a lista das principais técnicas de inspecção e diagnostico, agrupadas consoante o seu espectro de aplicação (Liu et al.,2012).

2.5.Técnicas de Reabilitação

2.5.1.Descrição geral

Existem vários factores que motivam a realização de uma intervenção de reabilitação, tais como anomalias de natureza hidráulica, estrutural, de qualidade da água e de operação. (Alegre e Covas,2010). Uma deficiente condição física dos componentes (eg., degradação dos materiais e existência de fissuras) requer uma intervenção de **reabilitação estrutural** ou eventualmente de substituição. Caso se registem pressões insuficientes na rede, está-se perante uma **anomalia hidráulica,** uma vez que este fenómeno origina uma inadequada capacidade de resposta do sistema face às solicitações a que é exposto.

A qualidade da água pode ser negativamente afectada pela deterioração das tubagens (e.g.,problemas de cor, de turvação), requerendo assim uma intervenção no sentido de melhorar esse aspecto.

Uma reabilitação motivada por **anomalias de operação e manutenção** tem como objectivo aumentar a eficiência ou fiabilidade do sistema (e.g., estabelecimento de redes modulares, zonas de medição e controlo e zonas de gestão de pressões, automatização de controlos, entre outros).

Relativamente a condutas em pressão, existe um conjunto de normas referentes à grande diversidade de técnicas e métodos aplicáveis (e.*g.*, NP EN 12889: 2008, prEN 15885: 2008, ISO/DIS 11295:2008), estando estas técnicas e métodos referenciados também em publicações da especialidade (e.*g.*, Simicevic e Sterling, 2001, Stein, 2001, NRC, 2003, Heijn e Larsen, 2004).
Seguidamente apresentam-se as técnicas de reabilitação mais comuns e posteriormente será abordada a sua aplicabilidade, consoante as anomalias registadas bem como o contexto em que se encontre a tubagem.

2.5.2.Classificação das técnicas de reabilitação de condutas

Existe um vasto leque de técnicas de reabilitação, sendo por isso necessário catalogá-las consoante as melhorias introduzidas bem como quanto ao seu processo de execução.

As intervenções de reabilitação podem ser agrupadas em dois grandes grupos (Alegre e Covas,2010).

- Intervenções **de renovação:** Estas dividem-se em dois grupos consoante garantam ou não a resistência estrutural total ou parcial da conduta a reabilitar, sendo os mesmos apresentados de seguida.
    - Intervenções de renovação **não estrutural (**e.g.,reparação pontual de juntas ou revestimento interior de condutas);
    - Intervenções de renovação **estrutural** (e.g.,técnicas de entubamento);

- Intervenções **de substituição**: Estas também se encontram divididas em dois grupos, consoante envolvam ou não abertura de vala.
    - Métodos **com vala aberta** (e.g.,método convencional ou método não convencional com vala estreita);
    - Métodos **sem vala aberta** (e.g.,entubamento com destruição de tubagem existente, perfuração dirigida, construção de microtúnel);

No Quadro 5 encontra-se esquematizada a classificação adoptada para as técnicas de reabilitação de condutas de sistemas de adução e de distribuição, organizada de acordo com o tipo de intervenção a realizar. A classificação apresentada baseia-se no quadro normativo nacional, europeu e internacional, nomeadamente as normas prEN 15885:2008 e ISO/DIS 11295:2008 para as técnicas de substituição.

Na Figura 3-Reparação com argamassa do tipo Vandex Plug (Fonte: EPAL) encontra-se o exemplo de uma intervenção de renovação não estrutural, onde foram realizadas reparações pontuais no revestimento interior da conduta.

Figura 3-Reparação com argamassa do tipo Vandex Plug (Fonte: EPAL)

Quadro 5- Classificação das técnicas de reabilitação de condutas de adução e distribuição de água

Tipo de intervenção		Família de técnicas	Técnica
Renovação	Renovação não estrutural	Reparação	Reparação generalizada de juntas.
		Revestimento interior	Revestimento interior com argamassa de cimento.
			Revestimento interior com resina epóxi.
	Renovação estrutural	Entubamento simples ou tradicional	Entubamento com tubagem continua.
			Entubamenho com trechos de tubagem.
		Entubamento não tradicional	Entubamento com tubagem ajustada.
			Entubamento com rubagem dobrada
			Entubamento com tubagem deformada
			Entubamento com tubagem curada in situ.
			Inserção por inversao
			Einserção com guincho
			Combinação dos métodos anteriores
			Entubametno com manga adesiva por reversão.
Substituição	Substituição com abertura de vala	Método convencional	Substituição com abertura de vala.
		Método não convencional	Substituição com abertura de vala reduzia.
	Substituição sem abertura de vala	Técnicas não dirigíveis	Rebentamento da conduta existente.
			Esmagamento da conduta existente.
			Corte longitudinal da conduta existente.
			Extracção da conduta existente sem tubo piloto.
			Extracção da conduta existente com tubo piloto.
		Técnicas dirigíveis	Construcção de microtunel/microgaleria sem tubo piloto.
			Construcção de microtunel/microgaleria com tubo piloto.
			Perfuração dirigida.

Posteriormente faz-se uma breve descrição dos tipos de intervenção e das famílias de técnicas referidas no Quadro 5.

As Técnicas de renovação são:

Intervenções que não originam o aumento da capacidade de utilização original.

Técnicas de renovação não estrutural de condutas

Estes tipos de técnicas focam-se na reparação pontual de um conjunto de anomalias localizadas ou revestimento interior de uma conduta existente. Embora reparem pequenas fugas, controlem a corrosão interna da conduta e resolvam alguns problemas relacionados com a qualidade da água, não conferindo resistência estrutural à conduta. Conforme referido, as principais técnicas podem ser divididas em dois grupos (Alegre e Covas,2010):

- Reparação pontual de juntas ou fissuras;
- Revestimento Interior;

Técnicas de renovação estrutural de condutas

Estes métodos consistem na inserção de uma nova conduta no interior da conduta a reabilitar, evitando assim a abertura de vala, conferindo integridade e resistência estrutural total ou parcial à conduta existente. Dentro dos métodos de entubamento destacam-se os seguintes processos (Alegre e Covas,2010):

- Entubamento com **tubagem continua**;
- Entubamento com **trechos de tubagem**;
- Entubamento com **tubagem ajustada**;
- Entubamento com **tubagem curada in situ**;
- Entubamento com **manga adesiva por reversão**;

Síntese das características das condutas de inserção

As tubagens utilizadas no processo de entubamento podem ser classificadas consoante a sua resistência estrutural. Desta forma criaram-se quatro classes, que se encontram seguidamente expostas **(**Alegre e Covas,2010):

- **Classe A:** Caso a conduta inserida tenha por si só capacidade para resistir a todas as solicitações internas, independentemente da tubagem já existente.
- **Classe B:** Está-se perante uma conduta da classe B, quando esta confere apenas resistência estrutural em conjunto com a conduta a reabilitar, e caso tenha rigidez suficiente para não se deformar quando a conduta é despressurizada.
- **Classe C:** Diferencia-se da **classe B** pelo facto de não ter rigidez suficiente para não se deformar quando a conduta é despressurizada.
- **Classe D:** Estamos perante uma conduta desta classe quando o material que a constitui não confere qualquer resistência estrutural, nem mesmo conjuntamente com a tubagem a reabilitar, restringindo-se a sua função a proporcionar revestimento.

As Técnicas de substituição são:

Aquelas em que é feita a construção de um novo componente do sistema, passando este a desempenhar a função do componente desactivado podendo o alinhamento ou a localização original ser mantida ou alterada (Alegre e Covas,2010).

Técnicas de substituição de condutas com abertura de vala

É o método mais antigo e utilizado, quer na construção de condutas novas quer na substituição das já existentes. As dimensões da vala devem respeitar as especificações do projecto, e o exposto na legislação em vigor (Artigos 25º. a 28 º, Decreto Regulamentar nº 23/95 , de 23 Agostos).

Segundo (Selvakumar et al., 2002, Stein,2001) existem dois tipos de métodos para abertura de vala:

- Método **convencional de substituição com abertura de vala;**
- Método **não convencional de substituição com abertura de vala reduzida**;

Técnicas de substituição de condutas sem abertura de vala

Estas técnicas permitem a inserção de uma nova conduta, ao longo, ou na proximidade da conduta existente não sendo para isso necessário executar uma escavação em todo o seu desenvolvimento, bastando apenas abrir poços de acesso. Recorrem a dispositivos que exercem forças aplicadas ao solo ou à conduta existente, de modo contínuo ou intermitente, por percussão ou vibração, a partir de um poço de entrada em direcção a um poço ou ponto de saída. O solo e a conduta são deslocados ou removidos na frente de perfuração (NP EN12889:2008).

Trata-se de técnicas que causam perturbações mínimas na área envolvente.

Encontram-se catalogadas em **dirigíveis e não dirigíveis** conforme exposto na norma (NP EN 12889:2008), existindo ainda subcategorias dentro destes dois grupos conforme se expõe de seguida.

- **Técnicas dirigíveis**: Possuem dispositivos de controlo que garantem um alinhamento exacto da conduta (e.g., sistema laser).
    - Destruição e remoção da conduta existente
        - Construção de microtúnel;
        - Construção de microtúnel com tubo piloto;
        - Perfuração dirigida;

- **Técnicas não dirigíveis**: São utilizadas caso a instalação da tubagem não exija grande exatidão de alinhamento.
    - Destruição da conduta existente
        - Rebentamento da conduta existente;
        - Esmagamento da conduta existente;
        - Corte longitudinal da conduta existente;
    - Extracção da conduta existente
        - Extracção da conduta existente com tubo piloto;
        - Extracção da conduta existente sem tubo piloto;

2.5.3.Selecção da técnica de reabilitação a utilizar

2.5.3.1.Introdução

Dada a grande variedade de técnicas de reabilitação de condutas existente, torna-se necessário definir os parâmetros e os processos que levam à selecção de determinadas técnicas em detrimento das restantes. Segundo (ISO 11925:2008) o processo de selecção compreende os seguintes passos:

- Avaliação das características da conduta existente e das suas anomalias;
- Identificação dos requisitos necessários para atingir o desempenho funcional pretendido;
- Determinação das opções de reabilitação tecnicamente viáveis para o desempenho funcional pretendido;
- Comparação de custos e de vantagens e inconvenientes de cada técnica selecionada;

Seguidamente descreve-se cada uma das quatro etapas referidas.

2.5.3.2.Avaliação das características da conduta existente e das suas anomalias

Consiste em fazer um levantamento das características base da conduta a reabilitar bem como do fluido transportado. Seguidamente apresentam-se os parâmetros cujas características e valores interessa registar:

- Material;
- Classe de pressão;
- Diâmetro;
- Tipos de juntas;
- Tipos de acessórios;
- Características físico-químicas do fluido transportado;
- Tipos e histórico de anomalias observadas;

Após se ter feito o levantamento das características e valores relativos aos parâmetros referidos anteriormente, é necessário proceder à caracterização das condições locais da zona envolvente à conduta a reabilitar, focando os dois aspectos seguintes:

- **Acessibilidade à conduta existente** (e.g.,profundidade, existência ou não de caixas de acesso, entre outros);
- **Restrições físicas ao processo construtivo** (e.g., profundidade do nível freático, distancia entre pontos de acesso, juntas, válvulas, entre outros);

2.5.2.3.Identificação dos requisitos necessários para atingir o desempenho funcional pretendido

O levantamento preciso das anomalias existentes é o primeiro passo a dar numa intervenção de reabilitação, tornando-se necessário definir posteriormente quais as metas de desempenho que se pretende atingir, quais os aspectos a melhorar e deste modo dirigir o processo de reabilitação de forma mais pragmática. Seguidamente apresentam-se os principais tipos de anomalias registadas e os requisitos necessários para a sua melhoria (Alegre Covas,2010).

- **Anomalias de qualidade da água**
    - Necessidade de isolamento da parede da conduta, de modo a que a água não contacte directamente com a parede da mesma;
    - Aumento da velocidade de escoamento, caso se registem tempos de retenção elevados;
- **Anomalias hidráulicas** (e.g., elevavas perdas de carga para diâmetro existente e pressão insuficiente)
    - Limpeza e redução da rugosidade da parede de modo a aumentar a capacidade hidráulica da conduta;
    - Aumento significativo da capacidade hidráulica da conduta relativamente à situação inicial com necessidade de aumento do diâmetro;
- **Anomalias estruturais**
    - Aumento da resistência estrutural da conduta;
    - Selagem de orifícios, fissuras ou juntas abertas;
- **Anomalias de operação e manutenção**
    - Necessidade de aumentar o número de órgãos de manobra e segurança e de medidores;

2.5.2.4.Determinação das opções de reabilitação tecnicamente viáveis para o desempenho funcional pretendido

A selecção do conjunto de técnicas de reabilitação mais adequado para cada situação não é um processo fácil, existindo no entanto diferentes modelos de decisão mais ou menos simplificados (NRC,2003;Grilo,2007). No Quadro 6 apresentam-se alguns problemas tipo e respectivos requisitos e técnicas de reabilitação propostas.

Quadro 6- Tipificação de problemas em condutas, requisitos para melhoria de desempenho e potenciais técnicas de reabilitação.

Tipificação de problemas	Requisitos	Potenciais técnicas de reabilitação
Elevado grau de incrustações, causando problemas de qualidade da água ou redução da capacidade de transporte numa conduta estruturalmente robusta	-Isolamento da parede da conduta. -Aumento da capacidade de transporte da conduta (sendo suficiente o diâmetro existente)	-Revestimento interior -Entubamento com cura in situ -Entubametno com manga adesiva

Juntas defeituosas ou corrosão localizada provocando perdas de água elevadas numa conduta estruturalmente robusta	-Isolamento da parede da conduta. -Selagem de orifícios, fissuras ou juntas abertas	-Reparação pontual de juntas -Entubamento com cura in situ -Entubamento com manga adesiva
Elevado grau de corrosão com perda de resistência estrutural, causando elevado grau de degradação, perdas de água elevadas ou roturas frequentes	-Aumento da resistência estrutural da conduta. -Isolamento da parede da conduta	-Entubamento simples -Entubamento ajustado -Entubamento com cura in situ -Substituição com vala aberta -Rebentamento, esmagamento ou corte longitudinal da conduta existente -Extracção da conduta existente -Construção de microtúnel perfuração dirigida
Secção da conduta insuficiente com necessidade de aumento da capacidade de transporte. Conduta com perda de resistência estrutural	-Aumento da capacidade de transporte da conduta (necessidade de aumento de diâmetro)	-Substituição com vala aberta -Rebentamento, esmagamento ou corte longitudinal da conduta existente -Extracção da conduta -Construção de microtúnel -Perfuração dirigida
Secção da conduta insuficiente com necessidade de aumento de capacidade numa conduta estruturalmente robusta	-Aumento da capacidade de transporte da conduta (necessidade de aumento de diâmetro)	- Substituição com vala aberta -Rebentamento, esmagamento ou corte longitudidal da conduta existente -Extracção da conduta -Construção de microtúnel -Perfuração dirigida - Não intervir directamente na conduta mas adoptar alternativas de reforço

2.5.2.5.Comparação de custos e de vantagens e inconvenientes das técnicas existentes

Uma vez que é impossível dissociar qualquer acção de reabilitação dos seus custos, é necessário, fazer a comparação dos custos inerentes às várias opções possíveis. Este não é um processo fácil, uma vez que factores tão diversos como diâmetros, profundidades, materiais, interrupções de trânsito, imposições do ponto de vista legal, entre outros, têm de ser pesados neste momento do processo de decisão.

No Quadro A2, em anexo II, encontram-se sintetizadas todas as características das principais técnicas de reabilitação de condutas, nomeadamente custos, vantagens e desvantagens da sua aplicação.

3.Modelos de avaliação do risco de rotura

3.1.Considerações iniciais

Os modelos de deterioração de condutas podem ser classificados em duas categorias, modelos estatísticos/empíricos ou modelos físicos/mecânicos.

Os modelos estatísticos recorrem ao histórico das instalações e às características das mesmas de modo a identificar padrões de ocorrência de roturas. Já os modelos físicos preveem a ocorrência de roturas analisando as cargas às quais a tubagem está exposta, bem como características do solo envolvente

Os modelos físicos são cientificamente mais robustos, no entanto o seu uso é limitado pela dificuldade de obtenção da totalidade dos dados necessários. Contrariamente, os modelos estatísticos podem ser aplicados com recurso a um conjunto de dados relativamente limitado (Zheng Liu et al.,2012).

Os modelos estatísticos serão abordados de uma forma mais exaustiva comparativamente aos modelos físicos, uma vez que o modelo de Markov, usado no caso prático, é pertence ao primeiro grupo.

3.2.Modelos estatísticos usados na modelação do processo de deterioração de infraestruturas

3.2.1.Considerações Iniciais

Existem vários modelos estatísticos e físicos que têm como objectivo modelar o processo de deterioração sofrido por infraestruturas, modelos estes que ganham especial importância caso as infraestruturas em análise sejam de difícil acesso, a realização de inspecções seja um processo oneroso e a sua colocação fora de serviço cause grandes constrangimentos às populações.

Deste modo, os modelos existentes podem dar um importante contributo para uma melhor calendarização da realização de inspecções a condutas de grandes diâmetros, pelas razões anteriormente referidas. Não se pretende que os modelos sejam um indicador infalível quanto ao estado de conservação das condutas, mas sim, um bom indicador quanto ao instante em que cada troço apresente indícios de anomalias que justifiquem uma acção de inspecção.

Estas inspeções têm como objectivo aferir sobre o real estado de condição do troço em análise, para posterior planeamento de acções de intervenção.

Confrontando o estado de condição previsto pelos modelos com o estado de condição real (aferido nas inspecções), é possível calibrar os modelos de modo a que as posteriores previsões sejam mais precisas.

Estes modelos podem ser também importantes ferramentas na elaboração de programas de manutenção de instalações.

O recurso aos modelos estatísticos permite orientar as inspecções, restringindo a realização das mesmas aos troços nos quais o grau de risco de deterioração seja suficiente para justificar a respectiva inspecção pela entidade gestora.

Dado que os modelos em estudo têm como objectivo a previsão do estado de condição das tubagens enterradas, inicialmente é feita referência a uma teoria que define o ciclo de vida das mesmas, servindo esta como base para alguns dos modelos estatísticos existentes.

3.2.2. Ciclo de vida de uma tubagem enterrada

De seguida apresenta-se uma curva representativa do ciclo de vida de tubagens enterradas, que serve como base para o desenvolvimento de alguns dos modelos estatísticos posteriormente abordados neste documento.

O ciclo de vida de uma tubagem enterrada é frequentemente descrito pela "bathtub curve", sendo esta ilustrada na Figura 4.

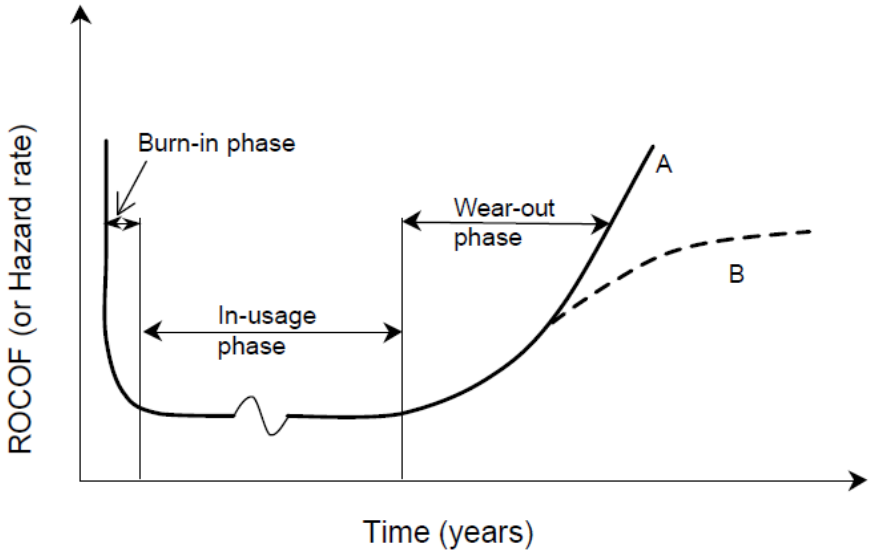

Figura 4- Bathtube Curve (Fonte:Kleiner e Rajani,2001)

Uma tubagem geralmente é reparável, pelo que a curva "bathtub" associada ao seu ciclo de vida tem o nome de ROCOF (rate of occurence of failure of repairable unit),(Ascher e Feingold,1984). Esta abordagem considera ainda que o risco de ocorrência de rotura está directamente relacionado com o estado de condição da conduta.

No entanto existe outro tipo de "bathtub curve", sendo essa representativa de tubagens não reparáveis. Seguidamente será abordada a proposta referente a activos reparáveis. A curva representativa do ciclo de vida da tubagem pode ser dividida em três fases.

A primeira, conhecida por "**burn-in**", descreve o período logo após a instalação, onde as falhas ocorridas são devidas a erros de instalação ou defeitos nos materiais.

Uma vez ultrapassado o período de ocorrência destas anomalias, a tubagem entra na segunda fase **(" in-usage phase"**), sendo esta pouco propícia à ocorrência de problemas. As anomalias nesta fase registadas, devem-se sobretudo a fenómenos aleatórios, tais como a aplicação de cargas pontuais, anomalias de operação, entre outros.

Na terceira fase, chamada **"wear-out phase**", prevê-se o crescimento da frequência de falhas devido à deterioração sofrida pela instalação, fruto das acções sofridas ao longo do processo envelhecimento. Este crescimento pode ser representado por **A** ou **B**, conforme o modelo estatístico usado na modelação do processo. O modelo de Markov, modelo central deste documento, segue um desenvolvimento B.

Esta "bathtub" é uma esquematização do ciclo de vida de uma instalação, não sendo imperativo que todas as tubagens vivenciem as três fases relatadas anteriormente. O período de duração de cada fase pode variar bastante, consoante as condições envolventes e o próprio material da tubagem.

Embora as tubagens sejam reparáveis, alguns modelos usados actualmente recorrem à "hazard function bathtub", como por exemplo Andreou et al., 1987a. Isto deve-se ao facto desses modelos considerarem o período entre roturas e não a frequência de ocorrência das mesmas ao longo do ciclo de vida das tubagens.

Alguns dos modelos estatísticos referidos posteriormente consideram as três fases do ciclo de vida proposto pela "bathtub", enquanto outros consideram implicitamente apenas uma ou duas delas. Outros consideram ainda formas diferentes para a curva representativa do ciclo de vida.

3.2.3.Modelos estatísticos

3.2.3.1.Tipos de modelos

Os modelos estatísticos podem ser utilizados com o objectivo de prever a deterioração sofrida pelas condutas, analisando para isso o seu histórico de desempenho e/ou estado físico.

Em redes de distribuição de pequeno diâmetro, onde é frequente a ocorrência de roturas, utilizam-se modelos baseados na frequência com que as mesmas ocorrem.

No caso de condutas de grande diâmetro, a ocorrência de roturas é um fenómeno que se pretende que seja raro. Desta forma, a aplicação de um modelo estatístico tendo como base a frequência das roturas tornar-se-ia pouco exequível.

Tendo em conta esta limitação, a previsão do desempenho de condutas de grande diâmetro é preferencialmente obtida recorrendo a modelos que se baseiem no estado de condição da conduta e no meio envolvente, não se considerando imprescindível o seu histórico de roturas.

Conforme descrito no capítulo 2, existem várias técnicas que permitem a avaliação estrutural de uma conduta. Técnicas essas, que são em alguns casos bastante onerosas e cuja aplicação levanta alguns problemas do ponto de vista da gestão do abastecimento.

Os modelos estatísticos, ao preverem o estado de deterioração de uma conduta, podem ser uma útil ferramenta na definição dos momentos de realização das acções de inspecção e posterior intervenção, evitando assim inspecções aleatórias no tempo, correndo estas o risco de não fornecer informação relevante.

Os modelos estatísticos podem ser classificados em duas classes, determinística e probabilística, podendo-se considerar sub-classes, conforme se encontra esquematizado de seguida (Kleiner e Rajani,2001).

- **Modelos determinísticos**;
    - Modelos de tempo exponencial;
    - Modelos de tempo linear;
- **Modelos probabilísticos**;
    - Modelo probabilístico com um único grupo de variáveis;
    - Modelo probabilístico de múltiplas variáveis;

3.2.3.2.Modelos Determinísticos

Os **modelos determinísticos** preveem futuras roturas com base em dois ou três parâmetros, sendo estes relacionados com a idade da tubagem e o seu histórico de roturas. Simplificadamente, são uma formulação matemática, nas quais são colocados alguns parâmetros e o estado de condição é obtido.

Conforme referido no capítulo 2, vários factores contribuem para a degradação das condutas (e.g.,ambiente, material da tubagem, condições de operação).

Desta forma, para ser possível obter resultados credíveis provenientes da aplicação de modelos estatísticos, torna-se necessário dividir os troços a analisar em grupos uniformes e homogéneos relativamente aos factores contributivos para a taxa de deterioração, sem no entanto impor restrições que os tornem excessivamente pequenos e, insignificantes do ponto de vista estatístico. De seguida apresentam-se alguns exemplos de modelos determinísticos.

Modelos determinísticos exponenciais

Estes modelos são do tipo $N(t) = Ci.\ N(t0).\ e^{A(t+g)}.\ e^{(y)}$, sendo:

- $N(t)$ - número de roturas por unidade de comprimento por ano;
- $N(t0)$ - $N(t)$ no ano de instalação;
- A- Coeficiente de crescimento de roturas;
- t- tempo decorrido desde o presente;
- g-Idade da tubagem
- yi–Parâmetros de regressão da característica i;
- Ci-Rácios de ocorrência de roturas entre tubagens com determinadas características;

Graficamente, o desenvolvimento padrão da evolução de N(t) tem o desenvolvimento dado pela Figura 5.

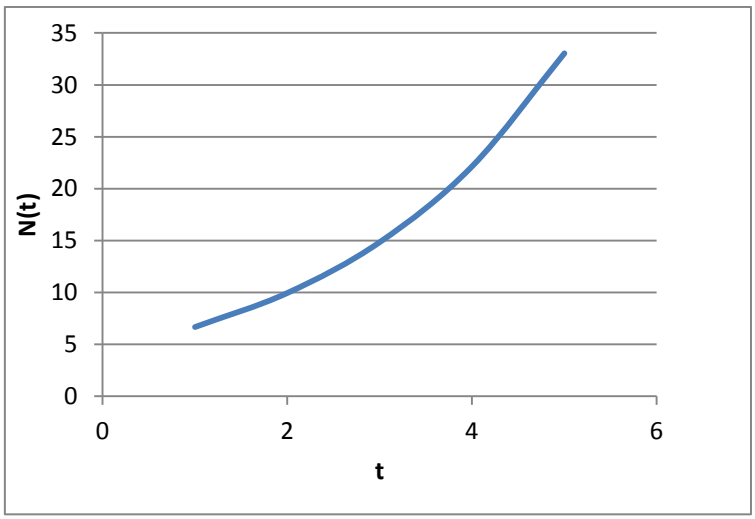

Figura 5-Desenvolvimento de N(t)

Os parâmetros integrantes dos modelos apresentam diferentes valores consoante os seus respectivos autores. Três dos mais conhecidos modelos foram elaborados respectivamente por Shamir e Howard (1979), Walski e Pelliccia(1982) e Clark et al.(1982). Os dados necessários para a utilização dos mesmos são esquematizados de seguida:

Quadro 7-Modelos determinísticos exponenciais

Referência	Dados necessários
Shamir e Howard (1979)	Comprimento da tubagem e histórico de roturas; Formação de grupos homogéneos, sobretudo em relação ao diâmetro, tipo de solo e de tubagem e tipo de roturas.
Walski e Pelliccia (1982)	Registos contínuos das propriedades do solo, o que pode ser algo oneroso.

Clark et al. (1982)	Comprimento, idade e histórico de roturas da tubagem.

De notar que à excepção do modelo proposto por Clark et al. (1982), todos os restantes consideram apenas e, de forma implícita, a fase "wear out" da curva "bathtub".

Assim, se os registos históricos de falhas incluírem dados relativos ao período "burn-in", estes não devem ser considerados na regressão.

O tempo até à ocorrência da primeira rotura considerado na proposta de Clark et al (1982) pode ser visto como uma consideração implícita da segunda fase da curva"bathtub".

Modelos determinísticos lineares

No Quadro 8 resumem-se os principais modelos determinísticos de tempo linear, bem como os dados necessários para a sua aplicação.

Quadro 8- Modelos determinísticos lineares

Referência	Modelo	Notação	Dados necessários
Kettler e Goulter(1985)	N=ko X Age	**N =** nº de roturas por ano. **Ko** = parâmetro de regressão. **Age=**Idade da tubagem aquando da ocorrência da 1ª rotura.	Comprimento da tubagem e histórico de roturas; Formação de grupos homogéneos, sobretudo em relação ao diâmetro, tipo de solo e de tubagem e tipo de roturas.
McMullen(1982)	$Age=65.78+0.028SR-6.338pH-0.049r_d$	**Age=**Idade da tubagem aquando da ocorrência da 1ª rotura. **SR** = resistividade de saturação do solo **pH** = pH do solo $\mathbf{r_d}$ = potencial redox	Registos contínuos das propriedades do solo, o que pode ser algo oneroso.
Jacobs e Karney (1994)	$P=a_o+a_1Lenght+a_2Age$	**P** = Inverso da probabilidade de um dia sem ocorrência de roturas. $\mathbf{a_o,a_1,a_2}$= coeficientes de regressão.	Comprimento, idade e histórico de roturas da tubagem.

Excpetuando o modelo de McMullen (1982), os restantes modelos lineares em função do tempo consideram de forma implícita, apenas a fase "wear-out" da curva bathtub.

3.2.3.3.Modelos Probabilísticos

Modelos probabilísticos de múltiplas variáveis

Os **modelos probabilísticos de múltiplas variáveis** fazem intervir um número considerável de variáveis no processo de análise, sendo com isto potencialmente mais precisos. Estes modelos requerem uma menor repartição dos activos por grupos para posterior análise, no entanto acarretam uma modelação matemática bastante mais complexa.

Na Quadro 9 encontram-se esquematicamente representados os principais modelos deste grupo.

Quadro 9- Modelos probabilísticos de múltiplas variáveis

Referência	Modelo	Notação	Variáveis explanatórias
Proportional hazards Marks et al.(1985)	$h(t,Z)=h_o(t)e^{Zb^T}$ $ho(t)=2\times10^{-4}-10^{-5}t+2\times10^{-7}t^2$	**T**=tempo até à próxima rotura. **h(t,Z)**=função de risco. **Z=**vector de covariantes **b**= vector de coeficientes a ser estimado pela máxima verosimilhança	• Comprimento da tubagem. • Pressões de serviço. • Cargas aplicadas. • Idade da instalação. • Corrosividade do solo. • Nº de roturas anteriores.
Andreou et al.(1987a,1987b) Marks et al.(1987)	Estado inicial: o mesmo proposto por Marks et al., (1985) descrito anteriormente. Estado posterior:$\lambda=e^{Zb^T}$	**h**=risco(constante no último estado)	
Proportional hazards Brémond(1997)	$h(t,Z)=h_o(t)e^{Zb^T}$ $ho(t)=\lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}$	**t**=tempo para a nova rotura. **h(t)**=função de risco **λ,β**=parâmetros de forma da distribuição de Weibull	• Nº de roturas anteriores. • Diâmetros da tubagem. • Condições do solo. • Carga devido ao trafego.
Modelo de Poisson dependente do tempo Constantine e Darroch(1993),Miller(1993); Constantine et al.(1996)	$H(t)=(\frac{t}{\theta})^{\beta}$ $\theta=\theta_o e^{\alpha Z}$	**t**=idade da tubagem. **H(t)**=nº médio de falhas por unidade de comprimento na idade t. θ, **β=** Parâmetros de escala e forma respectivamente **α**=vector de coeficientes a ser estimado por regressão. **Z**=vector de covariantes que afectam a taxa de roturas.	• Pressão estática média. • Condições de trafego. • Diâmetros da tubagem. • Tipo de solo.
Accelerated life Lei (1997)	$Ln(T)=\mu+x^T\beta+\sigma Z$ $T=f(\sigma,Z)\,e^{x^T\beta}$	**T**=tempo até à próxima falha **x**=vector de variáveis explicativas	• Idade da tubagem • Dimensões da tubagem

Eisenbeis et al.(1999)		**Z**=variável aleatória com distribuição Weibull **σ=**parâmetro a ser estimado pela máxima verosimilhança **β** =vector de parâmetros estimados pela máxima verosimilhança **Z**=variável aleatória com distribuição de Gumbel	• Material da tubagem • Cargas devido ao trafego • Humidade e acidez do solo • Nº de roturas anteriores

Modelos probabilísticos com um único grupo de variáveis

Estes modelos aplicam processos probabilísticos a agrupamentos de dados, de modo a obter uma previsão da esperança de vida útil da instalação e a probabilidade de ocorrência de roturas.

O Quadro 10 esquematiza os principais modelos probabilísticos com um único grupo de variáveis, referenciando os autores dos mesmos, bem como a informação necessário para a sua aplicação.

Quadro 10- Modelos probabilísticos com um único grupo de variáveis

Referência	Modelo	Notação	Dados necessários
Cohort Survival Model Herz(1996);Deb et al.(1998)	$f(t) = \frac{(a+1)be^{b(t-c)}}{[a+e^{b(t-c)}]^2}$ S (t)=$\frac{a+1}{a+e^{b(t-c)}}$ $h(t) = \frac{be^{b(t-c)}}{a+e^{b(t-c)}}$	$f(t)$=Função densidade de probabilidade. **h(t)=**função de risco. **S(t)**=função de sobrevivência. **t**=tempo de vida útil da tubagem **a**=factor de envelhecimento **b**=factor de falha **c**=tempo de resistência(tempo esperado até à primeira intervenção)	• Datas da instalação das tubagens. • Agrupamento criterioso permite aumentar a eficiência. • Histórico de roturas
Modelo de diagnóstico Bayesiano Kulkarni et al.(1986)	Prob.[falha I características especificas] = $\frac{Pc/f \times Pf}{\frac{Pc/f}{1} \times Pf + Pc/nf(1-Pf)}$	Pf=probabilidade de falha. Pc/f=probabilidade de observar características especifica em segmentos onde ocorreram falhas. Pc/nf=Probabilidade de observar características de um segmento que não tenha falhado.	É necessário agrupar as tubagens consoante determinadas características, tais como o diâmetro, comprimento, idade das tubagens e tipo de solo.
Agrupamento de roturas Goulter e Kazemi(1988);	$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!}$ m=m(s,t)	**m**=nº médio de falhas subsequentes que ocorrem no grupo em análise. **x**= nº de falhas subsequentes que	Necessário conhecer o histórico de roturas exacto , relativamente ao tempo e espaço de ocorrência das mesmas.

Goulter et al .(1993)		ocorrem no grupo em análise. **S**=distancia à 1ª rotura **t**=tempo passado desde a 1ª rotura.	

3.2.3.4. Síntese

A deterioração das instalações de adução implica acções de manutenção onerosas, originando também uma redução da qualidade da água bem como perdas da mesma e falhas no abastecimento.

Deste modo, prever a deterioração é essencial para promover um plano de intervenção adequado.

Os modelos estatísticos recorrem ao histórico das roturas ou estados de condição observados e às características das mesmas de modo a identificar padrões de ocorrência de roturas. Os modelos formulados são classificados como determinísticos, probabilísticos de variáveis múltiplas e probabilísticos com um único grupo de variáveis.

Num processo determinístico, o estado de condição dos activos processa-se de acordo com uma função. Um modelo probabilístico prevê estados de condição futuros segundo uma distribuição de probabilidades.

Estes são uma forma económica e viável de previsão do desempenho de infra estruturas, funcionando como uma importante ferramenta no processo de gestão das mesmas.

3.3. Modelos mecânicos/físicos usados para modelar o processo de deterioração de infra-estruturas

Os modelos físicos preveem a ocorrência de roturas analisando as cargas às quais a tubagem está exposta, bem como características do solo envolvente. Para serem precisos é necessário recolher um grande número de indicadores, pelo que a sua utilização é algo limitada.

Os mecanismos físicos que levam as tubagens à rotura são algo complexos, envolvendo vários aspectos, tais como: propriedades intrínsecas das mesmas (e.g., tipo de material, geometria, tipo de juntas, qualidade da instalação), cargas aplicadas e deterioração do material, podendo esta ser causada por condições internas e externas.

No Quadro 11 resumem-se alguns dos mais recentes modelos físicos propostos, referenciando o seu principal objectivo bem como os dados necessários para a sua aplicação.

Quadro 11-Modelos físicos

Referências	Objectivo	Dados necessários	Comentários
Rajani and Makar, 1999	Estimar o tempo de serviço restante em tubagens de ferro fundido cinzento	Geometria e propriedades mecânicas da tubagem, bem como propriedades do solo (pH, resistividade)	O tempo até à ocorrência de falha assume que a corrosão se propaga num modelo de duas fases, proposto por Rossum,1969.
Hadzilacos et al., 2000	Previsão do tempo de vida residual de tubagens	Módulo de elasticidade, pressão interna, geometria da tubagem, geometria do troço, algumas propriedades do solo, informações sobre a deterioração da camada de assentamento.	Probabilidade de ocorrência de falhas de diferentes modos.
Deb et al., 2002	Modelos mecânico para classificar a deterioração sofrida pelas tubagens.	Geometria da tubagem e propriedades mecânicas do ferro fundido, propriedades do solo e registos relativos ao clima. O modelo de Rossum foi usado para prever o desenvolvimento dos orifícios devidos à corrosão.	Modelo mecânico em tudo idêntico ao proposto por Rajani e Makar (1999). Algumas modificações efectuadas nos parâmetros usados no modelo de medição dos orifícios, proposto inicialmente por Rossum.
Rajani e Tesfamariam, 2004; Tesfamariam et al., 2006	Análise da Interacção tubagem-solo.	Módulo de elasticidade, pressão interna, geometria da tubagem, algumas propriedades do solo, propriedades térmicas do material, condição da camada de assentamento.	A flexão longitudinal é considerada muito gravosa para tubagens de pequenos diâmetros.
Davis et al., 2007	Previsão de falhas em tubagens de PVC.	Geometria da tubagem, propriedades do material,	O tipo de fracturas é modelado em função

		propriedades do solo, pressão interna, recobrimento.	da pressão interna e das cargas externas.
Moglia et al., 2008	Previsão de falhas em tubagens de ferro fundido	Geometria da tubagem, idade, pressão de serviço, ritmo de desenvolvimento de corrosão, propriedades do material e do solo	O desenvolvimento da corrosão é considerado constante ao longo do tempo. É usada uma simulação de Monte-Carlo para computar os instantes de ocorrência de falhas.
Rajani e Tesfamariam, 2007	Estimar o tempo de serviço restante do ferro fundido cinzento	Módulo de elasticidade da tubagem, pressão interna, geometria da tubagem, algumas propriedades do solo, e propriedades térmicas da tubagem	Corrosão, deterioração da camada de suporte, diferencial de temperatura e espessura do material são considerados os parâmetros mais importantes para a longevidade da tubagem
Davis et al., 2008	Previsão de falhas em tubagens de fibrocimento	Geometria da tubagem, propriedades do material, pressão de serviço e recobrimento.	O modelo assume uma taxa de perda de resistência linear

.

São na sua generalidade metodologias que exigem o conhecimento de um grande número de indicadores, alguns dos quais variáveis ao longo do desenvolvimento do troço em análise, tornando assim a sua utilização algo limitada e sujeita a uma subjectividade elevada.

3.4. Software de suporte à decisão

3.4.1.Introdução

Seguidamente faz-se uma breve descrição de alguns dos software existentes usados como apoio nas tomadas de decisão, relativamente aos processos de intervenção a realizar em condutas. Alguns estão disponíveis comercialmente, enquanto outros são apenas protótipos.

Estes têm por base alguns dos modelos descritos anteriormente.

3.4.2.CARE-W-Computer Aided Rehabilitation of Water Networks

Este software contem várias ferramentas independentes de análise e apoio à decisão, estando estas ligadas a uma base de dados que posteriormente analisa toda a informação obtida.

As ferramentas constituintes do CARE-W são as seguintes:

CARE-W PI (Performance Indicator) :Usado para estimar o estado de condição corrente e futuro da rede de distribuição. Analisa 49 indicadores, sendo estes divididos em cinco grupos: condições de operação, qualidade

do serviço, análise financeira, recursos hídricos e indicadores físicos. São considerados também outros factores que não são do domínio da entidade gestora, tais como o clima, o solo e a topografia (Batista e Alegre,2002).

CARE-W FAIL : É composto por cinco modelos de previsão de roturas diferentes; (a) Failnet-Stat, desenvolvido por Cemagref (França) baseado no modelo de riscos proporcionais; (b) Winroc, desenvolvido por NTNU (Noruega), baseado no processo não homogéneo de Poisson; (c) AssetMapp 1 , desenvolvido por INSA-Lyon (França) , baseado em cadeias de Markov;(d) AssetMap2 , desenvolvido por INSA-Lyon, usa uma regressão de Poisson para identificar e definir os grupos de activos ; (e) Utilnets, desenvolvido por SINTEF (Noruega). (Eisenbeis et al .,2002).

CARE-W REL (Reliability) : Dispõe de três modelos para modelar a fiabilidade da rede: (a) AquaRel, desenvolvido por SINTEF (Noruega), recorrendo também ao simulador EPANET e à taxa de ocorrência de falhas em tubagens. O impacto é medido pelo número de nós que sofram reduções de pressão críticas devido à ocorrência de falhas. (b) FailNet-Reliab , desenvolvido por Cemagref(França) , pretende quantificar o impacto da condição das tubagens na fiabilidade da rede. (Eisenbeis et al .,2002).

CARE-W LTP (Long Term Planning): É constituído por três ferramentas (Scenario Writer, Rehabilitation Strategy Manager e Rehabilitation Strategy Evaluator), todas desenvolvidas pela universidade de Dresden. Scenario Writer é essencial para fazer comparações robustas entre cenários que requerem muitos pressupostos sobre o futuro. A ferramenta Rehabilitation Stategy Manager pretende simular a longo prazo os efeitos específicos das operações de intervenção. Por fim, a ferramenta denominada Rehabilitation Strategy Evaluator pretende identificar a melhor estratégia de intervenção, baseando-se na técnica "Formalized Weighting and Rehabilitation Proccedure" (Rostum et al., 2004).

3.4.3.KANEW

É um modelo de previsão da vida útil de infra estruturas, baseado numa distribuição de probabilidades proposta por Herz (1996). Esta distribuição de probabilidade é aplicada a grupos de tubagens homogéneos, relativamente a factores que se considerem relevantes.

A versão actual do KANEW inclui um módulo para gerir o inventário de tubagens, um módulo para executar o cálculo de custos e, por fim um módulo para apoiar a tomada de decisão comparando os vários cenários. Para avaliação dos cenários, o software faz considerações sobre os impactos de cada uma das políticas de gestão possíveis, tanto de curto, médio e longo prazo.

3.4.4. Pipeline Asset and Risk Management System (PARMS)

A ferramenta **PARMS-Planing** consegue prever o número de roturas e avaliar os custos de reparação inerentes. A ferramenta **PARMS-Priority** permite definir as prioridades de intervenção de curto prazo.

PARMS-Planning usa dois tipos de modelos de deterioração, um modelo de Poisson não homogéneo e um modelo probabilístico/físico (Davis et al.,2007; Davis et al., 2008;Moglia et al.,2008).Os custos de reparação são

introduzidos pelo utilizador, sendo que por fim o modelo relaciona os custos de reparação com o risco associado a uma eventual rotura e define os troços que se devem substituir.

PARMS-Priority define os troços de intervenção prioritária. Usa o mesmo modelo de deterioração usado no modelo PARMS-Planning, diferindo ligeiramente na consideração dos custos inerentes às intervenções necessárias. (Moglia et al 2006).

3.4.5. Water Main Rehabilitation Planner (WARP)

Compreende um conjunto de ferramentas de planeamento, desenvolvidas pelo NRC. É composto por quatro ferramentas independentes :D-WARP(Distribution mains-WARP),T-WARP(Transmission mains-WARP),Q-WARP(Water Quality-WARP) e I-WARP(Individual –WARP).(Zheng Liu;Yehuda Kleiner e Balvant Rajani ,2012).

D-WARP permite modelar a deterioração de grupos homogéneos de troços recorrendo a uma função exponencial da idade dos mesmos, e indicar assim o tempo ideal de substituição.

T-WARP é um modelo protótipo que tem como objectivo modelar a deterioração de activos com base no modelo de Markov.

Q-WARP permite prever as potenciais ocorrências de vários mecanismos causadores de deterioração da qualidade da água.

I-WARP Modela a deterioração de troços isolados, baseando-se num processo não homogéneo de Poisson. Difere do processo não homogéneo de Poisson corrente na medida em que permite considerar factores dependentes do tempo, tais como, a temperatura, o tipo de solo e a ocorrência ou não de precipitação. É também ainda um protótipo.

3.4.6.WilCO

Modelo com vista a providenciar uma eficiente gestão de activos. (Engelhardt and Skipworth,2005). Permite ao utilizador definir o desempenho dos mesmos, em termos dos indicadores chave. Não obriga o utilizador a usar um determinado modelo de deterioração.

Após estar definido o principal objectivo a atingir com a intervenção, o modelo procura a solução optimizada (Engelhardt and Skipworth,2005).

3.5. Modelo de Markov

3.5.1.Considerações gerais

O modelo de Markov é um modelo probabilístico, uma vez que a previsão dos estados de condição futuros segue uma distribuição de probabilidades.

Trata-se ainda de um processo estocástico que pode ser usado para modelar as transições de estados sofridas por um sistema. Dado tratar-se de um modelo estocástico, é bastante adequado para modelar processos de degradação correntes em infra-estruturas.

O processo estocástico mais recorrentemente utilizado é o processo de Markov em cadeia, tanto para simulação do estado de deterioração de pontes, estradas ou colectores, sendo que este simula a evolução do estado de conservação dos activos referidos, permitindo assim uma gestão de qualidade (Yang *et al.*, 2009).
Entre outras, este modelo tem a particularidade de permitir a previsão do estado em que determinada infra-estrutura se encontrará num instante temporal futuro, tendo como base o estado presente e, sendo esta previsão independente de acontecimentos passados. Tal propriedade tem o nome de Markoviana.

A propriedade Markoviana diz que a probabilidade condicional de um processo futuro, dado um acontecimento passado e o estado actual, é independente do acontecimento passado, dependendo apenas do estado presente.

Um processo estocástico diz-se Markoviano se tiver a propriedade de Markov e, designa-se por cadeia de Markov a série de estados de um sistema com a mesma propriedade.

Pretende-se neste documento modelar a deterioração sofrida pelas condutas da EPAL, com recurso ao modelo de Markov em cadeia, tirando partido da propriedade Markoviana.

3.5.2.Processos estocásticos

Um processo estocástico é definido como sendo um conjunto de variáveis aleatórias X (t), indexadas por um parâmetro t pertencente ao conjunto T.

Frequentemente considera-se que T é um conjunto de inteiros não negativos e, X (t) representa uma característica mensurável de interesse no momento t.

Por exemplo, X (t) pode representar o estado de condição de determinado activo no final de um determinado período de tempo (t), desde a última observação.

A estrutura de um processo estocástico tem geralmente a seguinte forma:

- O estado de condição de determinado activo pode-se encontrar numa das **n** categorias possíveis, tendo estas o nome de **estados.** Por conveniência de notação, estes estados serão "catalogados" em valores numéricos;
- A variável aleatória X (t) representa o estado em que se encontra o sistema no instante (t);
- O sistema pode ser observado em determinados instantes, como por exemplo t=0,1,2…n;

Desta forma, o processo estocástico $\{X(t)\} = \{X_0, X_1, X_2, \ldots X_n\}$ é uma descrição matemática da evolução do estado físico do sistema ao longo do tempo. (Hillier e Lieberman,2001).

3.5.3.Propriedade Markoviana

Um processo estocástico é considerado um processo Markoviano caso tenha a seguinte propriedade:

$P\{ X_{t+1} = j \mid X_0 = k_0, X_1 = k_1, \ldots\ldots, X_{t-1} = k_{t-1}, X_t = i\} = P\{ X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$, para $t = 0,1,\ldots$ e todas as sequências i, j, $k_0, k_1, \ldots k_{t-1}$.

Por palavras, esta propriedade diz que a probabilidade condicional de algum acontecimento futuro, dado qualquer acontecimento passado e o estado presente $X_t=i$, é independente do acontecimento passado, dependendo apenas do estado presente.

O estado futuro depende apenas do estado presente e não da forma como este foi atingido.

Desta forma, um processo estocástico $\{X_t\}$ (t=0,1,..) é uma cadeia **de Markov** caso tenha a propriedade anteriormente referida (propriedade Markoviana).

Esta propriedade é também chamada perda de memória, uma vez que o passado é "esquecido".

As probabilidades condicionais $P\{ X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$, são denominadas **probabilidades de transição.** Simplificadamente, $P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$ será futuramente representada por p_{ij} (Hillier e Lieberman,2001).

3.5.4.Cadeias de Markov em tempo contínuo

As cadeias de Markov podem ser em tempo discreto ou contínuo. Nos primeiros, as probabilidades de transição seguem uma distribuição geométrica com unidades de tempo equidistantes e inteiras, sendo esta sequência uma progressão geométrica de razão q. (Frangopol *et al.*, 2004; Scherer e Glagola, 1994; Yang *et al.*, 2009).

Idealmente seria preferível a utilização de processos em tempo discreto, uma vez que estes requerem cálculos mais simples comparativamente aos necessários para proceder a uma análise em tempo continuo. (Kallen e Van Noortwijk, 2006).

No entanto o recurso a processos em tempo discreto exige que o intervalo de tempo entre inspeções às condutas (usadas na construção da matriz intensidade abordada posteriormente neste documento) seja sempre o mesmo, o que torna limitada a sua utilização em situação real. Como tal, as cadeias de Markov em tempo discreto não serão alvo de análise aprofundada neste documento.

Deste modo, para o caso de estudo e, para que se possa ter um eficiente e exequível modelo de previsão de desempenho baseado na metodologia de Markov é necessário considerar o processo em tempo contínuo.

A principal diferença relativamente a um processo em tempo discreto é que num processo contínuo as transições de estado podem ocorrer em intervalos de tempo não periódicos. O processo em tempo contínuo

permite a ocorrência de transições numa escala de tempo contínua (Hillier e Lieberman,2001). Esta particularidade do processo contínuo permite utilizar na construção da matriz de intensidade, condutas cujos intervalos de tempo entre inspecções sejam indiscriminados.

3.5.5.Probabilidades estacionárias (Steady-State Probabilities)

A função de probabilidades de transição em tempo contínuo satisfaz as equações de Chapman-Kolmogorov. Portanto, para qualquer estado i e j e instantes temporais t e s não negativos (0 ≤ s ≤ t),

$$pij(t) = \sum_{k=1}^{M} \text{pik (s) pkj (t} - \text{s)} \qquad \textbf{[1]}$$

Para todo i = 0,1,…..M

J= 0,1,…..M

Esta equação implica que ao transitar do estado i para o estado j, o processo encontrar-se-á num certo instante no estado k.

Diz-se que um par de estados i e j comunicam caso existam intervalos de tempo t1 e t2 tal que pij (t1)> 0 e pji (t2)> 0. Todos os estados que comunicam formam uma classe e caso todos os estados comuniquem entre si a cadeia de Markov torna-se irredutível.

Além disso, o seguinte limite existe sempre e é independente do estado inicial da cadeia de Markov, para j= 1, 2,… n. Estes limites são chamados de **steady-state probabilities** (ou probabilidades estacionárias) da cadeia de Markov.

$$\lim_{t-\infty} pij(t) = \pi j \qquad \textbf{[2]}$$

O factor π_j satisfaz a seguinte equação:

$$\pi jqj = \sum_{i \neq j} \pi i \; qij \qquad \textbf{[3]}$$

para j= 0,1,.., M e todo t ≥0.

e

$$\sum_{j=0}^{M} \pi j = 1 \qquad \textbf{[4]}$$

A equação 3 pode ser interpretada da seguinte maneira. Considera-se que (πjqj) é a taxa à qual o processo deixa o estado j. (πj) é a probabilidade do processo se encontrar nesse mesmo estado e qj é a taxa de transição a partir desse estado. No lado direito da equação, $(\pi i \; qij)$ é a taxa à qual o processo entra no estado j a partir do estado i, sendo qij a taxa de transição do estado i para o estado j dado que o processo se encontra no estado i.

Somando o lado direito para todo $i \neq j$ obtém-se a taxa à qual o processo entra no estado j partindo de qualquer outro estado.

A equação global indica assim que a taxa à qual o processo abandona o estado j é igual à taxa à qual entra nesse mesmo estado (Hillier e Lieberman,2001).

3.5.6.Classificação de estados em cadeias de Markov

3.5.6.1.Estados Alcançáveis e Comunicantes

Um estado j é considerado **alcançável** (acessible) a partir de um estado i se $p_{ij} > 0$ em algum período de tempo.

Um estado j é considerado **comunicante** com o estado i se o estado j é alcançável a partir do estado i e o estado i é alcançável a partir do estado j.

Dois estados que **comuniquem** entre si pertencem **à mesma classe** e, caso todos os estados pertençam a uma única classe, a cadeia de Markov é **Irredutível** (**Hillier** e Lieberman,2001).

3.5.6.2.Estados recorrentes, transientes e absorventes

Um estado i é **transiente** caso o sistema saindo do mesmo não volte a esse mesmo estado. Portanto, o estado **i** é transiente caso possa transitar para um ou mais estados j**,** mas nenhum dos estados j possa transitar para o estado i.

Recorrente é um estado ao qual o processo definitivamente irá regressar. Um estado é recorrente se e só se não for transiente.

Considera-se **absorvente** um estado do qual o processo nunca irá sair (Hillier e Lieberman,2001).

3.5.7.Intensidade de transição

As intensidades de transição podem ser definidas pelas seguintes expressões:

$$qi = \frac{-d}{\mathrm{dt}}\ \mathrm{pii}(0) = \lim_{\mathrm{t}-0} \frac{1 - \mathrm{pii(t)}}{\mathrm{t}} \qquad \textbf{[5]}$$

Para i= 0, 1 ,2 , …, M.

$$qij = \frac{d}{\mathrm{dt}}\ \mathrm{pij}(0) = \lim_{\mathrm{t}-0} \frac{\mathrm{pij(t)}}{\mathrm{t}} = \mathrm{qi\ Pij} \qquad \textbf{[6]}$$

Para todo $i \neq j$

Pode-se afirmar que qi é a taxa de transição com que o sistema abandona o estado i, ou por outras palavras, é o número esperado de vezes que o processo deixa o estado i por unidade de tempo que aí permanece. Pode-se assim dizer também que qi é o oposto do tempo esperado que o processo permanecerá no estado i.

$$qi = \frac{1}{\mathrm{E[\ Ti]}} \qquad \textbf{[7]}$$

A taxa de transição do estado i para o estado j, qij, pode ser interpretada como sendo o número de vezes que o processo transita do estado i para o estado j por unidade de tempo que permanece no estado i. Então,

$$qi = \sum_{j \neq i} \mathrm{qij} \qquad \textbf{[8]}$$

Cada vez que o sistema entra no estado i, a quantidade de tempo que irá dispender no mesmo antes de transitar para o estado j é uma variável aleatória T_{ij} , onde i,j = 0,1,… n e j≠i .

Cada T_{ij} tem uma distribuição exponencial cujo parâmetro é q_{ij} , logo $E[T_{ij}] = 1/q_{ij}$. O tempo em que o sistema permanece no estado i até que ocorra transição para um outro (Ti) é o mínimo dos valores Tij. Quando a transição ocorre, a probabilidade de ser para o estado j é $p_{ij}=q_{ij}/q_i$ (Hillier e Lieberman,2001).

3.5.8.Diagrama de transições

O diagrama de transições representado é uma representação gráfica possível de uma Cadeia de Markov. Neste diagrama são visualizados os estados (representado por círculos), as transições (representadas por segmentos de recta) bem como as probabilidades das transições. Generalizando, pode-se representar os estados alcançáveis pelo sistema e as probabilidades de transição entre estados, respectivamente, por E_i e p_{ij}, onde *i* e *j* são os índices que identificam os vários estados possíveis (logo p_{ij} é a probabilidade de haver uma transição do estado *Ei* para o estado *Ej*). A partir desta generalização, pode-se desenhar um diagrama, conforme se encontra exemplificado na Figura 6.

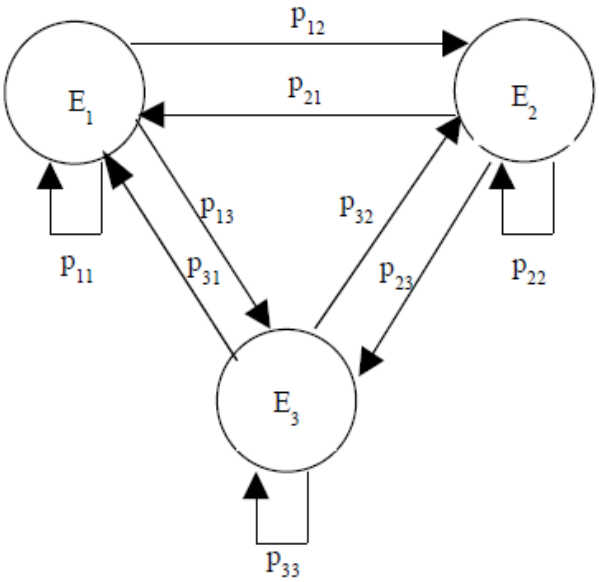

Figura 6-Diagrama de transições

3.5.9.Função probabilidade de transição em tempo contínuo

Conforme referido anteriormente, os estados de condição nos quais o sistema se pode encontrar têm de ser previamente definidos como 0, 1, ….,n.

Começando no instante t=0 e fazendo com que o parâmetro relacionado com o tempo, t´, tome valores contínuos para t´≥0, faz-se com que a variável aleatória X (t´) represente o estado do sistema no instante t´.

Considerando três instantes diferentes **(1)** t´=r (r≥0), **(2)** t´= s (s> r), **(3)** t´=s+t (t> 0), significando o seguinte:

t´= r é um instante passado

t´= s é tempo presente

t´=s+t é um instante futuro

Portanto, o sistema foi observado nos instantes t´=s e t´= r, constatando-se que se encontrava nos seguintes estados de condição: X (s) = i e X (r) = r.

Dada esta informação é então possível prever qual a distribuição de probabilidades relativa ao estado de condição do sistema no instante t´=s+t.

Por outras palavras, e considerando a propriedade **Markoviana,** pode-se descrever este processo da seguinte maneira:

$$P\{X(s+t) = j \mid X(s) = i \text{ e } X(r) = r\} = P\{X(s+t) = j \mid X(s) = i\} \quad \textbf{[9]}$$

De notar que P **{**X (t+s) =j I X (s) =i**}** é a **probabilidade de transição.**

Outra das propriedades desta abordagem prende-se com o facto de as **probabilidades de transição serem estacionárias,** querendo com isto dizer que a distribuição de probabilidade de transição não muda ao longo do tempo.

Esta propriedade pode ser expressa da seguinte forma:

$$P\{X(t+s) = j \mid X(s) = i\} = P\{X(t) = j \mid X(0) = i\} \quad \textbf{[10]}$$

Se a probabilidade de transição é independente de (s) para todo s> 0, então toma o nome de **probabilidade de transição estacionária.**

Simplificando a notação, a probabilidade de transição pode ser escrita da seguinte maneira:

$$pij(t) = P\{X(t) = j \mid X(0) = i\} \quad \textbf{[11]}$$

Onde pij(t) tem o nome de **função de probabilidade de transição em tempo continuo.**

$$\lim_{t\to 0}(\mathrm{pij}\ (\mathrm{t})) = 0 \ \text{ se i} \neq \text{j} \qquad \textbf{[12]}$$

$$\lim_{t\to 0}(\mathrm{pij}\ (\mathrm{t})) = 1 \ \text{se i=j} \qquad \textbf{[13]}$$

De seguida apresenta-se de forma esquemática as principais características das cadeias de Markov em tempo contínuo, servindo estas de base para o caso prático, posteriormente analisado neste documento.

- Os estados de condição são discretos, ou seja, aquando das inspecções são atribuídas classificações ao estado das infraestruturas. (Thompson e Johnson, 2005)

- Os modelos são probabilísticos e não determinísticos, isto é, uma vez que o processo de deterioração é de natureza estocástica, qualquer que seja o estado dos activos no presente, a previsão do seu desempenho futuro segue uma distribuição de probabilidades. Num processo determinístico, o estado de condição dos activos processa-se de acordo com uma função. (Ng e Moses, 1999; Scherer e Glagola,1994; Thompson e Johnson,2005)

- Para previsão do desempenho futuro não são considerados os estados de condição relativos ao passado, importando apenas o estado de condição no momento de aplicação do modelo. (Baik *et al.*, 2006)

- A propriedade de Markov (com a probabilidade de transição estacionária), implica que a distribuição de probabilidade do tempo restante até que ocorra transição para o próximo estado seja sempre a mesma, independentemente da quantidade de tempo que o sistema já passou no actual estado. Esta é uma propriedade pouco comum em distribuições de probabilidade.

$$\mathrm{P}\{\mathrm{T} > t + s \ \mathrm{I}\ \mathrm{Ti} > s\} = \{\mathrm{Ti} > t\} \qquad \textbf{[14]}$$

- Efectivamente , a variável aleatória tem perda de memória, isto é, o processo esquece a sua história . Apenas existe uma distribuição de probabilidades (continua) que possui esta propriedade: **distribuição exponencial.**

- **A distribuição exponencial** tem um parâmetro, q, cuja média é 1/q e a função de distribuição acumulativa é:

$$\mathrm{P}\{\mathrm{Ti} \leq \mathrm{t}\} = 1 - e^{-qt} \qquad \textbf{[15]}$$

4.Atribuição do estado de condição à conduta em função das Inspecções

4.1.Considerações gerais

Conforme exposto no ponto 3.4, para ser possível a aplicação de cadeias de Markov na previsão da deterioração sofrida por determinado activo (condutas de abastecimento de água, neste caso de estudo), é necessário dispor de informações e métodos que permitam a atribuição de um estado de condição aos mesmos.

Deste modo e tendo conhecimento das técnicas de inspecção e diagnóstico existentes, conforme exposto no capítulo 2, o objectivo passa pela atribuição de estados de condição às condutas, com base na informação recolhida, estados estes que terão de fazer obrigatoriamente parte de uma escala previamente definida.

Exemplificando: Supondo uma escala de estados de condição, em que 1 representa um estado excelente (pouca ou nenhuma deterioração sofrida) e 5 representa um estado próximo do colapso (estado de deterioração extremamente avançado), o objectivo é atribuir um estado (um valor numérico) ao troço de conduta inspeccionado, representando este o estado físico do troço aquando da realização da inspecção.

Este processo que parece simples não se encontra no entanto definido de forma normalizada. Actualmente a transição dos registos de inspecções a condutas de abastecimento de água para estados de condição são processos bastante subjectivos e pouco práticos, dependendo estes dos peritos que analisem os dados recolhidos (Zheng Liu et al.,2012).

As entidades gestoras aplicam os seus próprios métodos de transição, não existindo um processo que seja consensual e de uso generalizado.

Contrariamente, existem na bibliografia algumas propostas de transição de resultados de inspecções para estados de condição, aplicáveis a sistemas de águas residuais.

Tendo em consideração estas limitações, procurou-se com base na pesquisa realizada elaborar uma metodologia de transição aplicável ao caso de estudo. Neste capítulo serão apresentados dois métodos de transição existentes. O primeiro deles, desenvolvido para sistemas de águas residuais e o segundo para sistemas de água potável, sendo este segundo ainda meramente teórico.

4.2.Metodologias existentes

4.2.1. Técnica de avaliação difusa

Kleiner et al., (2005) descreveu uma abordagem para modelar a deterioração de estruturas enterradas recorrendo a num sistema de avaliação difuso, isto é, um sistema que considera a falta de precisão e subjectividade da interpretação dos resultados das inspecções.

Torna-se inicialmente necessário definir o conjunto de estados de condição nos quais os troços se poderão encontrar durante a totalidade dos instantes da sua vida útil, desde o bom estado de funcionamento e conservação ao estado de inutilidade.

O estado de condição do troço inspecionado é definido por um vector de probabilidades, sendo estas atribuídas pelos peritos.

Esta definição consiste em atribuir uma probabilidade a cada um dos estados de condição pré definidos. Cada uma dessas probabilidades representa a confiança dos peritos, relativamente ao estado de condição do troço inspecionado se encontrar em cada um deles.

Os estados de condição pré definidos são os seguintes cinco: bom; adequado; razoável; medíocre e mau.

Exemplificando o modelo em análise: os peritos podem afirmar que determinado troço se encontra no estado razoável com 70% de certeza e no estado medíocre com 30 % de certeza. O vector de probabilidades correspondente a este estado de condição é então da seguinte forma: (0, 0, 0.7, 0.3,0). Este vector corresponde ao estado de condição de um troço inspecionado, podendo assim ser usado na previsão de estados de condição futuros desse mesmo troço.

Dado existirem tubagens de vários materiais, torna-se necessário clarificar quais os indicadores a analisar de modo a caracterizar o estado de condição dos troços.

Esta proposta organiza os factores contributivos para a deterioração das tubagens numa estrutura de dois níveis hierárquicos. O primeiro nível é composto por categorias, enquanto o segundo nível diz respeito a indicadores de desgaste (*distress indicators*).

Cada indicador de desgaste (*distress indicator*) contribui para uma categoria, sendo que cada categoria contribui para o estado de condição final do troço em análise.

Inicialmente é necessário classificar cada um dos indicadores de desgaste, atribuindo-lhe um estado de condição expresso por um “fuzzy set”, atribuindo probabilidades de este se encontrar em cada um dos estados admissíveis estabelecidos a priori.

O peso da contribuição de cada um dos indicadores para a respectiva categoria, bem como o peso da contribuição de cada categoria para o estado de condição final é atribuído com base na opinião de peritos (Lee e Kim,2001).

No entanto, Kleiner et al., (2005) constatou que esta proposta pode conduzir a um estado de condição final que não reflita uma opinião lógica fornecida pelos peritos. Isto é, não faria sentido um perito atribuir, por mais ínfima que fosse, a probabilidade de um troço se encontrar simultaneamente no estado bom e medíocre.

Deste modo propôs um ajuste final, tendo este o objectivo de restringir o vector referente ao estado de condição do troço, a um vector em que apenas sejam permitidos valores diferentes de zero em três subconjuntos seguidos. Exemplificando: (0, 0, 0.5,0.3,0.2, 0).

De notar que as condições da envolvente e de operacionalidade não são explicitamente consideradas no processo de determinação do estado de condição, sendo que o resultado da actuação conjunta de todos esses factores se reflecte no estado físico das tubagens, que por sua vez é averiguado pelos processos de inspecções.

O recurso a esta metodologia é de certa forma limitado, uma vez que esta exige formalismos matemáticos excessivos, sendo pouco prática a sua aplicação na análise de uma rede de abastecimento real.

Outro ponto negativo da metodologia abordada prende-se com a dificuldade na atribuição de pesos de importância relativos entre os diversos indicadores, caso não seja possível a obtenção de informações sobre a totalidade deles. A falta de informação sobre algum dos indicadores exige um reajustamento dos pesos de importância na definição do estado de condição final do troço

Para finalizar, trata-se de uma metodologia em que caso apenas um dos indicadores esteja em muito mau estado e os restantes se encontrem num óptimo estado, isso se reflita num estado de condição global positivo, mesmo tendo em conta o sistema de pesos de importância proposto. Este factor é muito limitativo, uma vez possibilita a atribuição de classificações pouco credíveis.

4.2.2.Protocolos de atribuição de pontuação para colectores de águas residuais

As metodologias usadas para transformar os resultados de inspecções em estados de condição, começaram por ser desenvolvidas com o objectivo de aferir acerca do estado de condição de instalações de sistemas de drenagem (inicio da década de 80) e, têm-se vindo a reunir esforços para a criação de um sistema igualmente pragmático, aplicável a condutas de grande diâmetro. Até à data não existe um processo de classificação normalizado (Zheng Liu et al.,2012).

Algumas entidades gestoras de sistemas de adução e distribuição usam sistemas próprios, baseados em factores observáveis nas suas instalações. Estas metodologias são personalizadas, tendo critérios de classificação e atribuição de importância próprios, não permitindo assim o seu uso por parte de outras entidades gestoras.

Contrariamente, para a avaliação das instalações de águas residuais já existem métodos consistentes e práticos, sendo estes usados um pouco por todo o mundo com resultados satisfatórios.

É possível encontrar na literatura protocolos que permitem o registo dos indicadores de desgaste e posteriormente transformá-los em estados de condição (ex., WRC (2003), NRC (2001), Water Services Association of Australia (2002), Cemagref (2003) e National Association of Sewer Service Companies (NASSCO).

O protocolo mais usado hoje em dia é o WRC, cujo desenvolvimento foi iniciado em 1978, servindo-lhe como base cinco anos de observações de falhas em sistemas de águas residuais.

Tendo como base este protocolo, desenvolveu-se o “Sewerage rehabilitation Manual” (WRC, 1986; WRc, 1993; WRc, 1994; WRc, 2001).

O NRC também criou um protocolo de classificação de colectores de águas residuais de seu nome “ Guidelines for Condition Assessment and Rehabilitation of Large Sewers “ (Zhao et al., 2001).

Todos os protocolos desenvolvidos usam uma abordagem de pontuações, onde cada tipo de anomalia é classificado, correspondendo aos defeitos considerados mais gravosos para o estado de condição da instalação as classificações mais elevadas.

É necessário definir inicialmente todos os estados de condição nos quais uma tubagem se poderá encontrar ao longo de todo o seu ciclo de vida. O que determina em qual dos estados de condição previamente definidos se encontra a tubagem em análise é o somatório das classificações atribuídas às anomalias registadas.

Enquanto o protocolo proposto pelo WRc propõe uma escala com 165 valores, o NRC usa uma escala de apenas 20 valores.

No Quadro 12 encontra-se um excerto das pontuações atribuídas pelos dois protocolos às anomalias possíveis de registar.

Quadro 12- Indicadores de desgaste e respectiva pontuação

			Pontuação	
Indicador de desgaste	**Nível de desgaste**	**Unidade**	**NRC**	**WRc**
Rotura longitudinal	Ligeiro (até 3, sem fugas)	m	3	10
	Moderado (>3, com fugas	m	5	40
Rotura circunferencial	Ligeiro (até 3, sem fugas)	m	3	10
	Moderado (>3, com fugas	m	5	40
Rotura diagonal	Ligeiro (até 3, sem fugas)	m	3	N/A
	Moderado (>3, com fugas	m	5	N/A
	Severo (fendas múltiplas, fugas)	m	10	40
Fenda longitudinal	Ligeiro (<10 mm)	m	5	40
	Moderado (10-25 mm ou mais do que uma)	m	10	80
	Severo (>25 mm)	m	15	N/A
Fenda circunferencial	Ligeiro (<10 mm)	m	5	40
	Moderado (10-25 mm ou mais do que uma)	m	10	80
	Severo (>25 mm)	m	15	N/A
Fenda diagonal	Ligeiro (<10 mm)	m	5	40
	Moderado (10-25 mm ou mais do que uma)	m	10	80
	Severo (>25 mm)	m	15	N/A
Deformação	Ligeiro (<5% alteração do diâmetro)	m	5	20
	Moderado (5%-10% alterações no diâmetro)	m	10	80
	Severo (11%-25% alterações no diâmetro)	m	15	165
Danos na superfície	Ligeiro	m	3	5
	Moderado	m	10	20
	Severo	m	15	120
Deslocamento da junta	Ligeiro(<1/4 espessura da parede)	m	3	N/A
	Moderado (1/4 - 1/2 espessura da parede)	m	10	1
	Severo (> 1/2 espessura da parede)	m	15	2
Tubagem inutilizável	-	cada	15	60
Colapso	-	cada	20	165

Quadro 13- Comparação entre os dois protocolos

Protocolo	**Estados de condição**					
	0 (E)	**1 (B)**	**2 (R)**	**3 (F)**	**4 (M)**	**5 (CI)**
WRc	N/A	<10	10 – 39	40 – 79	80 – 164	>165
NRC	0	1 – 4	5 – 9	10 – 14	15 – 19	20

Legenda:

E-excelente; B-Bom , R-Razoável ; F-Fraco ;M- Mau ; CI- Colapso iminente

No Quadro 13 encontra-se a comparação entre os dois protocolos de atribuição de estados de condição. De referir que o NRC propõe que sejam seis os estados de condição possíveis, enquanto o WRc propõe apenas cinco estados de condição.

Analisando o Quadro 12 facilmente se constata que os dois protocolos não são concordantes quanto à importância relativa entre alguns dos vários indicadores.

Conforme se pode ver no Quadro 13, um somatório de pontuações atribuídas a anomalias registadas mais elevado corresponde a um estado de condição mais deteriorado.

Esta metodologia para além de ser bastante prática, uma vez que não exige grandes formalismos matemáticos, permite ainda atribuir automaticamente o pior dos estados de condição possível a um determinado troço caso este apresente uma anomalia considerada muito grave, independentemente das pontuações atribuídas às restantes anomalias.

Veja-se por exemplo na pontuação proposta pelo WRc, que caso seja registado colapso, o estado de condição do troço passa automaticamente a ser 5, mesmo que o somatório das restantes anomalias seja zero.

Estas características são bastante favoráveis, permitindo assim uma abordagem pragmática.

4.3.Metodologia proposta

Após ter sido feito o levantamento das metodologias existentes para a transposição dos registos de inspecções para estados de condição, pretende-se nesta fase elaborar uma metodologia aplicável aos registos referentes às inspecções realizadas pelos técnicos da EPAL. Tendo em consideração as apreciações feitas às metodologias anteriores, procura-se obter uma metodologia pragmática e de simples aplicação.

As inspecções realizadas pelos técnicos da EPAL focam os indicadores descritos no documento "Drain & Sewer Systems Outside Buildings, 7 March 2001**"** elaborado pelo WRC, sendo que as anomalias observadas durante o processo de inspecção são codificadas segundo a proposta presente na seguinte parte do documento. **"Establishment of the Condition of Drain and Sewer Systems Outside Buildings. Part 2: Visual Inspection Coding System".**

Após análise conjunta com os técnicos da EPAL, a ideia de implementar um sistema de atribuição de pontuações às anomalias registadas, conforme a gravidade das mesmas para o estado de funcionamento da conduta, saiu reforçada.

Desta forma, o trabalho desenvolvido neste sentido tem como objectivo a atribuição de pontuações às anomalias possíveis de registar. O critério de atribuição de pontuações está relacionado com a gravidade da anomalia respectiva, pretendendo ser proporcional à mesma.

Tendo como objectivo final a atribuição de estados de condição aos troços em análise, torna-se necessário definir o número de estados de condição pelo qual o troço pode transitar ao longo da sua vida, bem como os intervalos de pontuação respectivos.

Presentemente a EPAL inspecciona as suas condutas e em fase posterior é atribuído um estado de condição às mesmas, sendo este processo algo subjectivo, uma vez que depende em exclusivo da opinião dos técnicos participantes. Para além disso, a conduta é avaliada na globalidade, sendo por isso difícil comparar a evolução do estado de condição em trechos específicos.

Este é um processo trabalhoso, subjectivo e algo moroso. Assume-se que durante o período de vida útil, os sucessivos estados de condição pelos quais uma conduta pode transitar são cinco, representando o estado 1 um grau de deterioração insignificante, contrariamente ao estado 5, representante de um nível de deterioração muito avançado.

Após inspecção, as condutas são avaliadas de 1 a 5, caracterizando-se cada estado da seguinte maneira.

Quadro 14-Estados de condição

1	**Muito bom**-Requer apenas manutenção recorrente.
2	**Bom**- Requer intervenções não prioritárias.
3	**Razoável** – Intervenção a médio prazo (3 a 5 anos).
4	**Mau**- Intervenção a curto prazo (1a 2 anos).
5	**Muito Mau**- Intervenção imediata.

A metodologia proposta neste documento consiste na atribuição de pontuações às anomalias registadas nos trechos em análise e posterior realização do somatório das mesmas para por fim atribuir um estado de condição, consoante o intervalo de valores previamente definido em que esse somatório se encontre.

Desta forma, sendo a avaliação dos troços feita com critérios iguais, a atribuição de estados de condição torna-se um processo menos subjectivo e mais célere, possibilitando uma posterior aplicação do processo de Markov.

Para tornar a metodologia proposta um processo eficaz torna-se necessário que a atribuição das pontuações às várias anomalias seja feita de forma criteriosa, sendo necessário comparar os resultados dos estados de condição atribuídos com base na opinião dos técnicos aos estados de condição atribuídos pelo modelo proposto, fazendo-se sucessivas calibrações a este último.

Calibrações essas que consistem em ajustes nas pontuações atribuídas às anomalias, bem como nos intervalos de pontuação respeitantes a cada um dos estados de condição possíveis.

No processo de calibração foi feita uma análise detalhada do túnel do bode, tendo os técnicos da EPAL atribuído segundo a classificação em vigor na empresa, um estado de condição a todos os 145 segmentos pertencentes ao mesmo. Posteriormente foram feitas várias classificações segundo a metodologia em construção, tendo-se alterado gradualmente as pontuações atribuídas às anomalias bem como os intervalos de pontuações correspondentes a cada um dos 5 estados de condição considerados, de modo a que a classificação obtida se aproximasse da classificação fornecida pelos peritos.

A comparação das classificações obtidas pela metodologia proposta com a classificação proposta pelos técnicos da EPAL está esquematizada na seguinte figura:

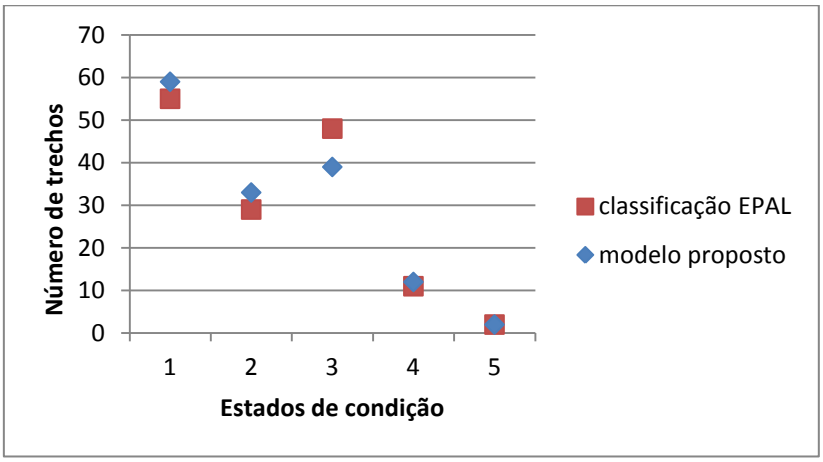

Figura 7-Relação entre modelo de classificação proposto e metodologia EPAL

Constata-se que o modelo proposto conduz a valores muito próximos aos atribuídos pelos peritos da EPAL.

Introduz-se ainda o conceito de factor de correlação, podendo este variar entre -1 e 1. Os factores de correlação positivos correspondem a dois conjuntos de dados independentes cujos valores médios aumentam de forma directa. Os factores de correlação negativos indicam o inverso, isto é, dois conjuntos de dados cujos valores médios evoluem de forma inversa, aumentando um e diminuindo outro.

Quanto maior o módulo do respectivo factor, mais forte é a relação entre os valores analisados.

O factor de correlação entre os modelos de classificação em estudo é de 0.97, indicando assim uma correlação positiva forte, sustentando a credibilidade do modelo proposto.

Analisa-se de seguida qual a linha de tendência que melhor se ajusta aos dados em análise. Com recurso às ferramentas disponíveis no excel obtém-se o seguinte gráfico:

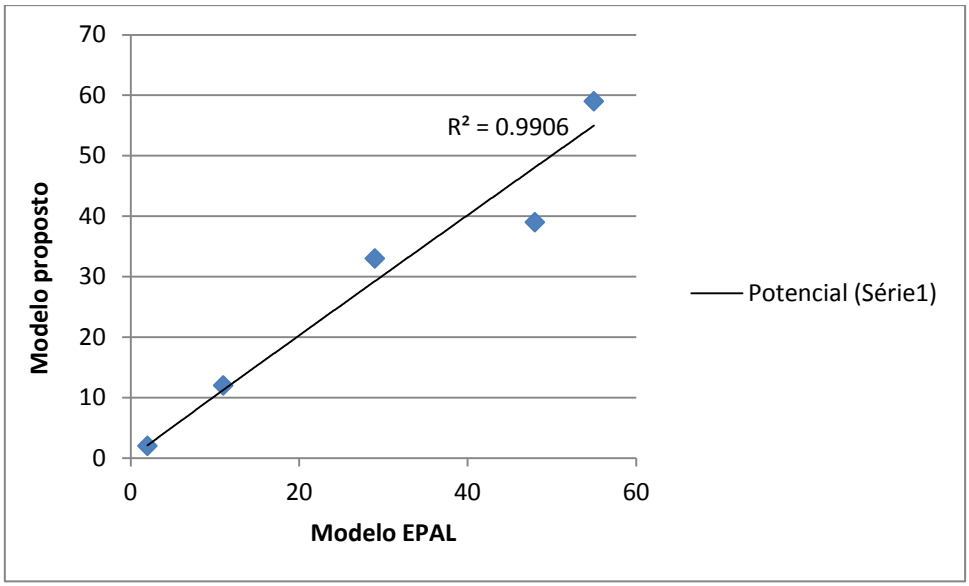

Figura 8-linha de tendência para modelos de avaliação

O facto de R^2 ser bastante próximo de 1 indica que a linha de tendência potencial é um ajuste quase perfeito aos dados analisados.

A atribuição de pontuações às anomalias foi feita em paralelo com a definição dos intervalos expostos no Quadro 15, de modo a que a pontuação atribuída às mesmas remeta o estado de condição do troço no qual estas são registadas para o estado que se considera ser representativo da sua gravidade.

Após sucessivas calibrações e testes, constata-se que o intervalo de pontuações respeitante a cada um dos cinco estados de condição possíveis, presentes no Quadro 15, juntamente com a atribuição de pontuações às anomalias presente em anexo III-Quadro A3, conduz a classificações satisfatórias, quando comparados com as fichas de inspeção preenchidas pelos técnicos da EPAL. (anexo III-Quadro A5).

Quadro 15- Intervalos de pontuação relativos aos cinco estados de condição

	Estados de condição				
	1	2	3	4	5
Pontuações	<20	20 - 79	80-159	160-250	>250

Para reforçar o sistema de classificação proposto, comparou-se ainda a classificação global dos troços efectuada aquando da realização de Inspecções Técnicas Visuais (ITV), aos seguintes troços:

Quadro 16- Características dos troços utilizados na calibração da atribuição de pontuações

Identificação do troço	DN (mm)	Material	Extensão (m)	Nº trechos analisados	Tipo de juntas	Ano inspecção
Adutor de Castelo de Bode -Troço entre a V13B e a V14	1800	Pré-fabricada em betão com alma de aço do tipo PREBESAN, com juntas soldadas e três troços em túnel betonados *in situ*	6305	866	Soldadas, Abocardadas, Betonagem	Abril 2009
Adutor de Castelo de Bode -Troço entre a V16B e o Túnel da Azambuja	1800	Maioritariamente tubagem DN1800mm, pré-fabricada em betão com alma de aço do tipo PREBESAN, com juntas soldadas. Este troço apresenta, ainda, um trecho em túnel betonado *in situ* (Túnel da Azambuja)	1882	348	Soldadas, Abocardadas, Betonagem	Novembro 2011
Adutor de Castelo de Bode -Troço entre a V16B e o P71	1800	Pré-fabricada em betão com alma de aço do tipo PREBESAN, com juntas soldadas.	2930	425	Soldadas, Abocardadas, Betonagem	Abril 2009
Túnel do Bode- Torre de Tom. de Água - EE Castelo do Bode	3000	Betão Armado/Aço	1015	145	Juntas de Betonagem	Novembro 2010
Adutor de Castelo de Bode-Troço entre V11-V12B	1800	Betão Armado/ Aço	6780	685	Soldadas, Abocardadas, Betonagem	Novembro 2009
Adutor de Castelo de Bode-Túnel da Zootécnica	1800	Betão Armado/ Aço	246	36	Soldadas, Betonagem	Novembro 2010

É importante referir que os registos das anomalias são feitos para trechos sucessivos de aproximadamente 7 metros, visto ser esta a extensão média entre juntas. O processo proposto consiste na atribuição de uma classificação a cada trecho, somando as pontuações respectivas às anomalias registadas no mesmo. Após todos

os trechos pertencentes ao troço serem classificados, obtém-se a classificação da totalidade da extensão do mesmo, sendo esta comparada à obtida pela avaliação efectuada pelos peritos da EPAL. São também comparadas em particular as classificações atribuídas a trechos considerados mais problemáticos, para testar a credibilidade da metodologia proposta.

Em anexo III-Quadro A4 pode-se ver o exemplo de uma folha de registos. Foram analisados cerca de 2500 trechos, perfazendo uma extensão total de aproximadamente 20 km. De seguida apresenta-se as classificações dos estados de condição atribuídos pelos técnicos da EPAL em comparação com os atribuídos pela metodologia proposta.

Quadro 17- Comparação das classificações atribuídas

Troço	Estado de condição atribuído pelos técnicos da EPAL	Estado de condição atribuído pela metodologia proposta
Adutor de Castelo de Bode -Troço entre a V13B e a V14	2.8	2.1
Adutor de Castelo de Bode -Troço entre a V16B e o Túnel da Azambuja	2.7	2.2
Adutor de Castelo de Bode -Troço entre a V16B e o P71	3.3	3.1
Túnel do Bode- Torre de Tom. de Água - EE Castelo do Bode	2.6	2.1
Adutor de Castelo de Bode-Troço entre V11-V12B	2.3	2.0
Adutor de Castelo de Bode-Túnel da Zootécnica	3.0	3.0

Constata-se que os valores obtidos são bastante próximos, sendo as diferenças pouco significativas, sustentando assim a credibilidade da metodologia proposta. A análise efectuada ao troço correspondente ao Túnel do Bode, embora sendo este constituído por um DN bastante superior aos restantes, conduz também ela a uma concordância nas classificações atribuídas. Durante o processo de atribuição das pontuações foram sempre tidos em conta alguns segmentos referenciados como problemáticos, servindo estes como mais um teste à credibilidade das anomalias propostas.

Em anexo III-Quadro A3, encontra-se a lista de anomalias contemplada nos registos elaborados pela EPAL, bem como a pontuação final respectiva, atribuída após sucessivas calibrações. Os intervalos respectivos à distribuição das fissuras e das infiltrações foram atribuídos também durante o desenvolvimento deste trabalho.

Esta metodologia é matematicamente bastante simples, dependendo a sua eficácia das pontuações atribuídas às anomalias registadas. A credibilidade da mesma é incrementada com o aumento do número de calibrações

efectuadas às pontuações atribuídas, fruto da comparação com as classificações efectuadas pelos técnicos. Por outras palavras, quanto mais comparações das classificações atribuídas pelos técnicos com as atribuídas pela metodologia e, respectivos ajustes forem feitos, mais credível será esta ultima.

É importante referir que a tabela de pontuações atribuídas às várias anomalias não deve ser usada indiscriminadamente para atribuição do estado de condição a condutas de todos os materiais e diâmetros, devendo as condutas avaliadas ter características o mais próximas possível das utilizadas no processo de calibração das pontuações.

5.Caso de Estudo

5.1.Sistema de Abastecimento de Água da EPAL

O sistema de produção e transporte é constituído por 3 subsistemas que se desenvolvem ao longo de mais de 700 km de adutores, com uma capacidade nominal de produção que pode atingir os 1 000 000m^3 / dia e uma capacidade de reserva de 337 228 m^3. Estes subsistemas são dotados de 2 Estações de Tratamento de Água,32 Estações Elevatórias,36 Reservatórios e 19 Postos de Cloragem. A água produzida pelos 3 subsistemas é aduzida pelos respectivos adutores de Castelo do Bode, do Tejo e do Alviela e ainda pelo adutor Vila Franca de Xira-Telheiras, e pelo adutor de Circunvalação. (Fonte: EPAL).

O adutor de Castelo do Bode é o mais significativo, transportando cerca de 60% de toda a água produzia.

A rede de distribuição desenvolve-se ao longo de mais de 1400 km, está dividida por 5 patamares de pressão principais, abrangendo uma área de 83 km^2 e uma população residente de 564 000 habitantes. Considerando a população residente na área total de abastecimento, isto é, incluindo todos os municípios abastecidos, a população abrangida situa-se perto dos 3.000.000 de habitantes.

O abastecimento de água à cidade de Lisboa, que até ao séc XVIII era assegurado por nascentes e bicas teve um acréscimo de qualidade bastante acentuado com a construção do Aqueduto das Águas Livres. Este foi mandado construir em 1731, tendo como objectivo solucionar o problema de falta de água na cidade.

Figura 9- Aqueduto das Águas Livres

Posteriormente Lisboa passou a ser abastecida através do aqueduto do Alviela (1880) e o canal do Tejo (1940).

Já no ano de 1987, foi concluído o sistema de Castelo do Bode, mitigando assim a carência de água na cidade devido ao forte crescimento populacional registado.

Esta infraestrutura é considerada o principal componente do sistema de abastecimento da EPAL, tendo capacidade de produção de aproximadamente 600 000 m^3/dia.

O plano de investimento actual da empresa pretende reforçar a fiabilidade, a eficiência e a segurança de todo o sistema de abastecimento.

5.2.Sistema de Distribuição

Conforme citado anteriormente, a rede de distribuição de Lisboa é sectorizada em 5 patamares de pressão, encontrando-se estes esquematicamente representados na Figura 10.Os principais materiais utilizados nas tubagens são o ferro fundido dúctil, polietileno de alta densidade, ferro fundido e o fibrocimento.

Os diâmetros das tubagens que perfazem maior extensão são de 100, 125,150,160 e 200 mm.

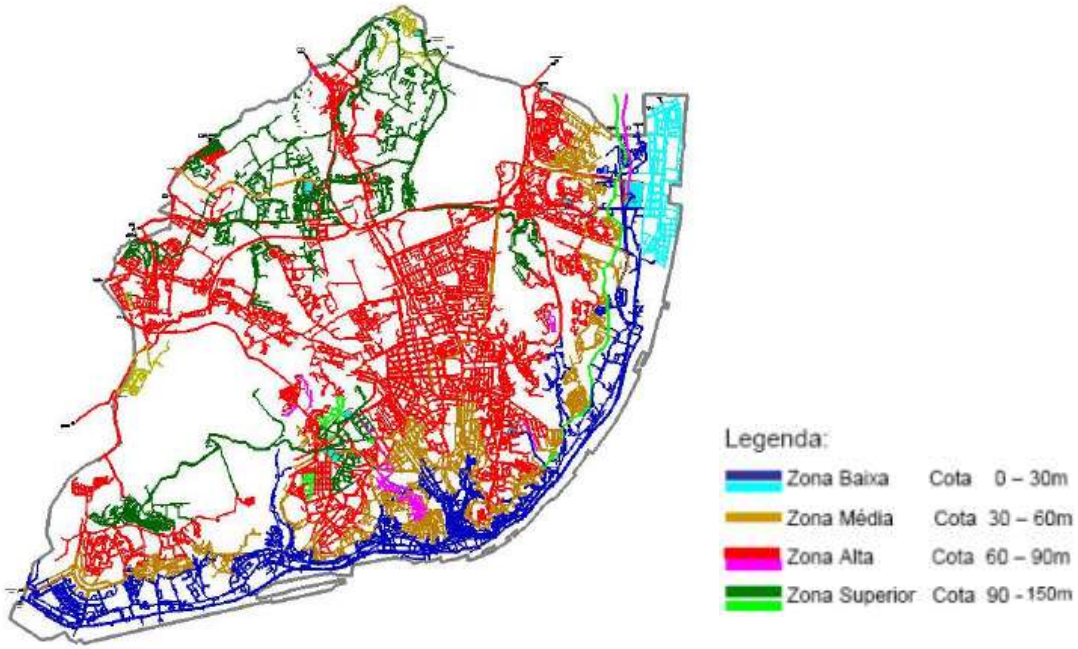

Figura 10-Rede de distribuição de água, por zona altimétrica, na cidade de Lisboa (Fonte:EPAL)

5.3.Sistema de Adução

5.3.1.Considerações gerais

Os principais materiais usados nas condutas dos sistemas de adução são o Betão Armado e o Betão Armado pré esforçado. A extensão de tubagens com diâmetros de 400, 1000 e 1800 mm é muito significativa. No sistema de adução existem também troços em túnel, cuja particularidade dos métodos construtivos origina anomalias distintas. A figura seguinte é representativa da disposição da rede de adução por diâmetro das tubagens.

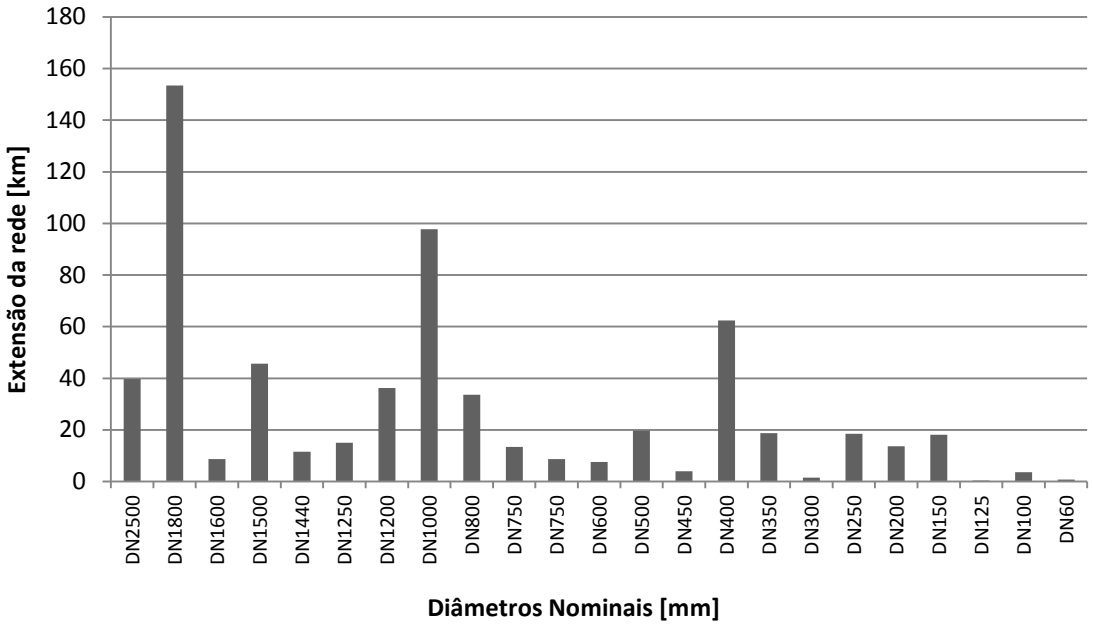

Figura 11- Disposição da rede de adução por diâmetro das tubagens

5.3.2.Adutor de Castelo do Bode

Dada a importância que o adutor de Castelo do Bode tem e, uma vez que os troços estudados no caso prático são pertencentes ao mesmo, segue-se a disposição do adutor do Castelo do Bode por diâmetro das tubagens.

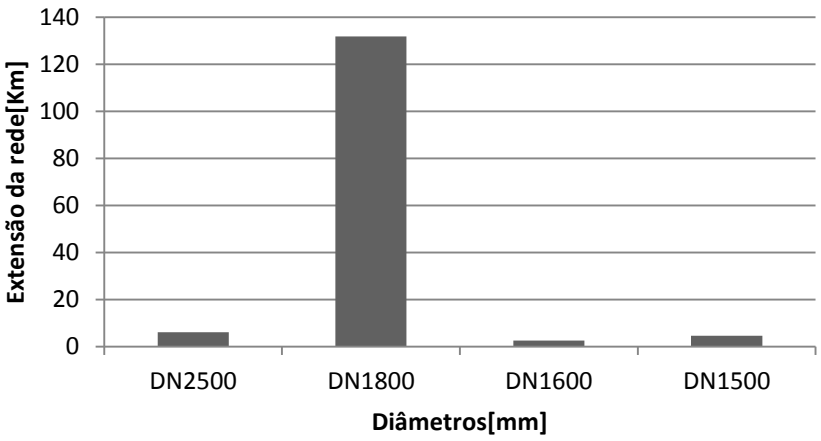

Figura 12--Disposição do Adutor do Castelo do Bode por diâmetro das tubagens

É perceptível que as tubagens mais utilizadas têm DN 1800, sendo este utilizado em aproximadamente 90% da extensão do Adutor.

Quanto a materiais utilizados ao longo da extensão do adutor referido, são usados vários, cuja disposição se encontra seguidamente representada.

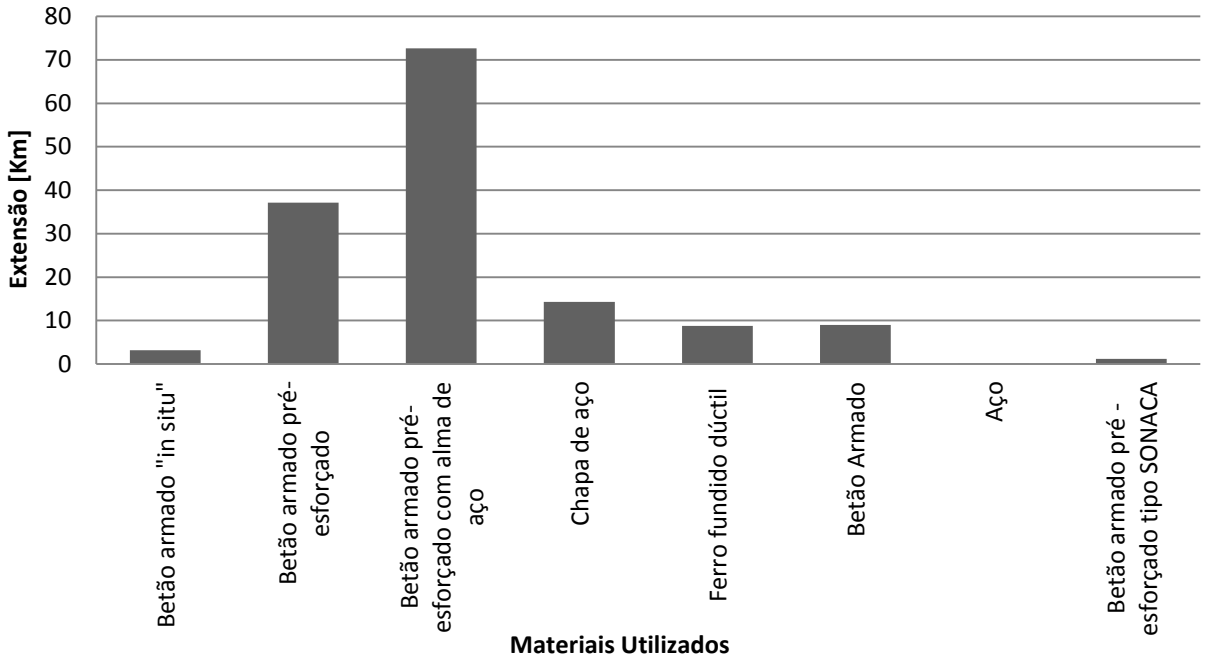

Figura 13- Disposição do Adutor de Castelo do Bode por materiais

Esta diversidade deve-se a questões técnicas e económicas diversas, constatando-se que o material mais usado é o Betão armado pré-esforçado, sendo o uso de Aço residual.

Figura 14-Sistema de adução da EPAL (Fonte:EPAL)

A Figura 14 representa o sistema de adução da EPAL, estando o adutor de Castelo do Bode representado a verde.

5.4.Procedimentos operacionais de inspecção

A unidade de inspecções da EPAL realiza na esmagadora maioria das vezes Inspecção Técnica Visual (ITV) (com entrada humana), exigindo-se para a realização da mesma que o DN seja superior a 1800mm. Muito esporadicamente executaram-se inspecções com recurso a "eddy currents" e CCTV. Por terem sido realizadas de forma esporádica, não existe um registo consistente que permita uma análise global do sistema, servindo apenas para averiguar sobre o estado de condição específico de determinados troços. A realização do tratamento de dados provenientes de inspecções é um processo em desenvolvimento na EPAL, pelo que a realização de inspecções pode futuramente ser feita de forma mais cirúrgica. O plano de inspecções existente estipula a realização das mesmas de 5 em 5 anos. Caso sejam detectadas anomalias consideradas preocupantes, o intervalo de tempo para a próxima inspecção no troço em questão será reduzido para 2 anos

e, caso se constate que o estado de condição do troço é bastante satisfatório, o intervalo de tempo até à próxima inspecção é alargado para 7 anos.

O processo de inspecção requer a entrada de 1 equipa de três ou quatro elementos para o interior do adutor. Ao nível de meios, utilizam-se máquinas fotográficas digitais, odómetro, perfis da conduta, elementos de registo de anomalias e outros pequenos utensílios de apoio às actividades de inspecção.

É feito o registo das anomalias observadas à medida que a conduta é percorrida, encontrando-se o exemplo de uma folha de registos em anexoIII-Quadro A4.

Figura 15-Inspecção Técnica Visual (Fonte:EPAL)

5.5.Análise dos resultados das inspecções e atribuição de estados

5.5.1.Modelo em vigor

Presentemente a EPAL utiliza um sistema próprio, algo subjectivo e trabalhoso de transposição dos resultados das inspecções para estados de condição. Inicialmente procede-se ao registo das anomalias detectadas no decorrer das inspecções. Posteriormente e, tendo os registos das anomalias ao longo da totalidade do desenvolvimento do troço que se pretende classificar é preenchida uma ficha de inspecção, anexo III-Quadro A5. Essa ficha consiste na atribuição de um estado de conservação variável entre 1 e 5 a cada um dos indicadores analisados. O preenchimento desta ficha é um processo subjectivo, sendo prática corrente comparar as produzidas por todos os elementos envolvidos no processo de inspecção de modo a obter uma classificação mais credível.

Seguidamente é feita uma ponderação sobre a importância dos elementos observados para o estado de condição final e assim se obtém o estado de conservação global do troço. Estado final esse que se encontrará numa escala entre 1 e 5, sendo o estado 1 considerado muito bom e o estado 5 muito mau.

Quadro 18- Definição dos estados de condição

Muito Bom	Componente em boas condições físicas, estruturais e funcionais. Componente com elevada probabilidade de manutenção das actuais condições a longo prazo. Alguns defeitos sem importância no comportamento e durabilidade do componente. Não é necessário efectuar qualquer reparação. **Requer apenas manutenção corrente**
Bom	Componente em aceitáveis condições físicas, estruturais e funcionais. Componente com risco mínimo de falha (a médio/longo prazo). Pequenos defeitos que não afectam de forma significativa a durabilidade global da estrutura. Requer apenas manutenção corrente ou intervenções pequenas e localizadas. **Intervenções não prioritárias**
Razoável	Componente evidenciando alguma deterioração relevante e durabilidade afectada. Nível de serviço mantém-se razoável a curto prazo. Componente com elevada probabilidade de queda do nível de serviço a médio prazo. Necessidade de reparar/substituir algum (ns) componente (s) a médio prazo. **Intervenção a médio prazo (3 a 5 anos)**
Mau	Componente com deterioração do nível de serviço a curto prazo (1 - 2 anos). Componente defeituoso com influência no comportamento e durabilidade da estrutura. Ausência de risco imediato ao nível da segurança. Intervenção a curto prazo para repor os níveis de serviço. Pode ser especificada a necessidade de reparar/substituir componente (s) ou a elaboração de projecto. **Intervenção a curto prazo (1 a 2 anos)**
Muito Mau	Componente com falha crítica detectada ou possibilidade de falha iminente (colapso). Necessidade de reparar/substituir imediatamente a maioria dos componentes. Risco elevado quer ao nível da segurança dos utilizadores, quer da operacionalidade. Trabalhos de reparação/substituição necessários urgentemente. **Intervenção imediata!**

5.5.2.Análise Efectuada

Obter apenas a classificação global dos troços analisados não seria suficiente para elaborar uma análise de Markov, nomeadamente para a construção da matriz de intensidade. Tal limitação deve-se às poucas transições de estado observadas, caso a deterioração fosse analisada desta forma e à heterogeneidade verificada ao longo da extensão dos troços, nomeadamente no que se refere a condições de operação, meio envolvente e da própria instalação, reflectindo-se estas características em taxas de deterioração diversas. Os registos de inspecções provam isso mesmo, existindo trechos construídos na mesma altura e com as mesmas características físicas, que se encontram em estados de conservação completamente diferentes.

Desta forma, a abordagem mais correcta consiste na comparação da evolução do estado de condição de trechos cujas características da envolvente, de operação e, da própria instalação sejam o mais próximas possível. A abordagem seguida consiste em analisar as transições de estado sofridas por trechos de 7 metros, uma vez ser esta a dimensão média entre juntas e existirem registos que o permitam, fazendo assim com que haja uma boa homogeneização de todas as características envolvidas no processo de deterioração.

Atribuir um a um o estado de condição da forma anteriormente referida (modelo em vigor EPAL) a trechos de 7 metros, integrantes do conjunto das condutas analisadas, totalizando estas uma extensão superior a 20 km, não é viável, pelo que se utilizou a metodologia de pontuações proposta no capítulo anterior. Programou-se então folhas de cálculo em excel de modo a que a atribuição de pontuações às anomalias registadas fosse feita de forma célere, tendo sempre como base Quadro A3, presente em anexo III.

Os primeiros registos disponibilizados pela EPAL relativos a inspecções efectuadas remontam a 2008, sendo que anteriormente a esta data os procedimentos internos eram diferentes, não havendo registos rigorosos o suficiente que permitissem uma análise deste género. A grande maioria dos troços só foram inspecionados por uma vez, existindo no entanto algumas exceções.

Os troços analisados são todos eles pertencentes ao adutor do Bode, tendo sido construídos em finais da década de 1980. O DN predominante é 1800mm, sendo o material utilizado quase na totalidade betão armado. As principais anomalias registadas são do tipo fendilhação e fissuração nas paredes interiores, registando-se também em número considerável abertura de juntas e fissuração nas mesmas. No túnel do Bode em específico, registam-se bastantes infiltrações, desde a forma de humidade à forma de fluxo contínuo.

A totalidade dos trechos analisados, pertencentes a troços do adutor de Castelo do Bode, encontram-se distribuídos pelos 5 estados de condição conforme exposto na Figura 16. Estão representados graficamente trechos inspeccionados tanto por uma como por duas vezes. O estado global das instalações é bastante positivo.

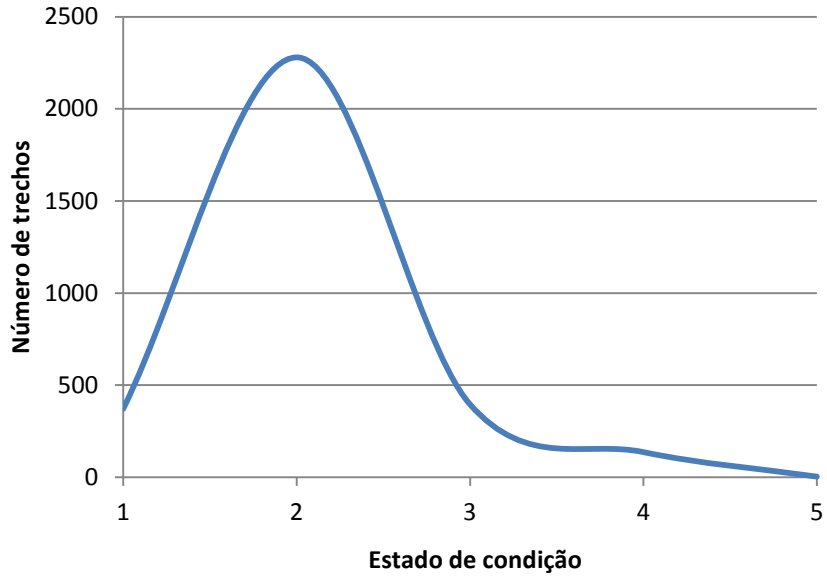

Figura 16- Distribuição dos trechos pelos estados de condição

5.6.Previsão de estados futuros

5.6.1.Processo de Markov em tempo contínuo

Conforme exposto no capítulo 3, o processo de Markov conduz a um eficiente modelo de previsão do desempenho. Este modelo, cujo funcionamento se encontra detalhadamente explicado no ponto 3.5, permite a ocorrência de transições numa escala de tempo contínua. (Kallen e Van Noortwijk, 2006; Ng e Moses, 1999; Yang *et al.*, 2009).

5.6.2.Modelo de deterioração

Num processo em tempo contínuo, a construção do modelo passa por estimar uma matriz de intensidade de transição Q, significando esta fisicamente as taxas de transição entre estados de condição. Relaciona-se directamente com qualquer matriz de Markov P, representando a matriz P as diferentes combinações possíveis (P_{ij}) para o Δt pretendido.

Conforme referido no ponto 3.4 e, tirando partido das propriedades da função exponencial, a metodologia de cálculo de uma matriz P, segue a seguinte formulação (Kallen e Van Noortwijk, 2006):

$$\mathrm{P}(\Delta t) = e^{Q \times \Delta t} \qquad \textbf{[16]}$$

A matriz P é a solução da equação diferencial de primeira ordem denominada por equação de Chapman-Kolmogorov (Hillier e Lieberman,2001).

$$\frac{\delta}{\delta \mathrm{t}} P(\Delta t) = P(\Delta t)\, Q \qquad \textbf{[17]}$$

A matriz P é então determinada a partir de uma matriz de intensidade Q com a mesma dimensão. Assumindo que durante o processo de deterioração não é possível a ocorrência de melhoria do estado de condição e, que o modelo de avaliação de condutas proposto contempla 5 estados, então a matriz Q é uma matriz 5x5, tomando todos os elementos da matriz Q inferiores à diagonal principal o valor zero.
A matriz de intensidade, Q, satisfaz ainda as condições seguintes (Kalbfleisch e Lawless, 1985):

1. $qij > 0$ para $j - i = 1$
2. $qii = -\sum_{j \neq i} qij$ com $i = 1.....; k$ sendo k o número total de estados de condição
3. $qij = 0$ para $i > j$
4. $qij = 0$ para $j - i > 1$
5. $qij = 0$ para $i; j = k$

Considerando todas as condições anteriores, a matriz intensidade (Q) tem a seguinte forma:

$$Q = \begin{vmatrix} -\Theta 1 & \Theta 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Theta 2 & \Theta 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Theta 3 & \Theta 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\Theta 4 & \Theta 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \textbf{[18]}$$

Sendo,

$$\begin{vmatrix} \Theta 1 \\ \Theta 2 \\ \Theta 3 \\ \Theta 4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} q12 \\ q23 \\ q34 \\ q45 \end{vmatrix}$$

A primeira condição obriga a que as probabilidades de transição entre estados sucessivos seja maior do que zero, permitindo assim ao processo transitar por todos eles, até chegar o estado absorvente.

A segunda condição afirma que a probabilidade do processo transitar do estado i por cada unidade de tempo que aí permanece é igual ao simétrico do somatório dos qij respectivos.

A terceira condição reflecte a impossibilidade de melhoria de estado de condição durante um processo de deterioração.

A quarta condição referida anteriormente implica que durante o processo de deterioração o estado de condição passe pelos sucessivos estados, não sendo permitidos "saltos", isto é, um processo que se encontre no estado j, para alcançar o estado de condição j+2 terá obrigatoriamente de passar pelo estado j+1.

A quinta propriedade indica o pior dos estados considerados, isto é, o estado absorvente.

5.6.3.Estimativa da matriz intensidade Q

A obtenção da matriz Q é um passo fundamental no processo de avaliação da deterioração segundo o modelo de Markov. Desta depende a matriz markoviana P, para qualquer intervalo de tempo considerado.

Inicialmente é necessário obter os valores Θ_i. Estes são obtidos com recurso a uma base de dados, correspondendo essa a um historial de inspeccções realizadas a um conjunto de condutas com características semelhantes e tendo estas sido alvo de duas ou mais inspecções.

No presente caso de estudo e após aplicação do modelo de classificação de condutas proposto no capítulo 4, torna-se possível construir a matriz de intensidade, sendo apenas úteis neste processo os troços inspecionados por duas ou mais vezes.

Conforme referido anteriormente neste documento, o registo de inspecções realizado pela EPAL é relativamente recente, como tal, de todo o universo de condutas analisadas e à data da realização do presente estudo, apenas as seguintes foram inspeccionadas por duas ou mais vezes:

Quadro 19-Troços usados na construção da matriz de intensidade

Troço	Extensão (m)	Data da 1ª inspecção	Data da 2ª inspecção	DN(mm)
Adutor de Castelo de Bode -Túnel de Malpique	820	Abril 2009	Novembro 2010	1800
Adutor de Castelo de Bode -Túnel do Bode	1015	Novembro 2008	Novembro 2010	3000
Adutor de Castelo de Bode-Túnel Zootécnica	246	Abril 2009	Novembro 2010	1800
Adutor de Castelo de Bode-Túnel do vale de Santarém	188	Abril 2009	Novembro 2010	1800
Adutor de Castelo de Bode- Troço entre a V16B e Túnel da Azambuja	1882	Abril 2009	Novembro 2011	1800

Na construção da matriz Q devem ser utilizados registos de inspecções efectuados a condutas com características semelhantes quanto à dimensão e ao material constituinte. Quanto mais semelhantes forem as condutas, cujos registos de inspecções são utilizados na construção da matriz, mais preciso será o modelo construído. De referir que todos os elementos presentes no Quadro 19 foram construídos entre os anos de 1985 e 1990, sendo os túneis betonados in situ e, as restantes tubagens de DN1800mm, pré-fabricadas em betão com alma de aço do tipo PREBESAN, com juntas soldadas.

O intervalo entre inspecções é curto, não se verificando na grande maioria dos trechos analisados variação no estado de condição.

Conforme referido no capítulo 4, aquando da explicação do modelo de classificação proposto, estes troços são subdivididos em trechos de 7 metros, sendo atribuída a cada, uma classificação de 1 a 5, consoante as anomalias registadas.

No seguinte quadro apresenta-se o número de transições de estado de condição registado, entre todos os trechos de 7 metros pertencentes aos troços referidos no Quadro 19.

Quadro 20-Nº de transições de estado registadas

Inicial/Final	1	2	3	4	5
1	155	55	5	8	0
2	30	307	26	46	0
3	4	7	30	10	0
4	1	0	0	3	1
5	0	0	0	1	1

Dado o intervalo de tempo entre inspecções ser curto, a esmagadora maioria dos elementos não sofreu alteração de estado de condição. As melhorias de estado de condição registadas são justificadas por intervenções de reparação no intervalo entre inspecções e por incertezas inerentes à elaboração dos registos.

É frequente serem feitas ligeiras reparações, aproveitando os intervalos em que as condutas são colocadas fora de serviço para a realização das inspecções.

Feita a atribuição e análise da evolução dos estados de condição, é então possível e, segundo Jackson (2007), calcular a matriz Q. No capítulo 3, equações 5 e 6, encontra-se a definição matemática da abordagem seguidamente exposta.

$$\theta i = qij = \frac{nij}{\sum \Delta ti} \qquad [19]$$

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

Aplicando o procedimento descrito aos segmentos analisados e, tendo em conta a equação 19 foram obtidos os seguintes valores:

$$\begin{vmatrix} \Theta 1 \\ \Theta 2 \\ \Theta 3 \\ \Theta 4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.127 \\ 0.041 \\ 0.155 \\ 0.120 \end{vmatrix}$$

No Quadro 21 encontra-se o tempo, em anos, correspondente a ∑Δti:

Quadro 21- Somatório dos intervalos de tempo entre observações, cujo estado inicial é i (anos)

Estado inicial i	1	2	3	4	5
∑Δti (anos)	472	639	65	8	2

O facto de serem considerados 5 estados de condição e só serem calculadas 4 taxas probabilísticas de transição tem a ver com o facto de o estado de condição 5 ser absorvente. (ver 3.4.6.2).

Desta forma e, respeitando as condições presentes em 5.4.2, a matriz intensidade Q é:

$$Q = \begin{vmatrix} -0.117 & 0.117 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.041 & 0.041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.155 & 0.155 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.12 & 0.12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Figura 17- Matriz de intensidade

5.6.4.Estimativa do tempo de permanência nos vários estados de condição

Segundo Hillier e Lieberman (2001) é possível estimar o tempo médio T_i que uma conduta permanece num determinado estado de condição, antes de transitar para o seguinte. É importante consultar o exposto no ponto 3.5 referente ao processo de Markov, mais propriamente a equação 7.

Desta forma obtém-se:

$$Ti = \frac{1}{\theta i} \qquad \textbf{[20]}$$

Sendo i = 1,2,3…,k estados de condição-1.

Aplicando a equação 20 à matriz Q, obtêm-se os resultados apresentados de seguida:

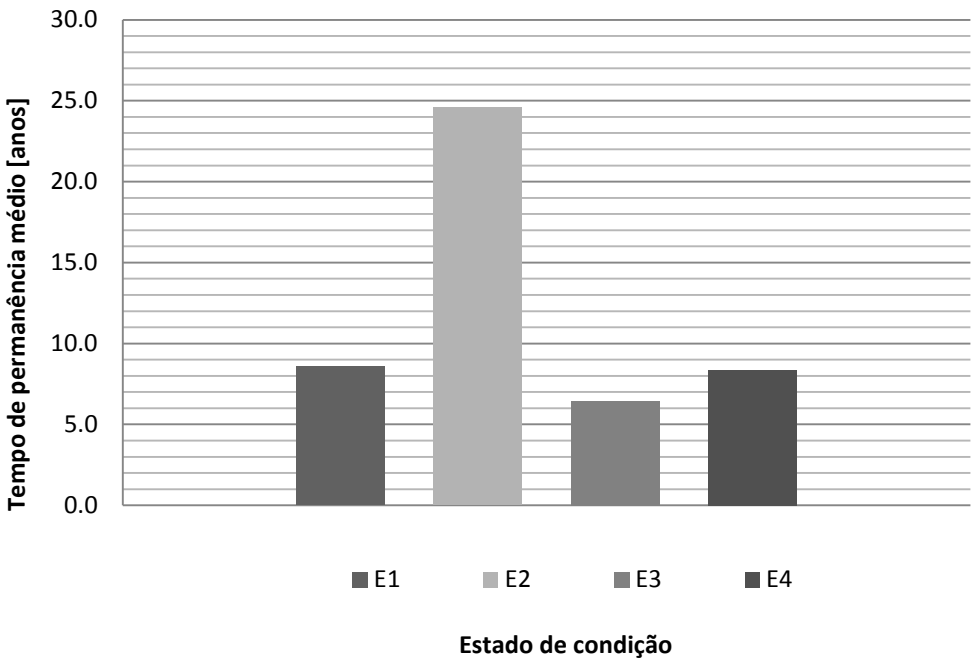

Figura 18- Tempo de permanência esperado

Constata-se que o menor tempo de permanência esperado antes da transição ocorre no estado de condição 3 e o maior no estado 2.

Uma vez que o principal objectivo da criação do modelo de Markov contínuo no tempo é prever o desempenho futuro de condutas existentes, estes resultados fornecem uma estimativa do tempo que as mesmas permanecerão em cada um dos estados de condição, sendo mais um indicador com o qual as entidades gestoras podem contar.

5.6.5.Evolução das probabilidades de transição ao longo do tempo

Após obtenção de uma estimativa da matriz intensidade, importa compreender a evolução das probabilidades de transição, Pij, ao longo do tempo. Efectua-se esta análise para um horizonte de 80 anos.

Resumidamente, pretende-se obter as probabilidades de transição do estado de condição das condutas analisadas, ao longo dos vários intervalos de tempo pertencentes ao horizonte estipulado.

Considerando que os estados de condição das condutas podem-se encontrar entre 1 e 5, calculam-se as probabilidades de transição dos mesmos para um horizonte de 80 anos, desenvolvendo-se o processo de deterioração a partir do estado de condição atribuído no momento da realização da inspecção.

Exemplifica-se seguidamente o cálculo das probabilidades de transição para um intervalo de 10 anos, de uma conduta cujo estado de condição inicial é 3.

Exemplo

Inicialmente é necessário calcular a matriz Pij, correspondente ao intervalo de tempo pretendido, conforme se ilustra de seguida:

$$\mathrm{P}(\Delta t = 10) = e^{Q \times \Delta t} = e^{Q \times 10} = \begin{vmatrix} 0.29 & 0.57 & 0.09 & 0.04 & 0.01 \\ 0 & 0.66 & 0.17 & 0.12 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.19 & 0.41 & 0.40 \\ 0 & 0 & 0 & 0.28 & 0.72 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \textbf{[21]}$$

Posteriormente multiplica-se um vector correspondente ao estado inicial (estado 3) da conduta, pela matriz anterior:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0.29 & 0.57 & 0.09 & 0.04 & 0.01 \\ 0 & 0.66 & 0.17 & 0.12 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.19 & 0.41 & 0.40 \\ 0 & 0 & 0 & 0.28 & 0.72 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0.19 & 0.41 & 0.40 \end{vmatrix} \quad \textbf{[22]}$$

Significando isto que num intervalo de 10 anos, uma conduta que inicialmente se encontre no estado 3, tem 19% de probabilidade de continuar no mesmo estado,41% de probabilidade de ter transitado para o estado de condição 4 e 40% de probabilidade de essa transição ter sido para o estado 5, tendo obrigatoriamente de ter passado pelo estado 4 neste último caso. Este raciocínio foi aplicado para os 5 estados de condição inicial possíveis, para um horizonte temporal de 80 anos. Apresenta-se seguidamente em forma gráfica, Figuras 19 a 23, os resultados alcançados. Em anexo IV encontram-se as tabelas com os vectores de probabilidades correspondentes à evolução do processo de deterioração ao longo do horizonte analisado.

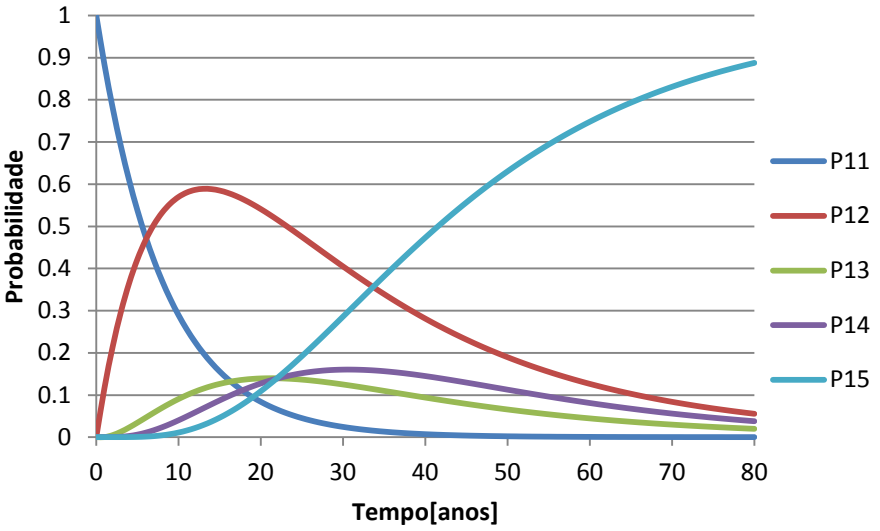

Figura 19- Evolução de Pij para estado de condição inicial 1

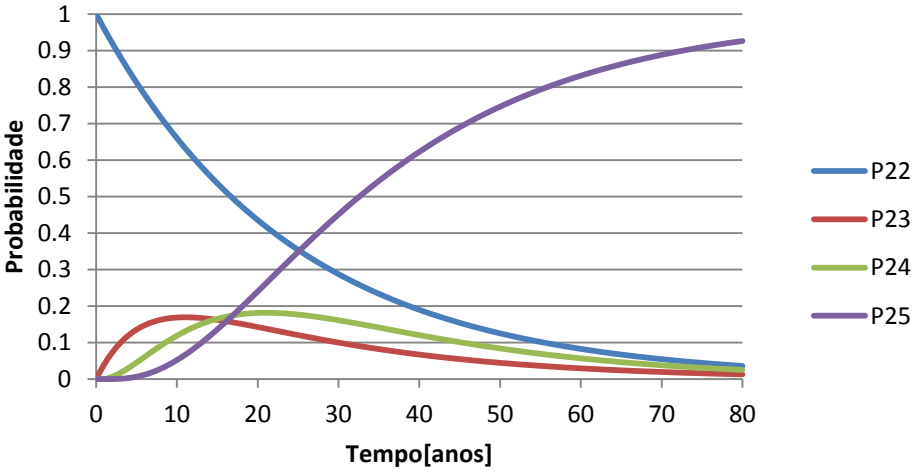

Figura 20- Evolução de Pij para estado de condição inicial 2

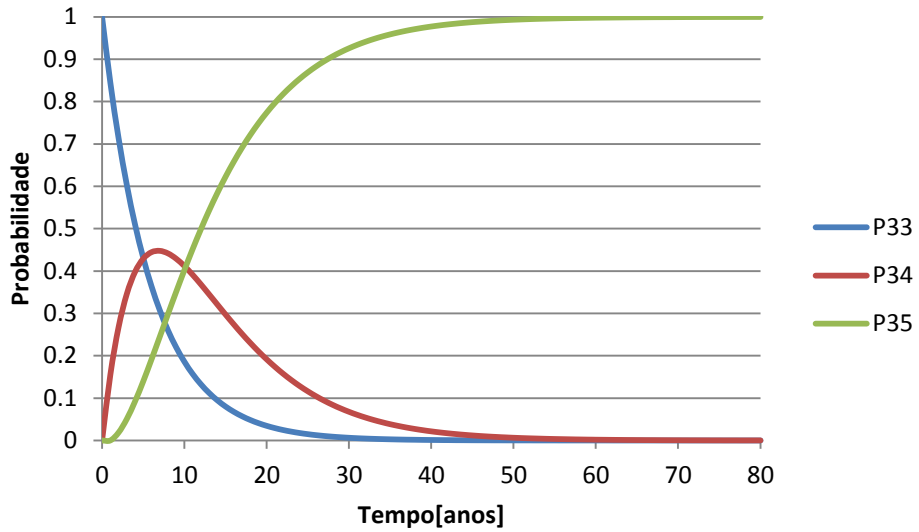

Figura 21- Evolução de Pij para estado de condição inicial 3

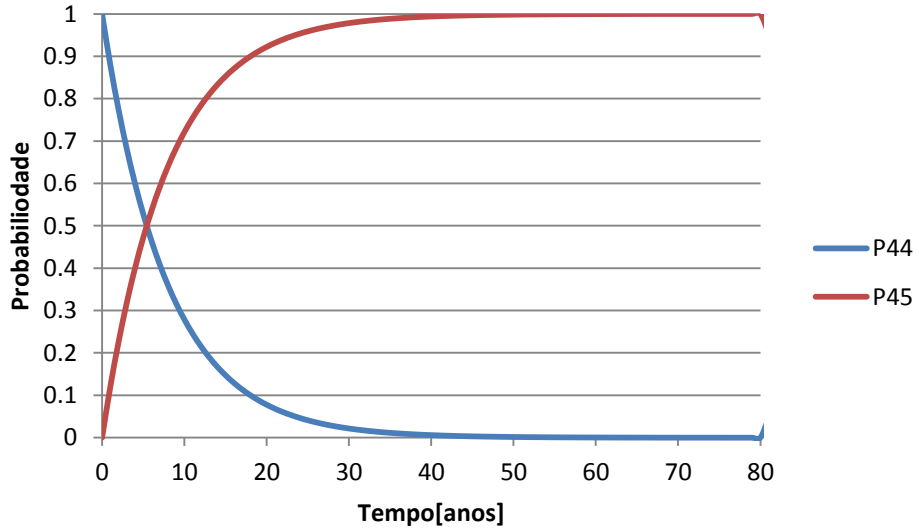

Figura 22- Evolução de Pij para estado de condição inicial 4

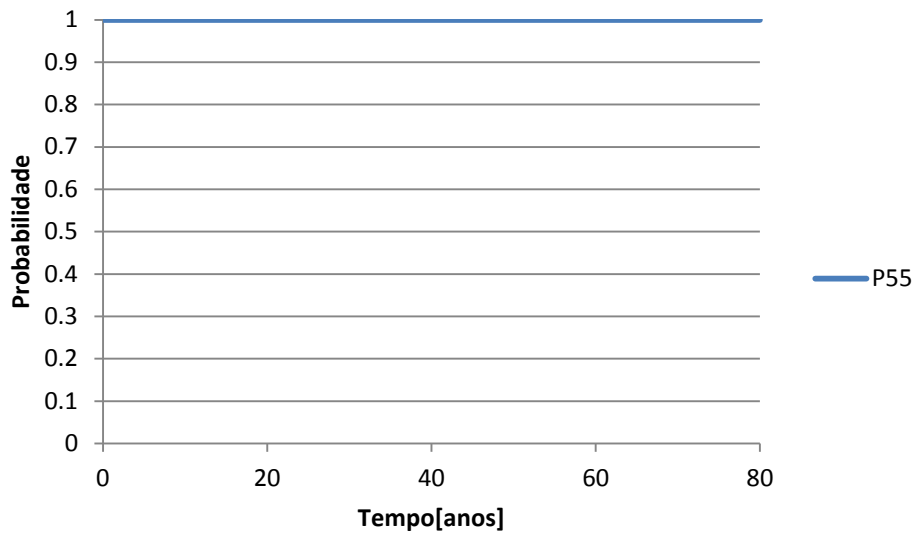

Figura 23- Evolução de Pij para estado de condição inicial 5

Da observação das figuras 19,20,21,22 e 23 constata-se o seguinte:

- Exceptuando o que sucede com o estado 5, uma vez que este é absorvente, a probabilidade da conduta permanecer no estado inicial decresce ao longo dos anos, aproximando-se do valor 0.
- O somatório das probabilidades é igual a 1 para todos os instantes temporais.
- As probabilidades P_{ij} com $i \neq j$ e $j \neq 5$, apresentam tendência de subida até determinado ponto, registando-se uma descida posterior. Esta constatação deve-se ao facto de após atingido esse instante temporal, tornar-se cada vez mais provável a transição para o estado seguinte.
- O estado 5 é o estado absorvente do processo de Markov, querendo isto dizer que uma vez atingido, o processo não sofrerá novas transições. Esta propriedade justifica o gráfico respectivo, tendo probabilidade 1 ao longo de todo o horizonte temporal.

5.6.6.Aplicação do modelo de deterioração a um conjunto de condutas

5.6.6.1. Exemplo do cálculo da evolução da condição média

Conforme referido anteriormente, a construção da matriz Q é fundamental em todo o processo de Markov. Desta forma, o processo de aplicação do modelo de deterioração a um conjunto de condutas inicia-se precisamente com a construção dessa mesma matriz. A matriz respectiva ao presente caso de estudo encontra-se na Figura 17. Após construção da matriz Q é possível aplicar o modelo de deterioração mesmo às condutas apenas inspeccionadas por uma vez, sendo esta a principal característica do modelo de Markov em cadeia.

Conhecendo as probabilidades de transição, representadas em, Figuras 19 a 23, é então possível prever a deterioração sofrida pelas condutas que se pretende analisar. Uma vez que as mesmas foram segmentadas em

trechos de 7 metros no processo de atribuição do estado de condição, é conhecido o número de trechos integrantes das condutas em análise que inicialmente se encontram em cada um dos 5 estados de condição.

A análise da deterioração global das condutas é feita prevendo as transições efectuadas por todos os trechos integrantes das mesmas, obtendo-se por fim uma curva de deterioração média global da conduta.

Exemplifica-se seguidamente o cálculo do estado de condição médio do troço **Túnel do Bode- Torre de Tom de Água - EE Castelo do Bode** para o ano 10 (10 anos após aplicação do modelo).

Dividindo a totalidade da conduta a analisar em trechos de 7 metros, contabilizam-se 145 trechos. Esses 145 elementos encontram-se distribuídos pelos cinco estados de condição da seguinte forma:

Quadro 22- Distribuição inicial dos trechos do Túnel do Bode pelos estados de condição

Estado i	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Nº trechos	59	33	39	12	2

Conforme exposto anteriormente neste documento, são conhecidas as probabilidades de transição para um horizonte de 80 anos.

As probabilidades de transição no ano 10,referentes a cada um dos 5 estados de condição inicial possíveis, são as seguintes: (Retirado dos Quadros A6,A7,A8 e A9 em Anexo IV).

Quadro 23- Probabilidades de transição do estado de condição inicial 1

Ano/Estado de condição	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
0	1	0	0	0	0
…	…	…	…	…	…
10	0.29	0.57	0.09	0.04	0.01

Quadro 24- Probabilidades de transição do estado de condição inicial 2

Ano/Estado de condição	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
0	0	1	0	0	0
…	…	…	…	…	…
10	0.00	0.66	0.17	0.12	0.05

Quadro 25- Probabilidades de transição do estado de condição inicial 3

Ano/Estado de condição	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
0	0	0	1	0	0

…	…	…	…	…	…
10	0.00	0.00	0.19	0.41	0.40

Quadro 26- Probabilidades de transição do estado de condição inicial 4

Ano/Estado de condição	1	2	3	4	5
0	0	0	0	1	0
…	…	…	…	…	…
10	0.00	0.00	0.00	0.28	0.72

O estado 5 sendo estacionário, não contempla a possibilidade de transição de estado.

Finalmente é possível calcular o **estado de condição médio** da totalidade do troço em estudo ao fim de 10 anos, tendo em consideração o seu estado de condição inicial. Estado de condição inicial definido pela distribuição dos trechos de 7 metros pelos 5 estados admissíveis. (Quadro 22).

Multiplica-se então o número de trechos de 7 metros que inicialmente se encontrem em cada um dos 5 estados pelo vector representativo das probabilidades de transição desses mesmos estados ao fim de 10 anos (Quadro 23,Quadro 24,Quadro 25,Quadro 26).

Exemplifica-se de seguida o cálculo efectuado:

59 x	0.29	0.57	0.09	0.04	0.01	=	17.08	33.59	5.33	2.36	0.64
33 x	0.00	0.66	0.17	0.12	0.05	=	0.00	21.78	5.58	3.93	1.71
39 x	0.00	0.00	0.19	0.41	0.40	=	0.00	0.00	7.25	16.06	15.69
12 x	0.00	0.00	0.00	0.28	0.72	=	0.00	0.00	0.00	3.35	8.65
2 x	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	=	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00
					Total		17.08	55.37	18.17	25.69	28.70

[23]

Posteriormente é necessário construir o vector de probabilidades de transição correspondente à totalidade do troço em análise. Para isso divide-se os elementos do vector "Total", presente na equação 23, pelo número total de trechos analisados, que no presente exemplo são 145.

A metodologia anterior conduz ao seguinte resultado:

Quadro 27-Estado de condição do Túnel do Bode no ano 10

Estado de condição	1	2	3	4	5
Probabilidades	0.12	0.38	0.13	0.18	0.20

Por fim e, fazendo o somatório da multiplicação das probabilidades pelos respectivos estados, é possível obter o estado de condição médio do troço em análise para o instante temporal pretendido(10 anos).

$$1 \times 0.12 + 2 \times 0.38 + 3 \times 0.13 + 4 \times 0.18 + 5 \times 0.20 = 2.96 \quad \textbf{[24]}$$

Como se pode constatar, o estado de condição médio ao fim de 10 anos aumentou relativamente ao estado de condição médio inicial, representando uma natural deterioração sofrida pelo troço. A equação 25 é representativa do estado de condição médio inicial.

$$1 \times 59/145 + 2 \times 33/145 + 3 \times 39/145 + 4 \times 12/145 + 5 \times 2/145 = 2.07 \quad \textbf{[25]}$$

Exemplificou-se anteriormente o processo de cálculo da deterioração sofrida por um troço de conduta para um horizonte temporal de 10 anos.

Seguindo a lógica anterior é possível obter as transições do estado de condição ao longo dos intervalos de tempo pretendidos.

5.6.6.2.Previsão da deterioração sofrida pelas tubagens estudadas

Nesta fase pretende-se aplicar todo o processo de previsão da deterioração descrito anteriormente às condutas cujos registos de inspecções foram fornecidos pela EPAL. Aplica-se o modelo a troços integrantes do adutor de Castelo do Bode. Estes apresentam características físicas muito semelhantes, tendo sido construídos na mesma época. Apresenta-se de forma gráfica a evolução do estado de condição médio dos mesmos.

Adutor de Castelo do Bode-Túnel do Bode(Torre de Tomada de Água - EE Castelo do Bode)

Os trechos classificados encontram-se distribuídos da seguinte maneira. A condição média inicial é 2.07.

Quadro 28- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do Túnel do Bode

Estado i	1	2	3	4	5
Nº trechos	59	33	39	12	2

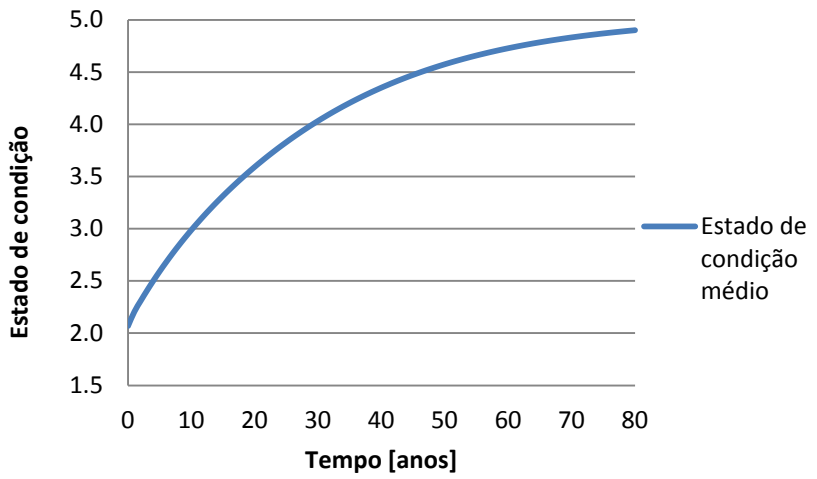

Figura 24--Evolução do estado de condição médio do Túnel do Bode

Adutor de Castelo do Bode -Troço entre a V16B e o Túnel da Azambuja

O estado de condição médio inicial é 2.17.

Quadro 29- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço entre V16B e o Túnel da Azambuja

Estado i	1	2	3	4	5
Nº trechos	1	296	42	9	0

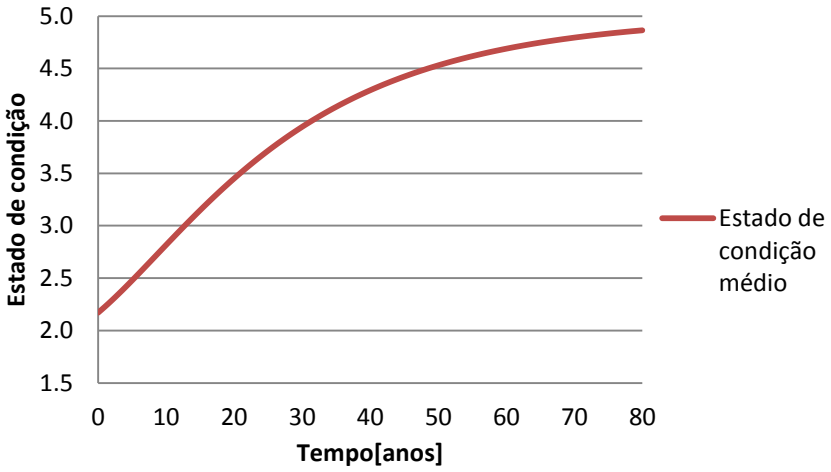

Figura 25- Evolução do estado de condição médio do troço V16B-Túnel da Azambuja

Adutor de Castelo do Bode-troço entre V11-V12

Quadro 30— Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço entre V11V12-Santarém-montante

Estado i	1	2	3	4	5
Nº trechos	1	623	59	3	0

O estado de condição médio inicial é 2.09.

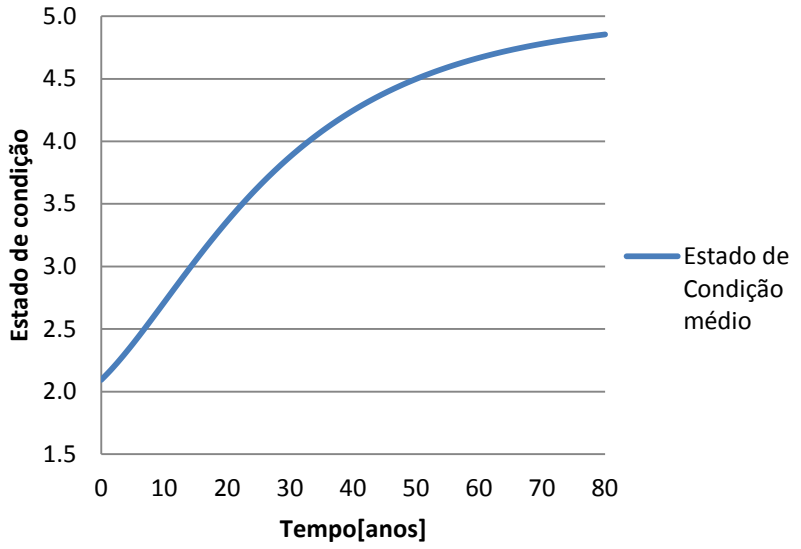

Figura 26- Evolução do estado de condição médio do troço V11V12-Santarém montante

Adutor de Castelo do Bode-Troço entre V13B-V14

Quadro 31- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço entre V13B-V14

Estado i	1	2	3	4	5
Nº trechos	36	744	74	12	0

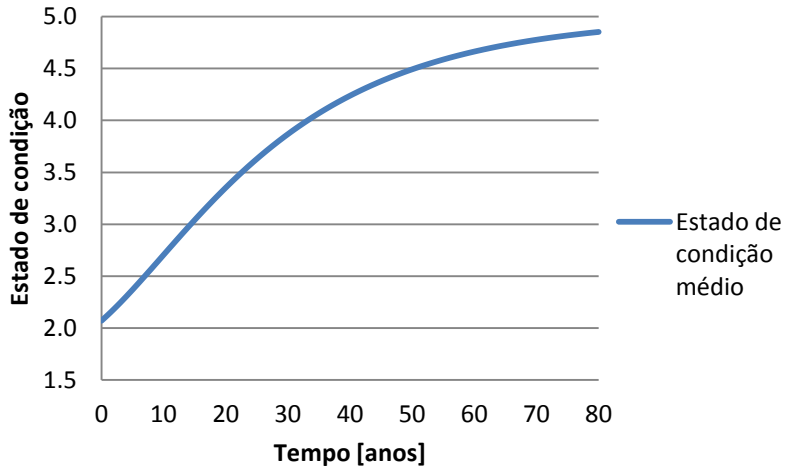

Figura 27- Evolução do estado de condição médio do troço V13B-V14

Adutor de Castelo de Bode – Túnel de Malpique

Quadro 32- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do Túnel de Malpique

Estado i	1	2	3	4	5
Nº trechos	76	22	13	6	0

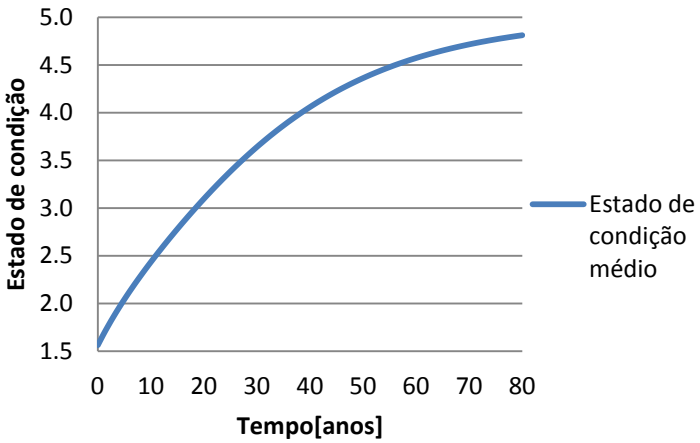

Figura 28- Evolução do estado de condição médio do túnel de Malpique

Adutor de Castelo de Bode –Troço entre V7-V8

Quadro 33- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço V7-V8

Estado i	1	2	3	4	5
Nº trechos	24	538	170	5	0

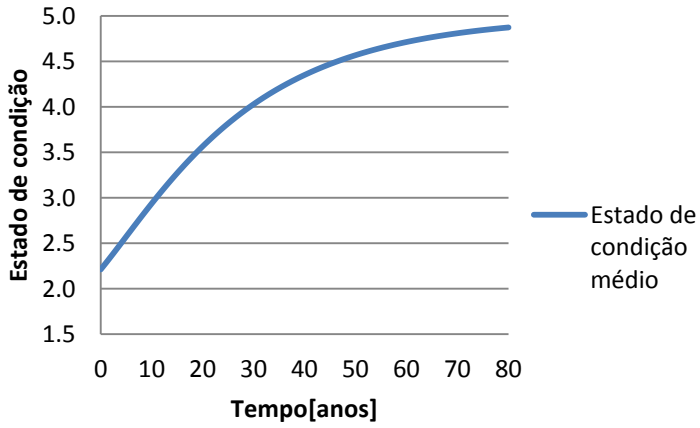

Figura 29- Evolução do estado de condição médio do troço V7-V8

Adutor de Castelo de Bode –Troço entre P71-V17

Quadro 34- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição do troço P71-V17

Estado i	1	2	3	4	5
Nº trechos	222	29	14	1	0

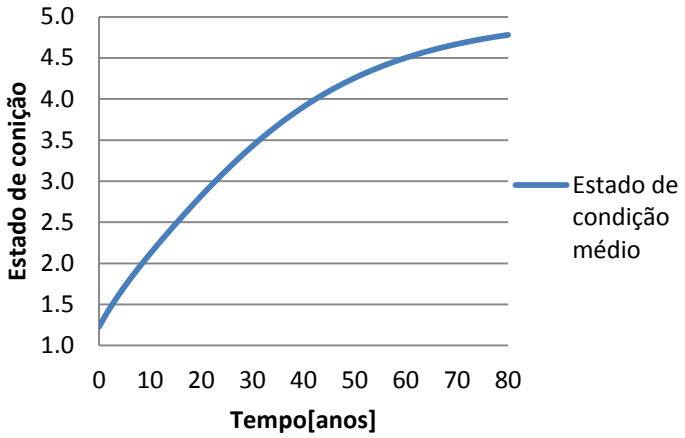

Figura 30- Evolução do estado de condição médio do troço P71-V17

Adutor de Castelo de Bode –Totalidade dos troços analisados

Quadro 35- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição da totalidade dos troços analisados

Estado i	1	2	3	4	5
Nº trechos	419	2285	411	48	2

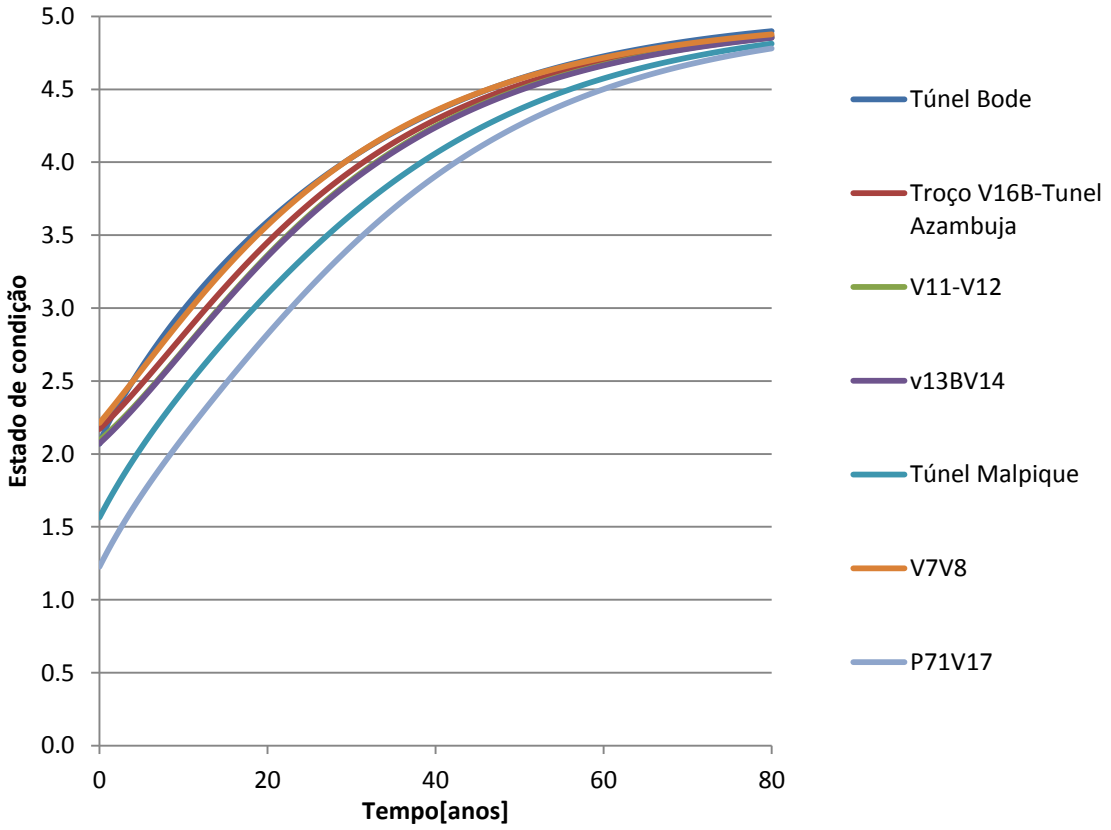

Figura 31-Evolução do estado de condição médio da totalidade dos troços analisados

5.6.7.Análise dos Resultados

Conforme se pode constatar, a esmagadora maioria dos trechos analisados encontram-se inicialmente no estado de condição 2, sendo os trechos pertencentes ao estado 5 apenas 2, o que é insignificante numericamente. Mesmo sendo apenas dois os trechos no estado 5, estes podem causar sérios problemas a toda a conduta, podendo mesmo inviabilizar a sua utilização.

Na seguinte figura encontra-se a evolução esperada da distribuição dos trechos pelos 5 estados de condição ao longo dos anos.

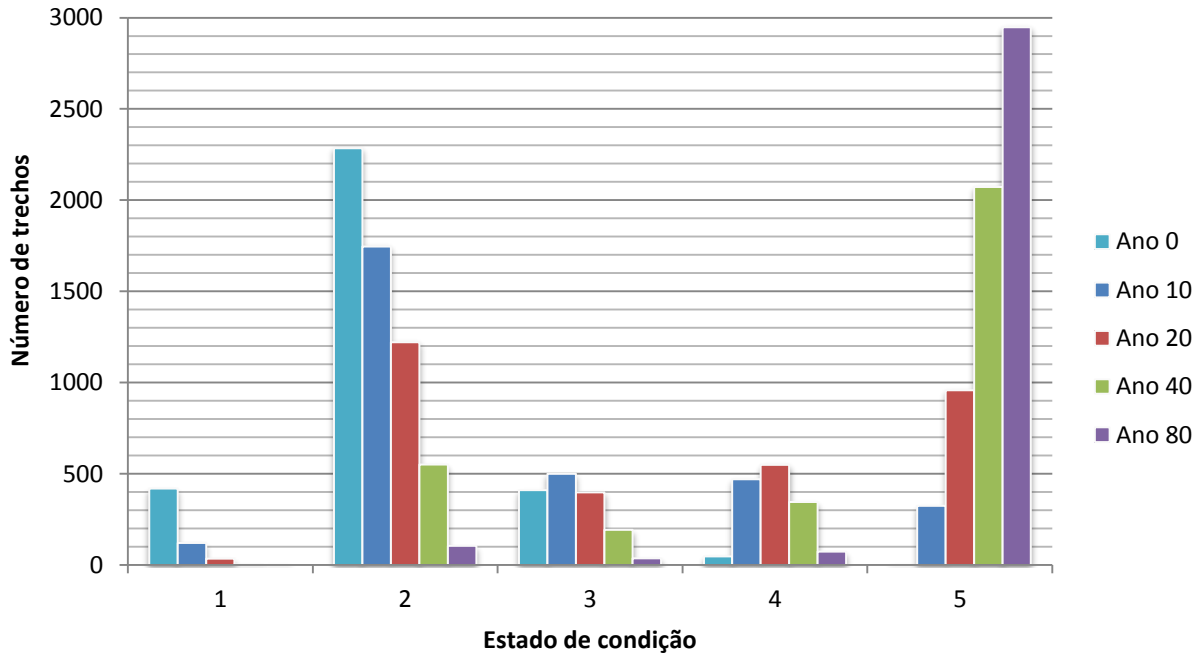

Figura 32- Distribuição dos trechos pelos estados de condição da totalidade dos troços analisados

Da análise da Figura 32 constata-se que o número de trechos cujo estado de condição é 1 e 2 decresce sucessivamente. Já a quantidade de trechos que apresentam estado de condição 5, tende a aumentar sucessivamente com o passar dos anos. O número de trechos cujo estado de condição é 3 e 4 corresponde situação intermédia, apresentando tendência de subida até determinado ponto, registando-se uma descida posterior. Tal constatação deve-se ao facto de após atingido esse instante temporal, tornar-se cada vez mais provável a transição para o estado seguinte.

Registaram-se inúmeras pequenas reparações, com carácter mais preventivo do que curativo (uma vez que servem essencialmente para colmatar fissuras de expressão reduzida). Estas foram realizadas presumivelmente há muitos anos, com recurso a produtos de natureza epoxídica, servindo para colmatar pequenas fissuras existentes em inúmeros locais da tubagem. Na maior parte dos casos, estas mesmas reparações já se encontram danificadas. A existência destas reparações altera ligeiramente a evolução dos estados de condição

comparativamente a um processo de deterioração de um sistema que não tenha sofrido qualquer manutenção.

Eventuais Imprecisões na elaboração dos registos, devido à subjectividade dos mesmos, é também uma questão a ter em conta.

Por outro lado e, dado que alguns dos trechos foram instalados de forma defeituosa, o seu processo de deterioração é também muito mais rápido do que o esperado. Estas particularidades têm de ser tidas em conta na análise dos resultados obtidos.

A época de construção dos troços analisados situa-se entre os anos 1985 e 1987.Este factor toma especial interesse na análise dos resultados, uma vez que segundo Kleiner e Rajani(2001), o ciclo de vida de uma conduta pode ser definido da forma expressa na figura 4.

Figura 33-Conduta de Abastecimento (Fonte:Redecor)

Em 3.2.2 encontra-se uma explicação detalhada da Bathtub, nomeadamente das suas três fases; “burn-in”,”In-usage phase” e “wear-out phase”.

O período de duração de cada fase pode variar bastante, consoante as condições envolventes e o próprio material da tubagem.

Dado que as tubagens analisadas têm cerca de 30 anos, não se encontram certamente na “Burn-in phase”.

Antes de qualquer análise dir-se-ia que muito provavelmente uma tubagem com esta idade se encontraria na "In-usage-phase" ou já na "Wear-out phase".

Segundo (Alegre e Covas, 2010), a vida útil técnica de uma conduta de Betão é de aproximadamente 50 anos, sendo este o período após a instalação durante o qual o desempenho do componente é o pretendido.
Analisando as Figuras 24 a 31 e comparando-as com a "Bathtub curve", constata-se que as tubagens analisadas encontram-se no início da terceira fase do ciclo de vida, prevendo-se que a curva representativa da evolução do estado de condição médio tenha aproximadamente o desenvolvimento da hipótese B expressa na figura 34. Nas figuras 25,26 e 27 é visível uma ligeira concavidade positiva até aproximadamente ao ano 10, apresentando as figuras 29 e 30 uma representação inicial quase rectilínea. Por fim, as figuras 24 e 28, representativas dos túneis do Bode e de Malpique respectivamente, apresentam concavidade negativa ao longo de todo o intervalo temporal analisado.

Desta breve análise pode-se tirar as seguintes conclusões quando feito o cruzamento com a curva "Bathtub".

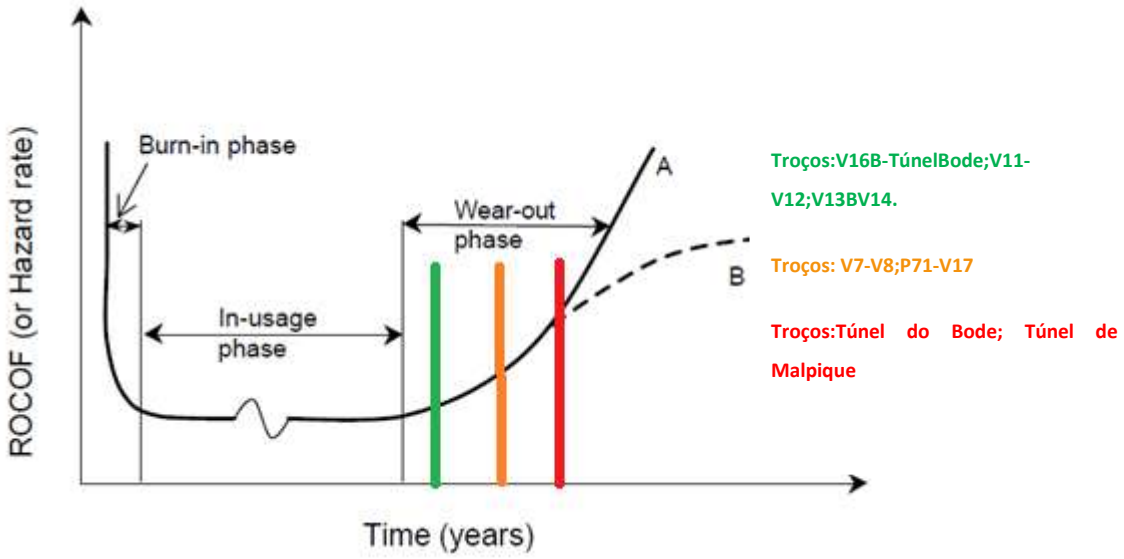

Figura 34- Fases do ciclo de vida das tubagens analisadas

Os troços respectivos às figuras 25,26 e 27, troço V16B-Túnel Azambuja,V11-V12 e V13BV14 encontram-se numa fase do ciclo de vida representado a verde na Figura 34.

Os troços cuja evolução do estado de condição médio é representado pelas figuras 29 e 30, V7-V8 e P71-V17 respectivamente, encontram-se actualmente numa fase do ciclo de vida representada a laranja na Figura 34.Os túneis do Bode e de Malpique, cuja evolução do estado de condição médio é representado pelas figuras 24 e 28 encontram-se num estado mais avançado do ciclo de vida, encontrando-se numa fase representada a vermelho na figura anterior.

O método construtivo dos túneis, bem como o facto de as suas dimensões serem diferentes dos demais troços pode ser justificativo de tal diferença de estado de condição inicial.

As sucessivas pequenas reparações efectuadas, juntamente com as condições de operação, as condições da envolvente, eventuais defeitos nos materiais utilizados bem como no processo de instalação, justificam as diferenças verificadas quanto à fase do ciclo de vida em que se encontram os vários troços analisados, uma vez que estes foram construídos no mesmo período. Analisando a Figura 31 respectiva ao estado de condição médio da totalidade dos troços analisados, constata-se que estes seguem o desenvolvimento típico das previsões de Markov(Representação B da Figura 34).

Conforme se pode verificar analisando a Figura 31,o modelo de Markov aplicado às condutas analisadas conduz a uma curva de deterioração com um crescimento inicialmente mais acentuado, verificando-se posteriormente, por volta do ano 80, uma tendência para a curva ficar tangente à linha representativa do pior estado de condição admissível.

5.7.Considerações sobre prioridades de intervenção

Não se pretende nesta fase proceder a uma análise criteriosa do risco associado a eventuais roturas no sistema de adução da EPAL, pretendendo-se apenas enumerar de forma generalizada as consequências causadas pela ocorrência das mesmas. A definição das prioridades de intervenção relaciona-se com o risco associado a uma eventual rotura. São abordadas de seguida as consequências associadas à ocorrência de roturas e posteriormente é feita uma breve definição de risco e de como deve ser feita a sua análise.

5.7.1.Consequências das roturas

Segundo Makar e Kleiner (2000), as consequências associadas às roturas podem ser divididas em três categorias principais, apresentando-se cada uma delas seguidamente.

- Consequências directas
    - Custos de reparação;
    - Água perdida;
    - Danos nas imediações;
- Consequências Indirectas
    - Custo devido às interrupções do abastecimento;
    - Põe em causa a capacidade de combate a incêndios;

- Consequências Sociais
    - Eventuais perturbações do trânsito e de actividades comerciais;
    - Causa degradação da qualidade da água devido à intrusão de material contaminante causado pela despressurização;

Como se pode constatar, esta é uma questão sensível, sendo imperativo impedir que os efeitos nefastos resultantes das mesmas ponham em causa o bem-estar das populações.

5.7.2.Risco associado à ocorrência de roturas

5.7.2.1.Introdução

O risco é um conceito dominante na nossa sociedade e está associado a múltiplos factores e condições. (Almeida, 2005).

Uma abordagem integrada deve atender ao risco associado aos diversos factores que influenciam o funcionamento dos sistemas de distribuição e adução de água, uma vez que as consequências podem traduzir-se em custos elevados para as entidades gestoras e populações. Ao identificar e estudar os riscos associados, é mais fácil para as organizações responder em situações de emergência, pois já são conhecidas as possíveis consequências.

De uma forma simplificada, o risco pode ser definido como o valor esperado das consequências da ocorrência de um evento num dado período de tempo. Assim, o risco pode ser descrito através de:

$$R=P.\ C \qquad \textbf{[26]}$$

Sendo *P:* – probabilidade de ocorrência de um evento de risco; *C*: – consequências da ocorrência (pode ter diferentes unidades, e.g., custos, nº de vidas humanas perdidas).

As entidades gestoras devem identificar as fontes do risco, as áreas de impacto, as suas causas e potenciais consequências. A identificação de perigos e riscos é fundamental, pois qualquer risco que não seja incluído nesta lista não poderá ser incluído na análise.

Depois de identificar o que poderá acontecer, torna-se necessário considerar todas as causas possíveis e cenários que mostrem as consequências que podem ocorrer (ISO 31000).

5.7.2.2.Análise de Risco

Uma análise de risco prende-se com o desenvolvimento da compreensão desse risco e permite a definição da estratégia a aplicar numa avaliação dos mesmos.

Para fazer uma avaliação de riscos é necessário ter em consideração as suas causas, bem como as consequências positivas e negativas inerentes ao fenómeno e, por fim em que ocasiões e como essas consequências podem surgir.

Análises de risco podem ser feitas com diferentes níveis de detalhe dependendo do tipo de risco, objectivo da análise e informação disponível. Dependendo das circunstâncias, a análise pode ser qualitativa, semi-quantitativa, quantitativa ou uma combinação destes três tipos de análise. Numa primeira fase, pode recorrer-se a análise qualitativa para obter uma indicação geral do nível de risco. Numa segunda fase, sempre que possível, deve recorrer-se a uma análise mais detalhada e quantitativa. As consequências podem ser

determinadas através da modelação das consequências de um evento ou de uma série de eventos, ou através da extrapolação de estudos experimentais e de dados disponíveis.

Uma análise de risco detalhada é muito complexa, sendo necessário cruzar dados indicadores da probabilidade de ocorrência de rotura com as consequências directas, indirectas e sociais anteriormente referidas.

Factores como a existência de redundância na rede, a pressão de serviço bem como o facto de a conduta se encontrar ou não em zona urbana são determinantes no processo de análise de risco.

No presente documento não se pretende fazer uma análise de risco detalhada dos activos analisados, pretendendo-se sim e, com recurso à análise de deterioração efectuada, relacionar a probabilidade de ocorrência de roturas com a previsão do estado de condição dos troços.

Figura 35-- Matriz de Risco-Grau de Risco (Fonte: Proteção Civil)

É importante relembrar a definição de estado de condição 5.

Quadro 36- Definição do estado de condição 5

Muito Mau	Componente com falha crítica detectada ou possibilidade de falha iminente (colapso) Necessidade de reparar/substituir imediatamente a maioria dos componentes Risco elevado quer ao nível da segurança dos utilizadores, quer da operacionalidade Trabalhos de reparação/substituição necessários urgentemente **Intervenção imediata!**

Cabe assim à entidade gestora definir o risco máximo que admite correr em cada troço, podendo-se reflectir essa decisão na probabilidade máxima admissível de pelo menos um dos trechos se encontrar no estado de condição 5. Justifica-se tal decisão pelo facto de o eventual colapso de apenas um trecho inviabilizar o funcionamento de toda a conduta.

Seguidamente exemplifica-se o cálculo efectuado para vários troços, tendo eles a totalidade dos trechos no estado de condição 1 no instante inicial, variando no entanto a quantidade dos mesmos. Este cálculo pretende definir a probabilidade de um ou mais trechos se encontrar no estado 5 durante o período referido.

Quadro 37- Distribuição inicial dos trechos pelos estados de condição

Estado i	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Nº trechos	20/50/70/100	0	0	0	0

Foram analisados troços com 20,50,70 e 100 trechos.

As probabilidades de transição de cada um dos estados para o estado de condição 5 estão presentes nos quadros em anexo IV, resultado da aplicação da cadeia de Markov.

Os resultados obtidos apresentam-se graficamente de seguida:

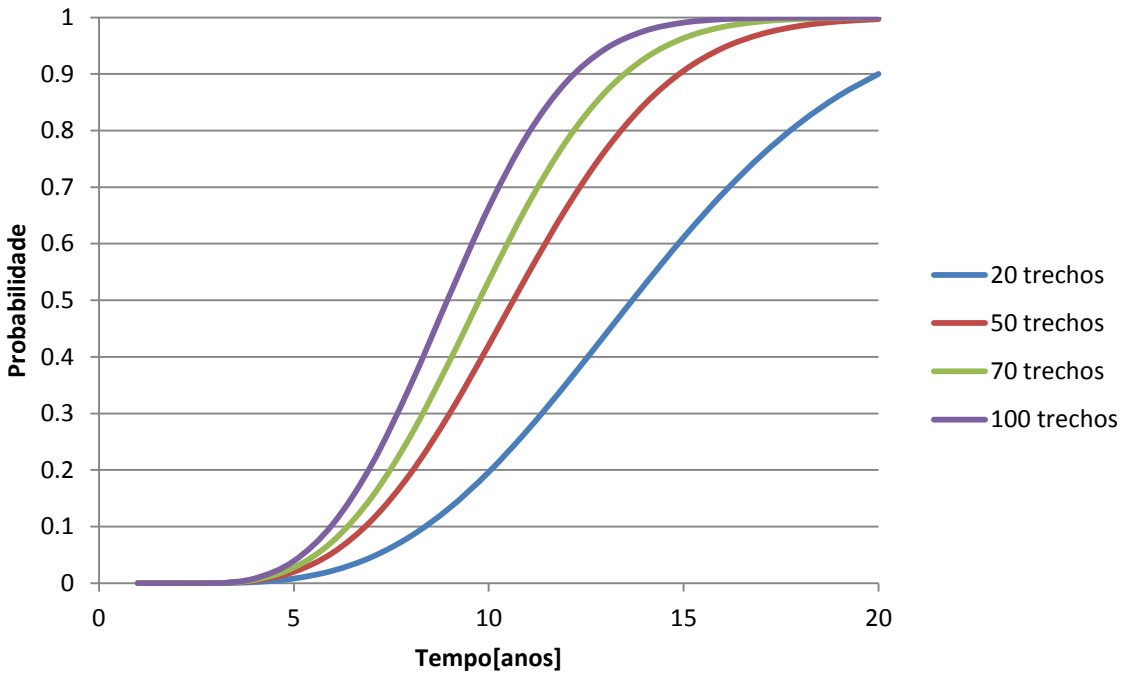

Figura 36-- Probabilidade de pelo menos um trecho se encontrar no estado 5

Como seria de prever, quanto maior o número de trechos considerados mais acentuado será o crescimento da probabilidade estudada. Interceptando a probabilidade máxima admissível estipulada de pelo menos um dos trechos se encontrar no estado de condição 5 com a curva de probabilidades respectiva ao troço em análise, obtém-se a data limite para a qual é necessário intervir. É importante referir também que o facto de um trecho se encontrar no estado 5 não significa que vá colapsar imediatamente, existindo exemplos pontuais nas adutoras analisadas que comprovam isso mesmo. Esta é apenas uma forma de a entidade gestora definir a probabilidade de ocorrência do acontecimento no processo de análise de risco.

5.8.Estratégias de prolongamento da vida útil

Nesta fase pretende-se comparar várias estratégias de manutenção, analisando-se economicamente os vários cenários propostos, abordando-se ainda a qualidade do serviço prestado. Tendo consciência das limitações inerentes à atribuição de custos às operações, a análise é feita com recurso a factores de relação. Considera-se por simplificação apenas a possibilidade de substituição dos trechos, sendo que numa situação real poderia ser mais vantajoso proceder a acções de reparação, após análise individual dos mesmos.

Considerando que a vida útil de uma conduta de betão armado é aproximadamente 50 anos e, cruzando esta informação com as previsões de Markov, Figura 19, constata-se que a vida útil de uma conduta inicialmente no estado 1 acaba aproximadamente quando 60% dos troços analisados se encontrem no estado de condição 5. Com as probabilidades de transição conhecidas, é possível estimar a distribuição dos trechos pelos 5 estados de condição. Na Figura 37 encontra-se o cruzamento da vida útil estipulada pela bibliografia com a previsão da deterioração de Markov.

Este é o critério usado na definição de vida útil nos cenários analisados.

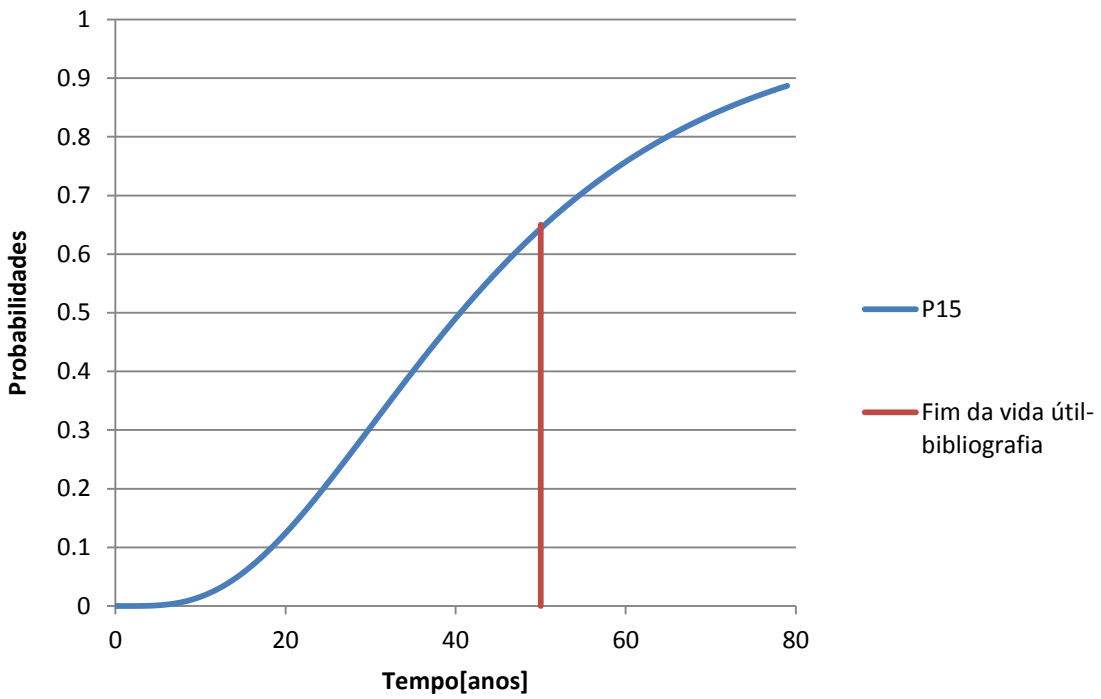

Figura 37-- Interceção da vida útil recomendada com a probabilidade de transição do estado 1 para o estado 5

5.8.1.Cenários de manutenção

Cenário de manutenção 0

Este cenário permite que a conduta atinja o fim da sua vida útil sem que seja realizada qualquer acção de manutenção, procedendo-se a uma total substituição da mesma ao fim de 50 anos (fim da vida útil). Substituições estas que remetem todos os trechos substituídos para o estado de condição 1.Uma abordagem deste tipo acarreta riscos acrescidos de rotura face a cenários que contemplem intervenções intermédias. Por outro lado beneficia do efeito de escala no momento de intervenção, sendo o custo unitário da substituição das tubagens mais reduzido.

Cenário de manutenção 1

Este cenário de manutenção prevê inspecções de 10 em 10 ou 20 em 20 anos e posterior substituição dos techos que se encontrem no estado de condição 5, remetendo-os para o estado do de condição 2. Consideram-se no estado de condição 2 os trechos colocados, uma vez que estes são conectados a trechos mais antigos, sendo espectável que a instalação não apresente condições para ser classificada com o estado 1. Considera-se que a vida útil da instalação termina quando for atingido o ano em que mais de 60% dos trechos se encontrem no estado de condição 5.

Cenário de manutenção 2

Este cenário é em tudo idêntico ao cenário de manutenção 1, sendo que ao invés de serem substituídos apenas os trechos que se encontrem no estado de condição 5, são também alvo de substituição aqueles que se encontrem no estado 4.O estado de condição para o qual estes são remetidos após intervenção é também o estado 2, pelos mesmos motivos citados anteriormente. O fim da vida útil da conduta é atingido quando mais de 60% dos trechos se encontrarem no estado de condição 5.

Cenário de manutenção 3

Este terceiro cenário limita o número de substituições em cada intervenção a 10% da totalidade dos trechos integrantes da conduta em análise. Considera-se que os trechos colocados encontram-se no estado de condição 2, pelos mesmos motivos já expostos anteriormente. Tal como nos restantes cenários, a vida útil da conduta termina quando mais de 60 % dos trechos se encontrarem no estado de condição 5. Quando atingido o fim da vida útil procede-se à substituição total da tubagem.Não são permitidas substituições de trechos que se encontrem no estado de condição 3.

5.8.2.Comparação económica entre cenários de manutenção

Introduz-se nesta fase o conceito de Valor Actualizado Liquido (VAL), essencial para analisar economicamente os investimentos efectuados ao longo do período pretendido. Este conceito permite efectuar comparações

entre os diversos cenários propostos, considerando os instantes temporais em que são efectuadas as acções de intervenção. O Valor Actualizado Liquido é o somatório actualizado de todos os cash-flows ao longo do período observado,sendo o cash flow de cada ano analisado individualmente pela equação 27.

Considere-se a equação 27:

$$\mathrm{X} = \frac{Inv\ t}{(1+ta)^t} \qquad \textbf{[27]}$$

Sendo,

X- Capital necessário no presente;

ta-Taxa de actualização;

t- tempo[anos] ;

Inv t-Investimento a realizar no ano t,;

X é o capital que determinado investidor necessita de possuir no presente, para realizar o investimento Inv, no ano t. A taxa de actualização serve para actualizar os cash-flows e tem de ser definida no momento de realização do estudo, tomando esta valores de 4%,6% e 8%.

Pode-se deduzir de forma simples que para investimentos de igual valor (igual Inv t), o valor de X é tanto menor quanto maior o t considerado.

O VAL tem como objectivo avaliar a viabilidade de um projecto de investimento através do cálculo actual de todos os seus *cash-flow,* que neste caso são os custos de manutenção. Considera-se que valor actual é o valor, de hoje, de determinada quantia a investir no futuro. Apresenta-se na equação 28 a expressão representativa do VAL.

$$VAL = \sum_{t=0}^{n} \left(\frac{Inv\ t}{(1+ta)^t} \right) \qquad \textbf{[28]}$$

Outro factor a ter em conta na análise dos cenários de manutenção é o factor de escala, uma vez que os processos de substituição envolvem o vazamento da tubagem, gastos com movimentação de homens e máquinas, somando-se a estes aos custos das próprias tubagens, o que faz com que o custo unitário da substituição dos trechos seja tanto menor quanto maior o número de trechos substituídos a cada intervenção, tornando-se necessário introduzir outro factor no processo de cálculo dos custos das várias estratégias de manutenção em análise, que espelhe esta situação.

Desta forma, sugere-se neste documento que o custo unitário de substituição seja dado pela seguinte equação:

$$\mathrm{C} = 1 + \frac{N - n}{N} \qquad \textbf{[29]}$$

Sendo,

n-número de trechos a substituir;

N-número de trechos total;

Trata-se de uma forma simples de considerar o factor de escala aquando da realização da substituição dos trechos, espelhando com o rigor necessário esse mesmo factor no processo de análise dos cenários de manutenção em estudo.

É importante compreender qual o efeito das equações 28 e 29 nos custos inerentes às intervenções de substituição. Considere-se então um troço de conduta constituído por 100 trechos de 7 metros, perfazendo estes um total de 700 m. Sendo a vida útil da instalação 50 anos, considere-se também que se procede à substituição total da mesma de 50 em 50 anos.

Quadro 38-Custo actualizado das substituições a realizar

Ano de substituição	Número de substituições	Custo unitário	Custo actualizado-t.a=4%	Custo actualizado-t.a=6%	Custo actualizado-t.a=8%
50	100	1	14.07	5.43	2.13
100	100	1	1.98	0.29	0.05
150	100	1	0.28	0.02	0.00
200	100	1	0.04	0.00	0.00

Observando-se, por exemplo, o Quadro 38-Custo actualizado das substituições a realizar-coluna 4, correspondente ao custo actualizado com taxa de actualização de 4%, o valor 14.07 corresponde ao montante que é necessário possuir no presente para proceder a 100 substituições passados 50 anos.

Não se considera o investimento inicial, uma vez que é igual para todos os cenários em análise.

Na seguinte figura apresenta-se a variação dos custos actualizados, variando a data de realização das substituições. Apresentam-se os custos actualizados da realização de 100 substituições simultâneas em vários instantes temporais.

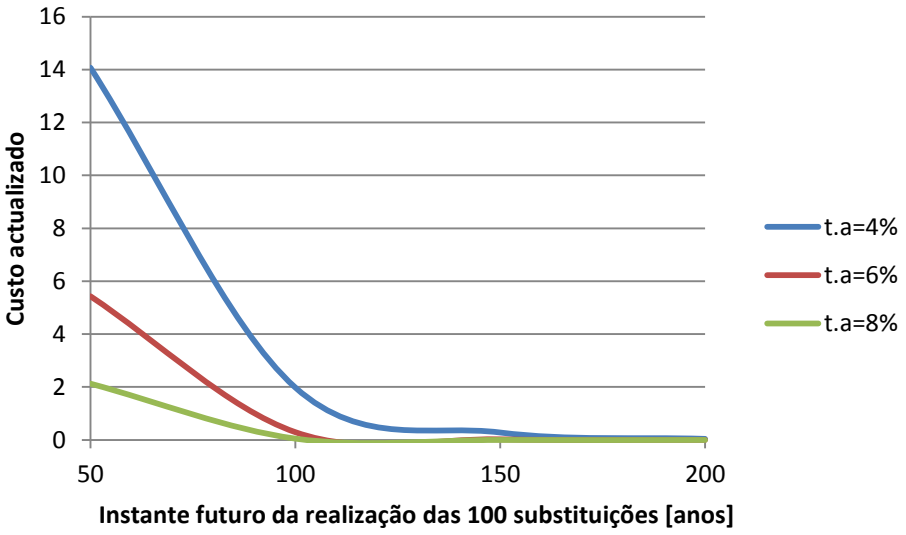

Figura 38-Custo actualizado da totalidade das substituições futuras

O valor do custo actualizado é tanto menor quanto mais longínqua for a data de realização do investimento e maior a taxa de actualização considerada.

Da análise da Figura 38 constata-se que caso seja considerada uma janela de observação superior a 100 anos, o custo actualizado das substituições torna-se insignificante. Desta forma, no processo de comparação dos vários cenários propostos, o período de observações será de 100 anos.

5.8.2.1. Análise de cenários considerando intervalo entre intervenções de 10 anos

De seguida apresenta-se o número de substituições efectuadas em cada ano, segundo os vários cenários propostos, bem como o custo unitário e custo actualizado respectivos.

Cenário de manutenção 0

Quadro 39- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 10 anos [cenário 0]

Ano de substituição	Número de substituições	Custo unitário	Custo actualizado-t.a=4%	Custo actualizado-t.a=6%	Custo actualizado-t.a=8%
50	100	1	14.07	5.43	2.13
100	100	1	1.98	0.29	0.05
		TOTAL	16.05	5.72	2.18

Cenário de manutenção 1

Quadro 40- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 10 anos [cenário 1]

Ano de substituição	Número de substituições	Custo unitário	Custo actualizado-t.a=4%	Custo actualizado-t.a=6%	Custo actualizado-t.a=8%
10	1	1.99	1.34	1.11	0.92
20	10	1.90	8.67	5.92	4.08
30	18	1.82	10.10	5.70	3.26
40	22	1.78	8.16	3.81	1.80
50	23	1.77	5.73	2.21	0.87
60	23	1.77	3.87	1.23	0.40
70	23	1.77	2.61	0.69	0.19
80	23	1.77	1.77	0.38	0.09
90	23	1.77	1.19	0.21	0.04
100	23	1.77	0.81	0.12	0.02
		TOTAL	44.25	21.38	11.67

Observa-se que a percentagem de substituições efectuadas a cada 10 anos, a partir do ano 40, é cerca de 25% da totalidade do troço, podendo as entidades gestoras não ser receptiva a uma percentagem de substituições desta ordem de grandeza.

Cenário de manutenção 2

Quadro 41- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 10 anos [cenário 2]

Ano de substituição	Número de substituições	Custo unitário	Custo actualizado-t.a=4%	Custo actualizado-t.a=6%	Custo actualizado-t.a=8%
10	5	1.95	6.59	5.44	4.52
20	19	1.81	15.70	10.72	7.38
30	26	1.74	13.95	7.88	4.50
40	27	1.73	9.73	4.54	2.15
50	28	1.72	6.78	2.61	1.03
60	28	1.72	4.58	1.46	0.48
70	28	1.72	3.09	0.82	0.22
80	28	1.72	2.09	0.46	0.10
90	28	1.72	1.41	0.25	0.05
100	28	1.72	0.95	0.14	0.02
		TOTAL	64.87	34.32	20.45

A apreciação feita à percentagem de substituições efectuadas a cada intervenção segundo o cenário de manutenção 1 aplica-se também ao presente cenário.

Cenário de manutenção 3

Quadro 42- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 10 anos [cenário 3]

Ano de substituição	Número de substituições	Custo unitário	Custo actualizado-t.a=4%	Custo actualizado-t.a=6%	Custo actualizado-t.a=8%
10	5	1.95	6.59	5.44	4.52
20	10	1.90	8.67	5.92	4.08
30	10	1.90	5.86	3.31	1.89
40	10	1.90	3.96	1.85	0.87
50	10	1.90	2.67	1.03	0.41
60	10	1.90	1.81	0.58	0.19
70	10	1.90	1.22	0.32	0.09
80	10	1.90	0.82	0.18	0.04

90	100	1.00	2.93	0.53	0.10
100	10	1.90	0.38	0.06	0.01
		TOTAL	34.91	19.22	12.2

Com este cenário de manutenção pretende-se limitar o número de substituições a cada intervenção, tomando assim valores mais aceitáveis por parte das entidades gestoras, "atrasando" também a realização de uma substituição total face ao cenário de manutenção 0, diminuindo assim o valor liquido actualizado do plano de manutenções.

Sendo o critério determinante do fim da vida útil o número de trechos no estado de condição 5, encontra-se representada graficamente de seguida a evolução desse mesmo número, para as 4 estratégias em análise.

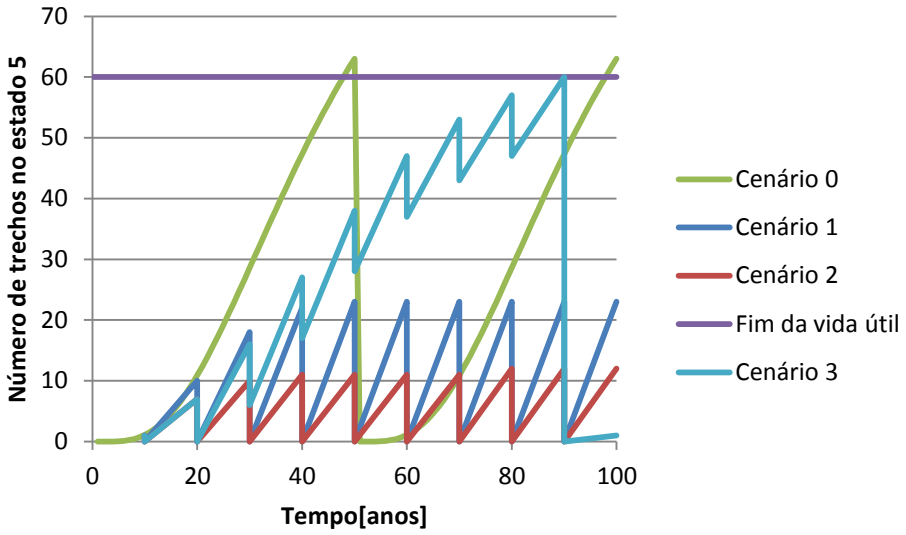

Figura 39-Evolução do número de trechos no estado 5

Analisando a Figura 39 constata-se que o cenário 2 é o que conduz a um número médio de trechos no estado de condição 5 menor. Olhando para os primeiros 50 anos, o cenário 0 é o que conduz a instalação a apresentar maior número de trechos no estado 5. Observando o intervalo entre o ano 50 e o ano 90, o cenário responsável por tal particularidade é o 3. O número de trechos no estado 5 pode ser relacionado com o risco de ocorrência de rotura e representativo do nível de serviço prestado.

5.8.2.2.Análise de cenários considerando Intervalo entre intervenções de 20 anos

Interessa compreender como se desenvolve o processo de deterioração, caso o intervalo entre intervenções seja aumentado para 20 anos. O cenário que não contempla manutenções antes do fim da vida útil da instalação não sofre qualquer alteração, já nos restantes cenários é espectável que o processo de deterioração

sofra alterações. Apresenta-se então o número de substituições efectuadas em cada ano, para cada um dos cenários de manutenção considerados, bem como os custos unitários e valores actualizados calculados pelas equações 28 e 29.

Cenário de manutenção 1

Quadro 43- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 20 anos [cenário 1]

Ano de substituição	Número de substituições	Custo unitário	Custo actualizado-t.a=4%	Custo actualizado-t.a=6%	Custo actualizado-t.a=8%
20	11	1.89	9.49	6.48	4.46
40	39	1.61	13.08	6.10	2.89
60	41	1.59	6.20	1.98	0.64
80	41	1.59	2.83	0.62	0.14
100	41	1.59	1.29	0.19	0.03
		TOTAL	32.89	15.37	8.16

Constata-se que o número de substituições a cada intervenção é consideravelmente superior face ao mesmo cenário de manutenção, mas considerando intervalos entre intervenções de 10 anos.

Cenário de manutenção 2

Quadro 44- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 20 anos [cenário 2]

Ano de substituição	Número de substituições	Custo unitário	Custo actualizado-t.a=4%	Custo actualizado-t.a=6%	Custo actualizado-t.a=8%
20	24	1.76	19.28	13.17	9.06
40	48	1.52	15.20	7.09	3.36
60	49	1.51	7.03	2.24	0.73
80	49	1.51	3.21	0.70	0.16
100	49	1.51	1.47	0.22	0.03
		TOTAL	46.19	23.42	13.34

A observação feita anteriormente relativamente ao número de substituições efectuadas a cada intervenção aplica-se ao presente cenário.

Cenário de manutenção 3

Quadro 45- Número de substituições para intervalo entre intervenções de 20 anos [cenário 3]

Ano de substituição	Número de substituições	Custo unitário	Custo actualizado-t.a=4%	Custo actualizado-t.a=6%	Custo actualizado-t.a=8%
20	10	1.90	8.67	5.92	4.08
40	10	1.90	3.96	1.85	0.87
60	100	1.00	9.51	3.03	0.99
80	10	1.90	0.82	0.18	0.04
100	10	1.90	0.38	0.06	0.01
		TOTAL	23.34	11.04	5.99

Comparativamente à realização de intervenções de 10 em 10 anos, a realização das mesmas separadas por intervalos de 20 anos torna necessária uma substituição total da tubagem numa data mais precoce.

As substituições efectuadas fazem com que a evolução do número de trechos no estado de condição 5 seja o representado na Figura 40.

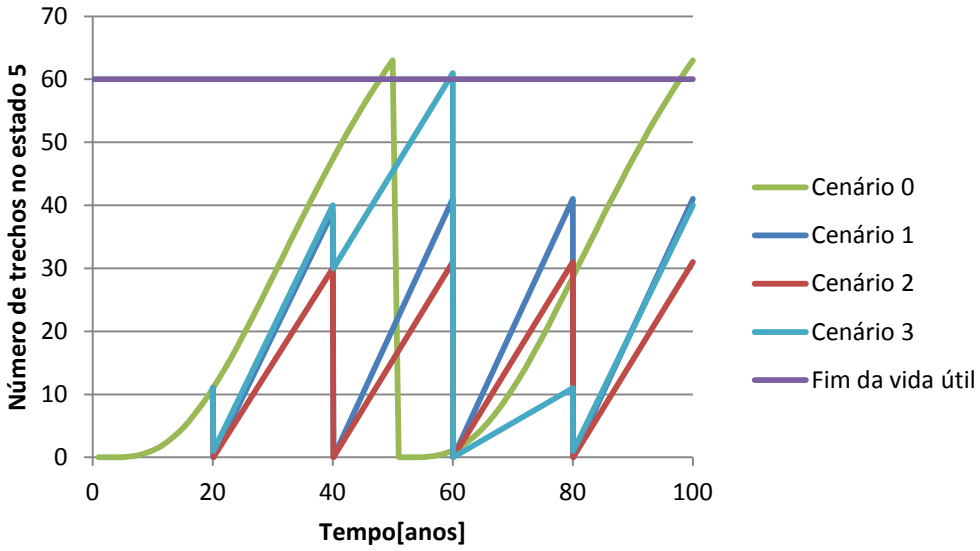

Figura 40-Evolução do número de trechos no estado 5

5.8.2.3. Comparação entre intervalos de intervenção de 10 e 20 anos

Interessa conhecer qual o intervalo de tempo entre inspecções e posteriores substituições, que conduz a um plano de manutenções mais económico. Inicialmente procede-se à comparação do valor actualizado líquido, dado pela equação 28, para os quatro cenários propostos, considerando intervalos entre intervenções de 10 e

20 anos. Tal comparação é feita considerando taxas de actualização de 4%,6% e 8%. Não se considera o montante respectivo ao investimento inicial, uma vez que este é o mesmo para todos os cenários analisados.

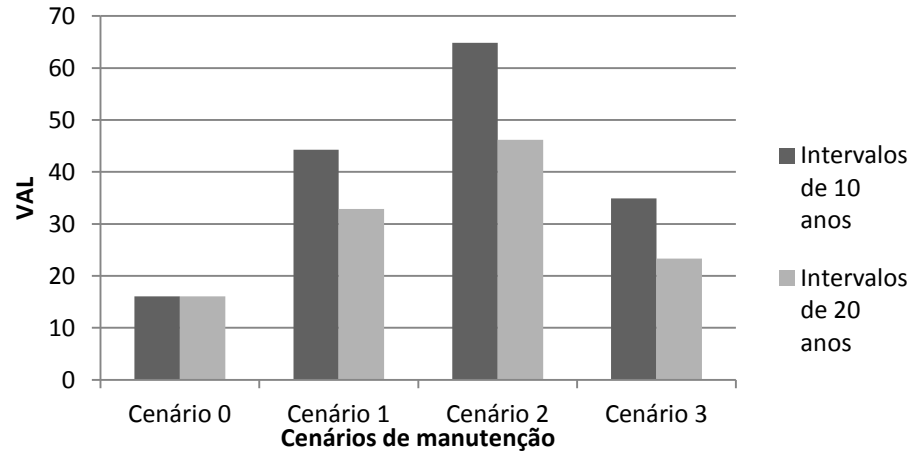

Figura 41-VAL considerando t.a=4%

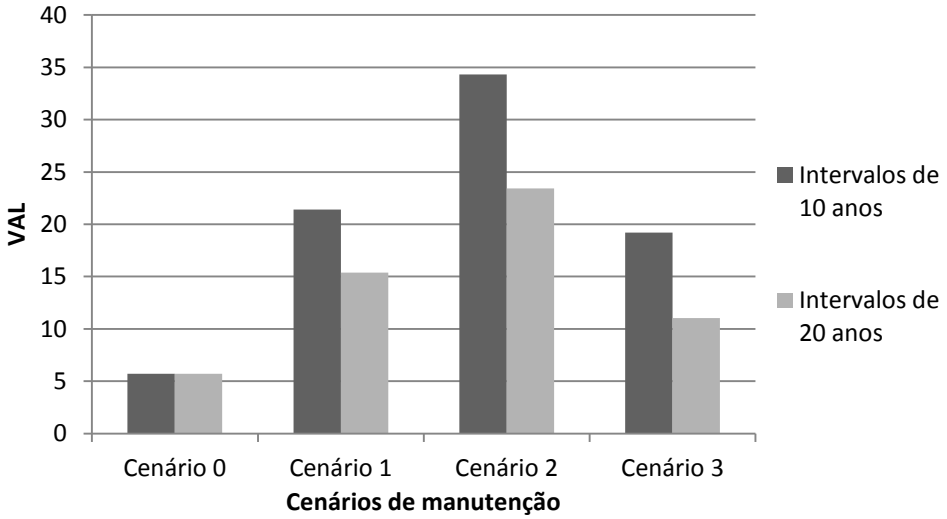

Figura 42- VAL considerando t.a=6%

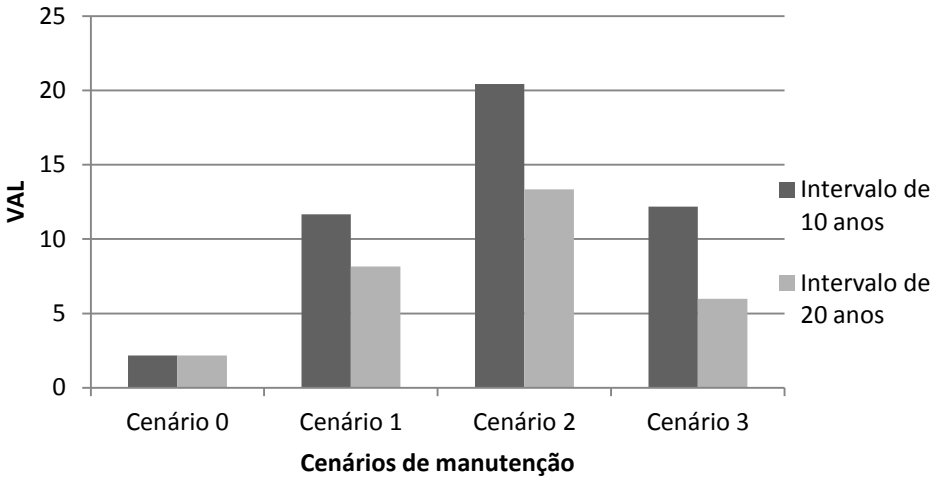

Figura 43- VAL considerando t.a=8%

Analisando as figuras 41,42 e 43 constata-se que independentemente da taxa de actualização utilizada e, analisando apenas o VAL, é mais vantajoso economicamente proceder a intervenções de substituição de 20 em 20 anos.

Considerando o intervalo entre intervenções mais vantajoso (20 anos) e tendo como objectivo final aferir qual dos cenários de manutenção é o mais vantajoso economicamente, reúne-se na Figura 44 a informação necessária para proceder a essa análise.

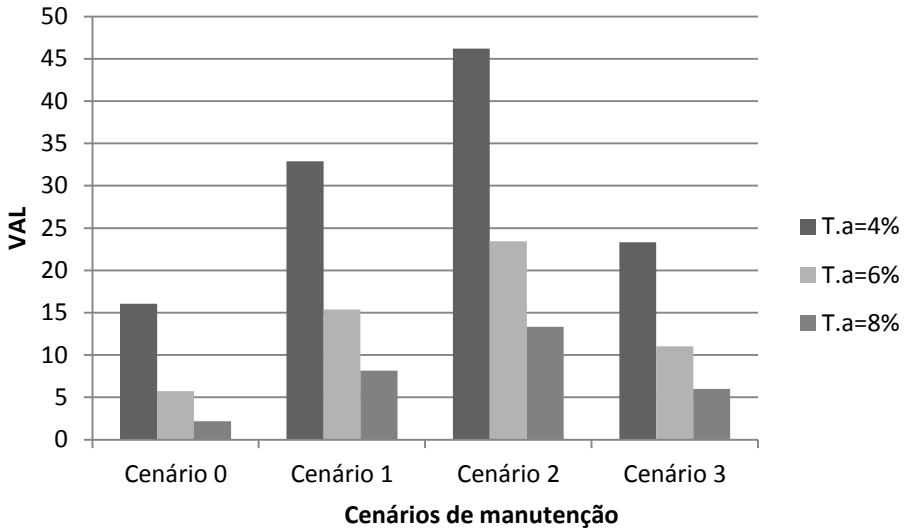

Figura 44-VAL considerando intervalos entre substituições de 20 anos

Analisando a Figura 44 e considerando apenas o VAL, é mais vantajoso deixar a conduta atingir o fim da sua vida útil e só posteriormente proceder à total substituição dos seus trechos (cenário 0).

O cenário de manutenção 1 é uma solução mais vantajosa comparativamente ao cenário 2. O cenário de manutenção 3 só é menos vantajoso economicamente quando comparado com o cenário 0.

Na comparação económica entre cenários de manutenção seria possível ainda considerar o valor residual da instalação no final do período de observação.

Comparando as Figura 39 e Figura 40, constata-se que os custos de manutenção acrescidos inerentes à opção por intervalos entre intervenções de 10 anos reflete-se num risco de rotura consideravelmente inferior ao longo dos 100 anos, quando os cenários de manutenção analisados são o 1 e 2,uma vez que o número de trechos no estado 5 é em média bastante inferior ao observado caso o intervalo entre substituições seja de 20 anos. Relativamente ao cenário 3, o custo acrescido devido à realização de substituições de 10 em 10 anos face a intervalos de 20 anos conduz a um número de trechos no estado 5 consideravelmente inferior nos primeiros 60 anos, invertendo-se a relação nos 30 anos posteriores.

5.8.3.Contribuição e quantificação do risco na tomada de decisão

5.8.3.1.Introdução

É importante ter em consideração o risco a que funcionarão as instalações caso seja aplicado cada um dos cenários de manutenção, podendo mesmo ser este um factor determinante no momento da tomada de decisão.

Para tal é necessário quantifica-lo, processo no qual é fundamental a realização de uma análise de risco.

Uma análise de risco poderá levar a entidade gestora a optar por uma estratégia de manutenção mais onerosa, investindo mais para manter um risco de rotura mais reduzido.

Pretende-se neste documento efectuar uma análise de risco a cada um dos 4 cenários de manutenção em estudo, de modo a compreender de que forma cada um deles influencia o nível de serviço prestado pela instalação.

Para a realização da análise de risco será utilizada a informação obtida pelo modelo de Markov, nomeadamente a previsão do número de trechos no estado de condição 5 ao longo da janela temporal observada.

Posteriormente é introduzido o conceito de segurança, sendo que cada cenário de manutenção proposto faz com que a instalação tenha um índice de segurança particular. A segurança é inversamente proporcional ao risco, relacionando-se este último com a percentagem de trechos no estado de condição 5 durante o período de tempo analisado.

Com a introdução do conceito de segurança torna-se possível a obtenção de um índice benefício/custo de cada um dos cenários de manutenção propostos.

5.8.3.2. Risco Actualizado

Seguindo a mesma lógica aplicada aos custos relativos às acções de manutenção a realizar nas instalações ao longo da janela temporal observada, onde foi introduzido o conceito de valor actualizado liquido, introduz-se agora o conceito de risco actualizado.

Uma vez que risco é o produto da probabilidade de ocorrência de determinado acontecimento pelas suas consequências, pretende-se que a actualização do risco reflita a actualização dos recursos necessários para dar resposta às consequências de eventuais roturas futuras.

Considerando que o risco é proporcional à percentagem de trechos no estado de condição 5,para obtenção do risco actualizado é inicialmente necessário actualizar a percentagem de trechos no estado de condição 5.

Actualização essa que é feita de forma em tudo semelhante ao VAL, sendo dada pela expressão 30.

$$RA = \sum_{t=0}^{n} \left(\frac{\%\ trechos\ no\ \ estado\ 5\ no\ inst\ t}{(1+ta)^t} \right) \qquad \textbf{[30]}$$

5.8.3.3.Análise de Risco dos diversos cenários propostos

Em 5.7.2 encontra-se uma descrição detalhada da definição de risco.

Pretende-se nesta fase proceder a uma análise de risco para os 4 cenários de manutenção propostos.

Torna-se necessário inicialmente compreender quais as situações limite admissíveis a que as instalações podem estar sujeitas.

Desta forma e, uma vez que a janela temporal observada é de 100 anos, as piores condições de segurança admissíveis em uma instalação consiste em esta ter 60% dos seus trechos no estado de condição 5 durante a totalidade da janela temporal observada.

Contrariamente, as melhores condições de segurança que uma instalação pode garantir reflete-se numa percentagem de trechos no estado 5 de 0% durante toda a janela temporal observada.

Apresenta-se graficamente de seguida, as situações limite descritas anteriormente.

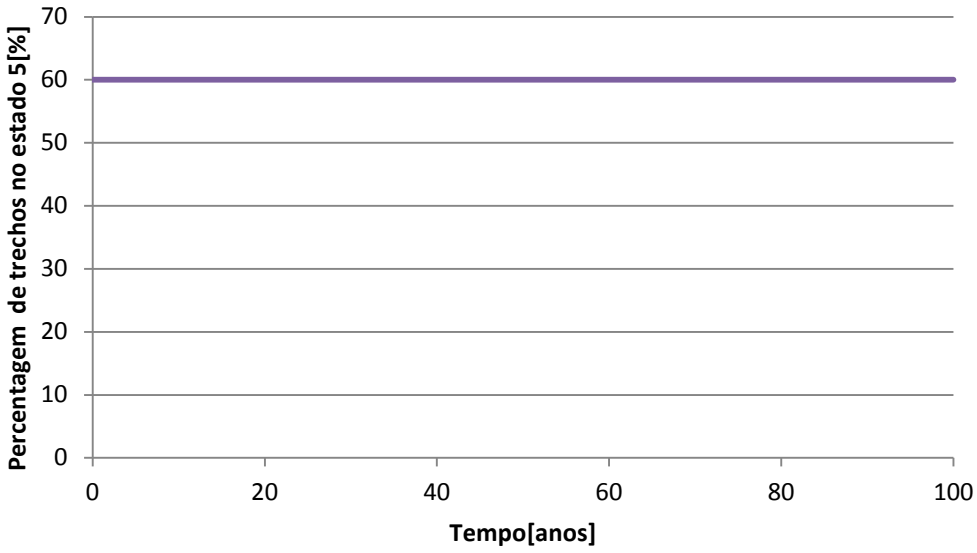

Figura 45-Pior estado de condição global admissível

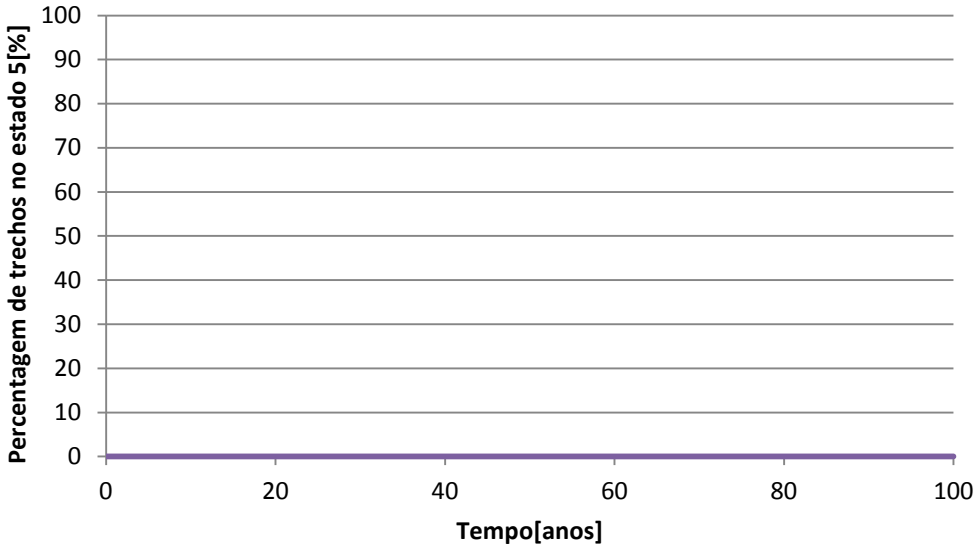

Figura 46-Melhor estado de condição global possível

Estando balizadas as situações limite de risco, é possível avaliar e classificar os vários cenários de manutenção propostos.

Pretende-se agora atribuir um grau de risco às instalações, considerando que lhes é aplicada cada um dos quatro cenários de manutenção propostos. De modo a ganhar sensibilidade para os valores de risco actualizado , faz-se a actualização do mesmo para o pior estado global de condição admissível em instalações, representado graficamente pela figura 45.

Realiza-se para a situação representada na figura 45 o somatório das percentagens de trechos no estado de condição 5, ao longo dos 100 anos analisados, estando actualizada a percentagem dos trechos em questão, segundo a expressão 30.

Os valores obtidos são os seguintes:

Quadro 46-Risco actualizado do pior estado de condição global admissível

Taxa de actualização	Risco actualizado[%.ano]
t.a=4%	1284.4
t.a=6%	829.5
t.a=8%	591.9

De referir que sem actualização, o valor obtido seria de 60 x 100=6000 [%.ano].

Tendo como referência os valores do quadro 46, está-se em condições de classificar e comparar o risco com que funcionam as instalações, caso seja aplicado cada um dos 4 cenários de manutenção propostos.

A classificação é feita da seguinte maneira:

- Actualizar, com recurso à equação 30, a percentagem de trechos no estado de condição 5 que a instalação terá ao longo dos 100 anos analisados;
- Realizando o somatório das percentagens de trechos no estado de condição 5, ao longo da janela temporal observada, que as instalações apresentarão caso se opte pelo cenário de manutenção em estudo;

Quadro 47-Risco actualizado, considerando intervalos entre intervenções de 10 anos

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
t.a=4%	613.33	121.99	68.27	247.38
t.a=6%	325.20	58.46	34.40	99.34
t.a=8%	180.56	31.57	19.51	45.56

Quadro 48-Risco actualizado , considerando intervalos entre intervenções de 20 anos

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
t.a=4%	613.33	384.51	317.35	354.44
t.a=6%	325.20	178.25	152.50	172.38
t.a=8%	180.56	93.13	82.40	88.27

Da análise dos quadros 47 e 48 conclui-se que, por ordem decrescente, o risco é dado pela seguinte sequência de cenários de manutenção:

Quadro 49-Ordem decrescente do risco actualizado respectivo aos cenários de manutenção

Intervalo entre substituições	Cenário de manutenção			
10 em 10 anos	0	3	1	2
20 em 20 anos	0	1	3	2

5.8.3.4.Análise de benefício/custo dos cenários de manutenção propostos

Pretende-se nesta fase obter um índice que permita uma análise da relação entre os custos envolvidos nos quatro cenários de manutenção em estudo e o nível de serviço prestado pelas instalações caso os mesmos sejam aplicados.

Surge então a necessidade de criar um novo conceito, o conceito de segurança, sendo este inversamente proporcional ao risco. Este passa a ser quantificado por um factor, denominado factor de segurança.

O factor de segurança é obtido pela diferença entre o risco actualizado correspondente à pior situação de manutenção admissível, representado na figura 45 e expresso numericamente no quadro 46 e, o risco actualizado correspondente ao cenário de manutenção em estudo, quadros 47 e 48.

Encontram-se nos quadros 50 e 51 os factores de segurança respectivos aos 4 cenários de manutenção analisados, para as várias taxas de actualização consideradas e considerando intervalos entre intervenções respectivamente de 10 e 20 anos.

Quadro 50-Factor de segurança dos cenários de manutenção em estudo-Intervalo entre intervenções de 10 anos

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
t.a=4%	671.07	1162.41	1216.13	1037.02
t.a=6%	504.30	771.04	795.10	730.16
t.a=8%	411.34	560.33	572.39	546.34

Quadro 51-Factor de segurança dos cenários de manutenção em estudo- Intervalo entre intervenções de 20 anos

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
t.a=4%	671.07	899.89	967.05	929.96
t.a=6%	504.30	651.25	677.00	657.12
t.a=8%	411.34	498.77	509.50	503.63

É agora possível relacionar o factor de segurança correspondente a cada um dos quatro cenários de manutenção com o seu custo respectivo.

Encontram-se nos quadros 52 e 53 os rácios entre os factores de segurança de cada um dos cenários de manutenção propostos e os seus respectivos valores actualizados líquidos.

O cenário de manutenção com o índice mais elevado é o cenário com melhor relação benefício/custo.

Quadro 52-Relação benefício/custo-intervalo entre intervenções com periódicas de 10 anos em 10 anos

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
t.a=4%	41.81	26.27	18.75	29.71
t.a=6%	88.11	36.03	23.16	38.00
t.a=8%	188.90	48.07	28.01	44.85

Representa-se seguidamente de forma gráfica a informação presente no quadro 52.

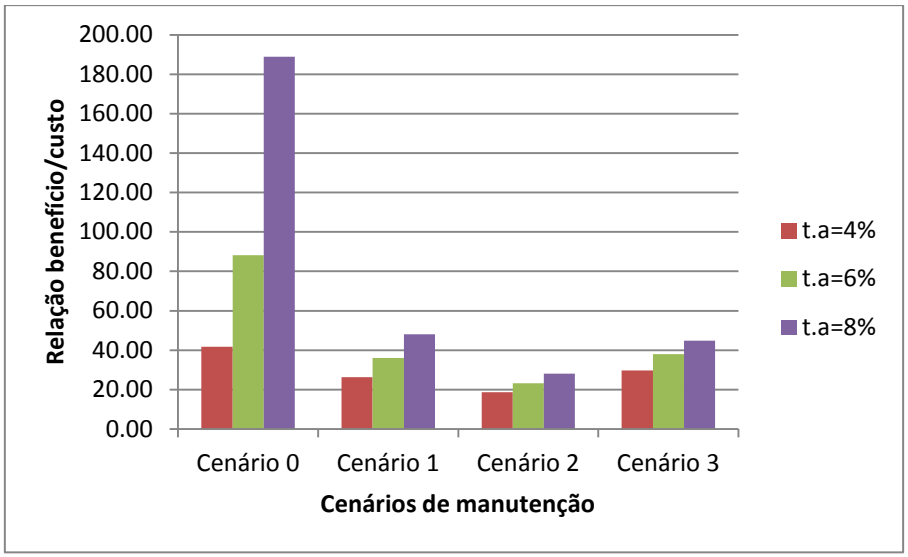

Figura 47- Relação benefício/custo-intervalo entre intervenções com periódicas de 10 anos em 10 anos

Quadro 53-Relação benefício/custo-intervalo entre intervenções periódicas de 20 em 20 anos

	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
t.a=4%	41.81	27.37	20.94	39.85
t.a=6%	88.11	42.37	28.90	59.53
t.a=8%	188.90	61.11	38.19	84.11

Na figura 48 encontra-se a representação gráfica dos dados presentes no quadro 53.

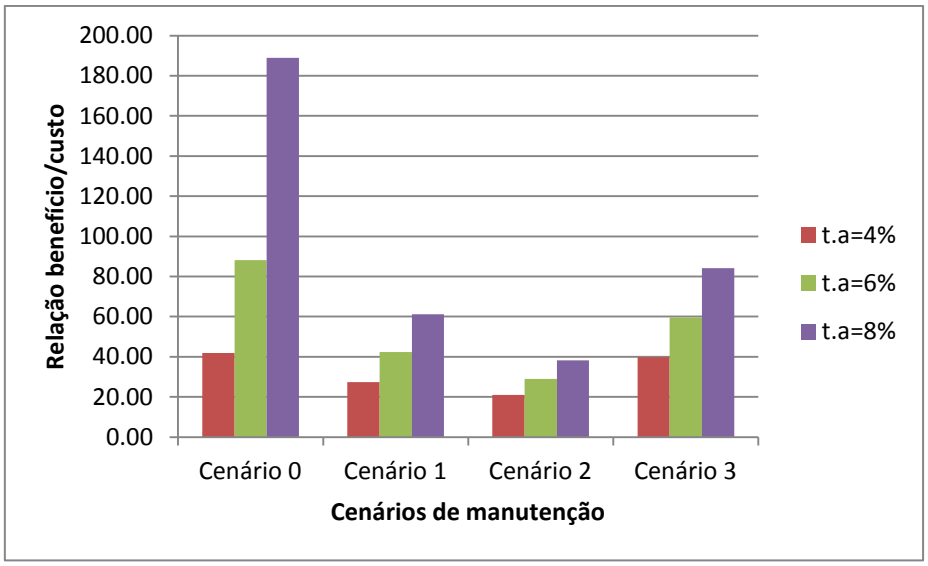

Figura 48- Relação benefício/custo-intervalo entre intervenções periódicas de 20 em 20 anos

Conclui-se da análise dos quadros 52 e 53 que o cenário 0 é o que conduz a uma melhor relação benefício/custo, sendo no entanto o que faz com que a instalação opere com um nível de risco superior.

O cenário que concerne uma pior relação benefício/custo é o cenário 2, oferecendo no entanto o menor nível de risco para a instalação, ao longo da janela temporal observada.

Conclui-se ainda que a opção por intervalos entre intervenções de 20 anos permite obter uma melhor relação benefício/custo.

6.Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1.Conclusões

Conhecer o processo de deterioração de sistemas de adução é bastante vantajoso do ponto de vista económico, ambiental e social. O facto de se tratar de estruturas enterradas e com janelas de oportunidade para a realização de inspecções bastante restritas, torna interessante a exploração de um modelo de deterioração do ponto de vista da gestão de activos.

Face aos avultados investimentos inerentes à realização de acções de reabilitação e substituição das infraestruturas de adução de água, é necessário elaborar planos de manutenção que sejam económicos e que permitam conhecer o risco de rotura ao longo da vida útil das instalações. Neste trabalho explorou-se o modelo de Markov em cadeia para previsão da deterioração sofrida pelas condutas estudadas, servindo essa mesma previsão para realizar uma comparação económica e de risco entre 4 cenários de manutenção.
Tendo como objectivo uma melhor percepção dos sistemas de adução, foi feito um levantamento dos materiais utilizados no fabrico de condutas, bem como das causas e tipos de roturas mais comuns.

Foi também feita referência às técnicas de inspecção e diagnósticos existentes, bem como às técnicas de reabilitação. Foram ainda abordadas estratégias de avaliação do risco de rotura.

Após levantamento do estado do conhecimento e do funcionamento do modelo de Markov em cadeia, surgiu a necessidade de elaborar uma metodologia célere de atribuição de estados de condição às condutas inspeccionadas. A elaboração dessa metodologia assenta na necessidade de classificar um número de trechos bastante considerável, de forma objectiva e com critérios uniformes.

Não existindo um protocolo normalizado aplicável a adutoras, adaptou-se os princípios lógicos dos protocolos do NRC e WRC aplicáveis a colectores de águas residuais e foi criada uma metodologia aplicável ao caso de estudo. Esta consiste numa atribuição de pontuações às anomalias e posterior atribuição de um estado de condição às condutas avaliadas com base no somatório de pontuações registadas na mesma. Somatório esse que será pertencente a um dos 5 intervalos previamente definidos, sendo cada intervalo correspondente a um dos cinco estados de condição admissíveis. A atribuição de pontuações está directamente relacionada com a gravidade das anomalias respectivas, correspondendo as pontuações mais elevadas às anomalias mais gravosas

para a conduta. O processo de definição das pontuações é algo subjectivo, tendo-se comparado as classificações obtidas pela metodologia proposta com a opinião dos técnicos da EPAL, no sentido de incrementar a veracidade da metodologia proposta.

Salientam-se de seguida alguns factos inerentes à classificação dos troços e utilização das cadeias de Markov para previsão da deterioração sofrida por adutoras:

- O registo das anomalias num processo de inspecção é um processo monótono e algo subjectivo, logo susceptível a imprecisões;
- Na classificação e previsão dos estados de condição não são consideradas causas específicas da deterioração;
- A previsão da deterioração futura está dependente da subjectividade inerente à classificação atribuída no momento da inspecção;
- Para que a previsão seja credível, a conduta analisada deve ter características semelhantes às utilizadas na construção da matriz de intensidade;
- A matriz de intensidade é tanto mais credível quanto mais intervalos entre inspecções forem considerados na sua construção;
- O facto de a previsão da deterioração futura depender apenas do estado observado no momento da realização da inspecção pode conduzir a algumas falsas conclusões. Por exemplo, considere-se duas condutas, ambas no estado de condição 3. Uma construída há 10 anos e outra há 20, ambas nunca intervencionadas. A primeira demorou muito menos tempo a atingir o estado 3, ou seja, deteriorou-se de uma forma muito mais célere. O modelo de Markov indica que ambas atingirão o estado 4 ao mesmo tempo, podendo este facto não ser muito credível quando observado o histórico de ambas as instalações, visto a primeira apresentar uma taxa de deterioração muito maior do que a restante;
- Visto só ser necessário conhecer o estado de condição inicial para obtenção de uma previsão do desempenho futuro, o modelo de Markov torna-se bastante prático;
- O modelo ignora a fase do ciclo de vida em que a conduta que se pretende conhecer a deterioração se encontra inicialmente;
- Pequenas reparações não registadas, efectuadas nos intervalos entre inspecções, podem induzir ligeiras alterações na matriz de intensidade obtida;
- Uma vez que os registos utilizados são provenientes de inspecções com entrada humana, apenas as anomalias visíveis na parede interior da tubagem são contabilizadas;
- A época e a qualidade da instalação das tubagens, bem como o processo de fabrico são factores que influenciam consideravelmente todo o comportamento das mesmas ao longo da sua vida útil, podendo-se registar comportamentos muito diferentes do previsto pelo processo de Markov;

A metodologia de classificação e previsão da deterioração foi aplicada a troços do adutor de Castelo do Bode, para diâmetros nominais iguais e superiores a 1800mm. Os dados foram fornecidos pela EPAL e são referentes ao período entre 2008 e 2012. O facto de poucos troços terem sido inspeccionados por duas vezes e de os

intervalos entre inspeccções realizadas ao mesmo troço serem curtos, limita a aplicação do modelo proposto, tendo-se no entanto obtido resultados plausíveis, nomeadamente curvas de deterioração dentro dos padrões esperados, indo ao encontro do indicado pelas referências bibliográficas.

O cálculo de matrizes exponenciais é um passo essencial em todo este processo, pelo que se apresentam breves notas relativas ao mesmo.

As estratégias de manutenção propostas e analisadas não contemplam acções de renovação, considerando-se apenas a possibilidade de substituição. Esta consideração surge por simplificação relativamente à atribuição de custos e, por, como já citado anteriormente, o processo de Markov não dar indicações acerca do tipo de anomalias registadas, sendo por isso impossível prever com precisão quais as acções de intervenção a realizar. Numa situação real teria de ser feita no momento da realização das inspecções e, caso a caso, uma apreciação sobre qual a melhor estratégia de intervenção.

Dos quatro cenários de manutenção analisados, o que conduz a uma solução mais vantajosa economicamente é o cenário 0, consistindo este na substituição total da instalação quando atingido o fim da sua vida útil, sem a realização de nenhuma intervenção prévia. No entanto, os restantes cenários, apesar de mais onerosos, tornam o risco actualizado de rotura mais reduzido.

Face à preocupação demonstrada pelas entidades gestoras relativamente ao desempenho das infraestruturas, é de prever que surjam cada vez mais dados, permitindo assim uma melhoria do desempenho do modelo de Markov. Julga-se que a utilização de cadeias de Markov para modelação da degradação de sistemas de adução constitui uma temática promissora.

A lista de anomalias e respectivas pontuações atribuídas neste trabalho conduzem a resultados satisfatórios quando usados para classificação das condutas referidas, não devendo ser utilizada indiscriminadamente em outros casos, nomeadamente com diâmetros, materiais, técnicas e anos de construção diferentes.

6.2.Desenvolvimentos Futuros

A utilização de uma metodologia de classificação e previsão do desempenho futuro de instalações comum a várias entidades gestoras proporcionaria uma incrementação da eficácia da mesma, dado que a matriz de intensidade torna-se mais robusta e credível com o incremento de informação considerada na sua construção.

Existem ainda alguns caminhos a explorar no âmbito do trabalho desenvolvido, nomeadamente a abordagem de processos semi markovianos. Estes são não estacionários, seguem o processo de Markov, mas, na sua formulação dependem do tempo decorrido no estado de condição inicial e/ou da idade da tubagem, tornando-se assim mais realistas (Jackson,2007).

Tal abordagem faria com que e, ao ser considerado tempo contínuo, a matriz de intensidade Q não fosse constante, ou seja, os seus valores passariam a depender da variável tempo e, uma vez que $\mathrm{P}\Delta t = e^{Q \times \Delta t}$, o intervalo de tempo Δt seguiria uma distribuição arbitrária.

Poderá ainda ser desenvolvida uma metodologia idêntica, visando a previsão da deterioração de condutas de outros materiais, sendo para isso necessário definir uma lista de anomalias a observar e proceder à atribuição de pontuações respectivas.

7.Referências Bibliográficas

- **Alegre e Covas. (2010)**-"Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água".
- **Almeida, A., (2005).**- *"*The 1755 Lisbon earthquake and the genesis of the risk management concept." Internacional Conference: 250th Anniversary of the 1755Lisbon Earthquake. Lisboa.
- **Andreou, S. A., Marks, D. H., and Clark, R. M**. (1987a). "A new methodology for modeling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory." *Advance in Water Resources.*
- **Andreou, S. A., Marks, D. H., and Clark, R. M.** (1987b). "A new methodology for modeling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Applications." *Advance in Water Resources*.
- **Andreou, S. A; Marks, D. H e Clark, R. M.** (1987a). - "A new methodology for modeling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory." *Advance in Water Resources*.
- **Andreou, S. A; Marks, D. H e Clark, R. M.** (1987b). - "A new methodology for modeling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Applications." *Advance in Water Resources.*
- **António de Carvalho Quintela**. (1981)-"Hidáulica".
- **Ascher, H, e Feingold** (1984) **– "H**. Repairable systems: Modelling, inference, misconceptions and their causes, M. Dekker, New York".
- **Baik, H.S; Jeong, H.S e Abraham, D.M.** (2006). **–**"Estimating transition probabilities in Markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems". *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 132(1):
- **Batista, J., and Alegre, H.** (2002). – "CARE-W WP1 D2 - Validation of the Rehabilitation Performance Indicators System." National Civil Engineering Laboratory, Lisbon, Portugal.
- **Bonds,R.W;Barnard,L.M;Horton, A.M e Oliver,G.**L(2005) **–**"Corrosion and corrosion control of iron pipes".Journal of American Water Works Association. 97(6).
- **Brémond, B** (1997). - "Statistical modeling as help in network renewal decision." *European Commission Co-operation on Science and Technology (COST), Committee C3 – Diagnostics of Urban Infrastructure*, Paris, France.
- **Clark, R. M: Stafford, C. L e Goodrich, J. A**. (1982) - "Water distribution systems: A spatial and cost evaluation." *J. Water Resources Planning and Management Division*, ASCE.
- **Cleve Moler;Charles Van Loan** (2003)-"Nineteen Dubious Ways to Compute the Exponential of a Matrix,Twenty-Five Years Later".
- **Constantine, A. G., and Darroch, J. N**. (1993). -"Pipeline reliability: stochastic models in engineering technology and management." S. Osaki, D.N.P. Murthy, eds., World ScientificPublishing Co.
- **Constantine, A. G., Darroch, J. N., and Miller, R**. (1996). -"Predicting Underground Pipe Failure." Australian Water Works Association.

- **Da Rosa, P.J e Parkinson, R.W** (1985) –"Corrosion of ductile iron pipe". WRc Engineering Report TR 241, Swindon.
- **Davis, P; Burn, S ; Moglia, M e Gould, S**. (2007). –"A Physical Probabilistic Model to Predict Failure Rates in Buried PVC Pipelines." *Reliability Engineering & System Safety.*
- **Davis, P;Silva, D.D; Marlow, D., Moglia, M; Gould, S. e Burn, S**. (2008). –"Failure Prediction and Optimal Scheduling of Replacements in Asbestos Cement Water Pipes." *Journal of Water Supply Research and Technology*, 57(4).
- **Deb, A. K; Hasit,Y; Grablutz, J. F. M e Herz, R. K.** (1998). – "Quantifying future rehabilitation and replacement needs of water mains." AWWA Research Foundation, Denver.Colo.
- **Deb, A; Grablutz, F; Hasit, Y.J; Snyder, J; Loganathan, G.V e Agbenowsi, N.** (2002). – "Prioritizing Water Main Replacement and Rehabilitation." AWWA Research Foundation, Denver, CO, USA.
- **Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto** – "*Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais".*
- **Eisenbeis, P; Rostum,J e Le Gat, Y**. (1999). - "Statistical models for assessing the technicalstate of water networks – Some European experiences." *Proc. AWWA Annual Conference*,Chicago.
- **Eisenbeis, P; Gat, Y.L; Laffrechine, K; Gauffre, P.L; Konig, A; Rostum, J; Tuhovcak, L e Valkovic, P**. (2002). – "CARE-W WP2 D2 - Description and Validation of Technical Tools." National Civil Engineering Laboratory, Lisbon, Portugal.
- **Engelhardt, M.O e Skipworth, P.J**. (2005). –"WiLCO - State of the Art Decision Support." 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, Exeter, UK.
- **Federation of Canadian Municipalities and National Research Council** (2003) – "Deterioration_and_inspection_ofwater_destributionsystem, Issue No.1.1, 2003".
- **Frangopol, D.M; Kallen, M.J e Noortwijk, J.M.V.** (2004). – "Probabilistic models for lifecycle performance of deteriorating structures": review and future directions. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6(4).
- **Galleher,J.(**2003) –"San Diego County Water Authority, Private communication".
- **Goulter, I. C., and Kazemi, A**. (1988). – "Spatial and temporal groupings of water main pipe breakage in Winnipeg." *Canadian J. Civil Engrg.*
- **Goulter, I. C; Davidson, J e Jacobs, P**. (1993). – "Predicting water-main breakage rate." *J. Water Resources Planning and Management,* ASCE.
- **Grilo, T. V**. (2007) – "*Técnicas de Reabilitação de Sistemas deAbastecimento de Água: Metodologia conceptual e aplicação a casos de estudo"*
- **Hadzilacos, T; Kalles, D; Preston, N; Paul Melbourne, Camarinopoulos, L; Eimermacher, M; Kallidromitis, V; Frondistou-Yannas, S e Saegrov, S**. (2000). –"UTILNETS: A Water Mains Rehabilitation Decision Support System." *Computers, Environment and Urban Systems*.
- **Heijn, E.; Larsen, P**. (2004) -" Water Main Rehabilitation Alternatives".*Florida Water Resourses Journal,* December

- **Helena Alegre e Dídia Covas** (2010) -"Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água".
- **Herz, R. K**. (1996). – "Ageing process and rehabilitation needs of drinking water distribution networks." *J. Water SRT.*
- **Hillier e Lieberman**.(2001) – "Introduction to operations research"
- **ISO 11295:2008**-"*Guidance on the classification and design of plastics piping systems used for renovation"*
- **ISO 31000: 2008**.- "Risk Management - Guidelines on principles and implementation of risk management."
- **Jackson, C**. (2007). –"Multi-state modelling with R: the msm package". *Cambridge, UK:Medical* Research Council Biostatistics Unit
- **Jacobs, P., and Karney, B**. (1994). - "GIS development with application to cast iron water main breakage rate." *2nd Int. Conf. on Water Pipeline Systems*, BHR Group Ltd., Edinburgh, Scotland.
- **Kalbfleisch, J.D. e Lawless, J.F.** (1985). –"The Analysis of Panel Data Under a Markov Assumption. *Journal of the American Statistical Association*".
- **Kallen, M. e Van Noortwijk, J.** (2006). –"Statistical inference for Markov deterioration models of bridge conditions in the Netherlands". *Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*.
- **Kettler, A. J e Goulter, I. C.** (1985). - "An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks." *Can. J. Civil Engrg.*
- **Kleiner,Y; Rajani,B**.(2001) –"Comprehensive review of structural deterioration of water mains:statistical models".
- **Kleiner,Y;Sadiq,R e Rajani,B**.(2005) –"Modeling the deterioration of buried infrastructure as a fuzzy Markov process".Submitted for publication to Journal of Water Supply : Reserarch & Technology:AQUA.
- **Kulkarni, R. B; Golabi, K e Chuang, J**. (1986). – "Analytical techniques for selection of repair-or-replace options for cast iron gas piping systems – Phase I." *Gas Research Institute*, *PB87-114112*, Chicago, Il.
- **Lee,J.W e Kim , S.H.**(2001) –" An integrated approach for interdependent information system project selection". International Journal of Project Management.19 (2).
- **Lei, J**. (1997). - "Statistical approach for describing lifetimes of water mains – Case Trondheim Municipality." *SINTEF Civil and Environmental Engineering*, *Report No. 22F007.28*, Trondheim, Norway. *ligação e colectores de águas residuais"*
- **Makar , JM ; Desnoyers,R e McDonald, S.E**.(2001)–"Failures models and mechanims in gray cast iron water pipes".in: Underground Infrastructure Research:Municipal Industrial and Environmental Applications, Kitchner, Ontario, Canadá,jun.2001.
- **Makar,JM e Kleyner,y**.(2000)- Maintaining eater pipeline integrity.in: AWWA Infrastructure Conference and Exibition Baltimore, Maryland, EUA,2000.

- **Marks, H. D., et al.** (1985). - “Predicting urban water distribution maintenance strategies: A case study of New Haven Connecticut.” *US Environmental Protection Agency (Co-operative Agreement R810558-01-0)*.
- **Marks, H. D; Andreou, S;Jeffrey L; Park, C e Zaslavski, A**. (1987). - “Statistical models for water main failures” *US Environmental Protection Agency (Co-operative Agreement CR810558) M.I.T Office of Sponsored Projects No. 94211*. Boston, Mass.
- **McMullen, L. D.** (1982). - “Advanced Concepts in Soil Evaluation for Exterior Pipeline Corrosion”, *Proceeding AWWA Annual Conference*, Miami.
- **Miller, R. B.** (1993).-“Personal communications. CSIRO Division of Mathematics and Statistics”,Glen Osmond. Australia**.**
- **Moglia, M ; Burn, S ; Meddings, S.** (2006). – "Decision Support System for Water Pipeline Renewal Prioritisation." *ITcon*.
- **Moglia, M; Davis, P e Burn, S.** (2008). – "Strong Exploration of a Cast Iron Pipe Failure Model." *Reliability Engineering & System Safety*
- **Morcous, G. e Lounis, Z.** (2006). –“ Management of bridge decks using stochastic deterioration models and multi-criteria optimization” .*7th International Conference on Short and Medium Span Bridges.*
- **Ng, S.K. e Moses, F**. (1999). –“Optimal policy for civil infrastructure systems using semi-Markov decision process”. *Case Studies in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructure Systems*.
- **NP EN 12889:2008** –“ Construção em galeria e ensaio de ramais de ligação e colectores de águas residuais”.
- **NPEN 1610:2008 – “**Construção e ensaio de ramais de ligação e colectores de águas residuais”.
- **NRC** (2003) –“*Selection of Technologies for the Rehabilitation or Replacement of Sections of a Water Distribution System”*
- **NRC (Ed.)** (2003) – *“Selection of Technologies for the Rehabilitation or Replacement of Sections of a Water Distribution System”*
- **prEN 13508-2** – Condition of Drain and Sewer systems outside buildings – Part 2Visual Inspection Coding System – Final Draft(2001)
- **prEN 15885: 2008** -“*Classification and performance characteristics of techniques for renovation and repairs of drains and sewers”*
- **Rajani, B e Makar, J**. (1999). – "A Methodology to Estimate Remaining Service Life of Grey Cast Iron Water Mains." *Canadian Journal of Civil Engineering*
- **Rajani, B e Tesfamariam, S**. (2004). – "Uncoupled Axial, Flexural, and Circumferential Pipe-Soil Interaction Analyses of Partially Supported Jointed Water Mains." *Canadian Geotechnical Journal*.
- **Rajani, B e Tesfamariam, S**. (2007). – "Estimating Time to Failure of Cast-Iron Water Mains." *Water Management*, 160(WM2).

- **Rajani,B;Kleiner , Y; Sadiq,R**–"Translation of pipe inspection results into condition ratings using fuzzy synthetic evaluation technique". Journal of Water Supply Research and Technology.
- **Rostum, J; Kowalski, M e Hulance, J**. (2004). – "User Manual CARE-W Rehab Manager." WRc, Trondheim, UK.
- **Scherer, W.T. e Glagola, D.M**. (1994). –" Markovian Models for Bridge Maintenance Management".*Journal of Transportation Engineering-Asce*, 120(1).
- **Selvakumar et al**.(2002)-" Costs for water supply distribution system rehabilitation". *Journal of Water Resources Planning and Management.*
- **Shamir, U e Howard, C.D.D**. (1979) - "An analytic approach to scheduling pipe replacement." *J. AWWA.*
- **Simicevic,J;Sterling, R.L. (2001)-"***Guidelines for pipe bursting. TTC Technical Report #2001.02.* US Corps of Engineers".
-
- **Stein,D.** (2001)- *"Rehabilitation and maintenance of drains and sewers".* ISBN 3-433-01316-0
- **Tesfamariam, S;Rajani, B e Sadiq, R**. (2006). – "Possibilistic Approach for Consideration of Uncertainties to Estimate Structural Capacity of Ageing Cast Iron Water Mains." *Canadian Journal of Civil Engineering.*
- **Thompson, P.D. e Johnson, M.B.** (2005). –" Markovian bridge deterioration developing models from historical data". *Structure and Infrastructure Engineering*, 1(1).
- **Walski, T. M e Pelliccia, A**. (1982) - "Economic analysis of water main breaks." *J. AWWA.*
- **WRc.** (1986) –"Sewer *Rehabilitation Manual"*, 2nd Edition. Water Research Centre Plc, Wiltshire, UK.
- **WRc**. (1993). –"Manual *of Sewer Condition Classification"*, 3rd Edition. Water Research Centre Plc Wiltshire, UK.
- **WRc.** (1994). –"Sewer *Rehabilitation Manual*, 3rd Edition". Water Research Centre Plc, Wiltshire, UK.
- **WRc.** (2001). –"Drain & Sewer Systems Outside Buildings". Water Research Centre Plc, Wiltshire, UK.
- **WRc.** (2001). –"Sewer *Rehabilitation Manual"*, 4th Edition. Water Research Centre Plc, Wiltshire, UK.
- **Yang, Y; Pam, H.J; e Kumaraswamy, M.M.** (2009) -" Framework Development of Performance Prediction Models for Concrete Bridges". *Journal of Transportation Engineering- Asce*, 135(8).
- **Yehuda Kleiner e Balvant Rajani**(2001) – " Comprehensive review of structural deterioration water mains: statistical models", NRCC-42586**.**
- **YOUNG, O. C. e TROTT, J. J.** (1984) – *"Buried Rigid Pipes - Structural Design of Pipelines"*, Elsevier Applied Science Publishers, Londres e Nova Iorque.
- **Zhao, J.Q., McDonald, S.E., and Kleiner, Y**. (2001). –"Guidelines for Condition Assessment and Rehabilitation of Large Sewers." Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa
- **Zheng Liu;Yehuda Kleiner e Balvant Rajani** (2012) –"Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems".

ANEXOS

Anexo I-Técnicas de Inspecção e Diagnóstico

Quadro A 1- Síntese das técnicas de Inspecção e Diagnóstico

Objectivo	Amplitude de utilização	Material aplicável	Intervalo de diâmetros aplicável	Técnica	Vantagens	Desvantagens
Localização de condutas	Representar a conduta em planta e perfil	Metálicos; Restantes	Sem limitações	Georadar(Ground Penetration Radar,GPR)	Inspecção feita a partir da superfície; Processo rápido; Informações sobre o solo circundante.	Resultados afectados por variações nas condições do solo; Difícil utilização abaixo do nível freático; Interpretação de dados exige técnicos especializados; os impulsos perdem intensidade rapidamente em alguns materiais.
	Detecção de infra-estruturas enterradas sem detectar profundidades	Todos	Sem limitações	Termografia de infra vermelhos	Processo célere; não necessita de contacto directo ou intrusão; fácil de operar.	Não permite medir a profundidade;Afectado por factores externos, tais como vento, humidade e tipo de cobertura do solo.
Detecção de fugas	Delimitar gradualmente as zonas onde haja fugas	Todos	Sem limitações	Zona de medição e controlo	Processo simples; Não é necessário colocar a conduta fora de serviço.	Não permite localizar a fuga com precisão.
	Registar os ruídos provocados pelas fugas	Todos	DN <100mm;Restantes	Tecnologia Sahara	Pode ser utilizado com as tubagens em serviço; Detecta pequenas fugas.	Tecnologia intrusiva; Processo caro; Requer a existência de pontos de acesso frequentes.
	Localização de fugas	Todos	Sem limitações	Modelos baseados em regimes transitórios	Processo requer instrumentação de muita precisão.	Processos pouco testados no terreno
	Detectar fugas e bolhas de ar	Todos	DN <220mm;Restantes	SmartBall	Pode inspeccionar tubagens longas de uma só vez; Método preciso; Não cria perturbações ao funcionamento da conduta.	Não pode ser utilizado com pressões muito elevadas (> 400psi); Fornece uma estimativa qualitativa.
	Sistema computacional para detecção de fugas	PVC e Betão; Restantes	Grandes diâmetros; Restatantes	LeakfinderRT	Método não intrusivo; Eficaz para detecção de pequenas fugas.	Não fornece informação sobre a dimensão da fuga;Susceptível a interferências devido a vibraçoes de baixa frequência.
	Detectar e registar os ruídos originados pelas fugas	PVC; Restantes	Sem limitações	Permalog	Técnica não intrusiva; Instalação rápida; Responde a novas fugas e roturas de forma célere; Baterias de baixo custo.	Afectado por ruídos exteriores; O comprimento do troço monitorizado varia consoante o material, sendo menor no caso de plásticos.
Avaliação estrutural das condutas	Identificar anomalias na superfície interior	Todos	DN <1500 mm; Restantes	Entrada Humana	Não requer equipamentos especiais; Processo rápido; Custos reduzidos.	É necessário suspender o abastecimento; Apenas aplicada a diâmetros grandes; Deteção de falhas pode ser comprometida pela existência de bio filme.
	Identificar anomalias na superfície interior	Todos	Pequenos Diâmetros; Restantes	Circuito fechado de televisão(CCTV)	Simples, barato e utilizável em diâmetros relativamento pequenos; Gravação digital é conveniente para armazenamento de dados	Os resultados obtidos são qualitativos; A velocidade de transporte é limitada; A tubagem tem de ser colocada fora de serviço.
	Identificar anomalias na superfície interior	Todos	Pequenos diâmetros; Restantes	Videoscópio	Permite visualizar áreas de acesso limitado; Imagem obtida de elevada qualidade; Processo célere.	Uso limitado a troços curtos; Obtêm-se resultados qualitativos; Apenas fornece informações sobre defeitos que se manifestem na superfície interior da tubagem.
	Inferir sobre a existência de corrosão	Metálicos; Restantes	Sem limitações	"Laser-Based Pipe Surface Profiling"	Mostra os primeiros sinais de corrosão; Capaz de medir a área da secção transversal.	A tubagem necessita de ser vazada; Tubagens com incrustações necessitam de ser limpas previamente.
	Detectar estrias de pré-esforço partidas/Medição de orifícios devido a corrosão	Betão pré esforçado	DN<800 mm; Restantes	"Remote Field Eddy Current"	Pode ser aplicado com diversos fins; Pode ser executado com a tubagem em serviço.	A interpretação dos registos requer técnicos experientes; Alguns instrumentos podem requerer limpeza ou drenagem antes da inspecção.
	Medição da espessura das paredes	Metálicos; Restantes	Sem limitações	Método da redução do fluxo magnético-[Magnetic Lfux Leakage];Banda Larga;"Pulsed Eddy Current System";	Eficaz a medir espessura das paredes; A inspecção da superfície exterior não requer a interrupção do serviço.	Requer um contacto entre o equipamento e as paredes da tubagem.
	Análise rápida das perdas de material devido a corrosão/erosão	Metálicos; Restantes	DN<50mm;Restantes	Teste de onda ultra-sónica guiada	Possibilita a inspecção de condutas revestidas e isoladas; É possível fazer a inspecção com a sonda posicionada apenas num local.	Não distingue entre corrosão interna e externa; Alcance limitado pela atenuação sofrida pelo sinal.
	Mede a espessura das paredes, monitorização de corrosão, detecção de falhas em soldaduras	Metálicos; Restantes	Sem limitações	Medição discreta de ultra sons-[Discrete Ultrasonic Measurement]	Sensível a descontinuidades superficiais e subsuperficiais;origina resultados instantâneos.	A superfície do objecto a inspeccionar tem de ser acessível; Dificilmente inspecciona materiais ásperos, irregulares e não homogéneos.
	Avaliar a condição das estrias de pré-esforço	Betão pré esforçado	Grandes diâmetros; Restantes	Seismic Pulse Echo	Inspecção pode ser feita tanto interiormente (tubagens drenadas) como exteriormente	Inspecção de troços longos é bastante demorada;é necessária mão de obra especializada.
	Avaliação estrutural e das condições hidráulicas das condutas	Todos	DN <3500 mm; Restantes	Sonar	Fornece informações diversas, relativas a danos estruturais, bloqueios/entupimentos, acumulação de sedimentos.	Obrigatoriamente tem de operar debaixo de água; Limitado pela frequência de operação.
	Localizar e aferir acerca da extensão de falhas existentes na superfície das tubagens.	Metálicos; Restantes	Sem limitações	Impact Echo	Fácil de operar; Apenas é necessário aceder a um dos lados da estrutura.	Espessura da parede a analisar tem de se encontrar entre os 66mm e os 1.8m.
	Monitorizar a emissão acústica emitida por rotura das estrias de pré-esforço	Betão pré esforçado	Sem limitações	Emissão sonora-[Acoustic Emission]	Permite a monotorização em tempo real	Apenas detecta o que ocorre durante o período de monitorização.

Legenda: Vermelho-Não aplicável; Amarelo-Aplicável com restrições; Verde-Aplicável sem restrições.

Anexo II-Técnicas de Reabilitação

Quadro A 2- Síntese das principais características das técnicas de reabilitação de condutas

Técnica (métodos)	Resistência não estrutural	Resistência semi-estrutural	Resistência estrutural	Capacidade hidráulica	Gama de diâmetros típica (mm)	Extensão máxima típica (m)	Execução de curvas	Área necessária	Custo (€/cm de diâmetro /m de comprimento)	Custo qualitativos
Renovação										
Reparação de juntas	X			=	250-6000	200	-	+		€
Revestimento interior										
A:Instalação por meios mecânicos					200-600	100	sem limite	+		
B:instalação manual					≥1600	S/lim				€
Argamassa de cimento	X			↗					3 – 8	€€
Resina epoxi	X			↗					23 – 38	€€
Entubamento com tubagem continua			X	↓	100-2000	300	Difícil	++	10 – 15	€€
Entubamento com trechos de tubagem										
Compressão ou tracção			X	↓	100-600	150	Difícil	+		€€
Método combinado			X	↓	600-4000	150				
Entubamento com tubagem ajustada										
Tubagem dobrada		X	X	↗	100-500	500	até 45º	+	10 – 15	€€
Tubagem deformada		X	X	↗	200-1500			++		
Entubamento com tubagem curada in situ										
Inserção por inversão					100-2800	600	até 90º	+	15-35	
Inserção com guincho					100-2800	150				
– Manga Termo rígida		X	X	↗	-					€€€
– Manga têxtil com elastómero		X	X		-					€€€
– Membrana de elastómero	X				-					€€
Entubamento com manga adesiva por reversão		X		↗	50-1500	150	até 90º	+		€€
Substituição										
Execução com vala aberta			X	↑	S/limite	S/limite	S/limite	+++		€€
Rebentamento da conduta			X	↑	50-1200(1)(2)	150(1);400(2)	Difícil	++	18-23(3)	€€€
Esmagamento da conduta			X	↑	-	-	Difícil	++		€€€
Corte longitudinal da conduta			X	↑	-	-	Difícil	++		€€€
Extracção da conduta			X	↑	-	-	Difícil	++		€€€
Construção de microtúnel			X	↑	300-3000(1)	200(1)	Difícil	++	40-60(3)	€€€€
Perfuração dirigida			X	↑	100-1200(1)	500(1)	Difícil	++	25-63(3)	€€€€

Legenda: ↑ aumento significativo; ↗aumento mediano; = mantém; ↓ diminuição significativa.
+ área mínima; ++ área média; +++ área elevada; € baixo custo; €€€€ custo elevado

Fontes :(1)NRC (2003); (2)Simicevic e Sterling (2001); (3)Selvakumar *et al.* (2002);

Anexo III-Atribuição de pontuações às anomalias

Quadro A 3-Pontuações atribuídas às anomalias

				Pontuação
BAA	**Deformação**			
BAAC1	Vertical (A)		A	80
	Horizontal (B)		B	80
BAB	**Fissura**			
BABC1	Fendilhação na superfície (A)(fio de cabelo)		A	
	Longitudinal (A)	A		
	Nº<2 trecho			60
	Nº>2 trecho			100
	Circunferencial (B)	B		
	Nº<0.8/m			25
	0.8/m<Nº<1.4/m			40
	nº>1.4/m			80
BABC2	Complexa (C)	C		
	Nº<0.8/m			30
	0.8/m<Nº<1.4/m			50
	nº>1.4/m			85
	Helicoidal (D)	D		
	Nº<0.8/m			42.5
	0.8/m<Nº<1.4/m			70
	nº>1.4/m			90
BABC1	Fissuras visíveis nas paredes da tubagem, peças no lugar (B)(moeda)		B	
	Longitudinal (A)	A		
	Nº<2 trecho			85
	Nº>2 trecho			180
	Circunferencial (B)	B		
	Nº<0.8/m			70
	0.8/m<Nº<1.4/m			90
	nº>1.4/m			165
BABC2	Complexa (C)	C		
	Nº<0.8/m			80
	0.8/m<Nº<1.4/m			120
	nº>1.4/m			170
	Helicoidal (D)	D		
	Nº<0.8/m			77.5
	0.8/m<Nº<1.4/m			135
	nº>1.4/m			172.5
BABC1	Fractura nas paredes da tubagem, peças no lugar (C)(Dedo)			
	Longitudinal (A)		A	
	Nº<2 trecho			250
BABC2	Nº>2 trecho			250
	Circunferencial (B)		B	
	Nº<0.8/m			250
	0.8/m<Nº<1.4/m			250

	nº>1.4/m		250
	Complexa (C)	C	
	Nº<0.8/m		250
	0.8/m<Nº<1.4/m		250
	nº>1.4/m		250
	Helicoidal (D)	D	
	Nº<0.8/m		250
	0.8/m<Nº<1.4/m		250
	nº>1.4/m		250
BAC	**Partido/Colapso**		
BACC1	Peças da tubagem visivelmente deslocadas (A)	A	250
	Ausência de peças na parede da tubagem (B)	B	250
	Colapso da estrutura (C)	C	250
BAF	**Superficie Danificada**		
BAFC1	**Aumento da regusidade (A)**	A	
BAFC2	Mecânica (A)	A	30
	Ataque químico, geral (B)	B	30
	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água(C)	C	30
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D	30
	Causa não evidente (Z)	Z	30
BAFC1	**Laminação (B)**	B	
BAFC2	Mecânica (A)	A	40
	Ataque químico, geral (B)	B	40
	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água(C)	C	40
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D	40
	Causa não evidente (Z)	Z	40
BAFC1	**Agregados à vista (C)**	C	
BAFC2	Mecânica (A)	A	80
	Ataque químico, geral (B)	B	80
	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água(C)	C	80
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D	80
	Causa não evidente (Z)	Z	80
BAFC1	**Agregados salientes (D)**	D	
BAFC2	Mecânica (A)	A	90
	Ataque químico, geral (B)	B	90
	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água (C)	C	90
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D	90
	Causa não evidente (Z)	Z	90
BAFC1	**Falta de agregados (E)**	**E**	
BAFC2	Mecânica (A)	A	100
	Ataque químico, geral (B)	B	100
	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água (C)	C	100
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D	100
	Causa não evidente (Z)	Z	100
BAFC1	**Armaduras visíveis (F)**	F	
BAFC2	Mecânica (A)	A	110
	Ataque químico, geral (B)	B	110

	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água (C)	C		110
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D		110
	Causa não evidente (Z)	Z		110
BAFC1	**Armaduras salientes (G)**		G	
	Mecânica (A)	A		120
	Ataque químico, geral (B)	B		120
BAFC2	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água(C)	C		120
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D		120
	Causa não evidente (Z)	Z		120
BAFC1	**Armadura corroída (H)**		H	
	Mecânica (A)	A		160
	Ataque químico, geral (B)	B		160
BAFC2	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água(C)	C		160
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D		160
	Causa não evidente (Z)	Z		160
BAFC1	**Ausência de parede (I)**		I	250
BAFC1	**Corrosão de produtos na superfície (J)**		J	
	Causa não evidente (Z)	A		40
	Ataque químico, geral (B)	B		40
BAFC2	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água(C)	C		40
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D		40
	Causa não evidente (Z)	Z		40
BAFC1	**Outras superfícies danificadas (Z)**		Z	
	Causa não evidente (Z)	A		80
	Ataque químico, geral (B)	B		80
BAFC2	Ataque químico, bioquímico, acima do nível da água(C)	C		80
	Ataque químico, águas residuais, abaixo do nível da água (D)	D		80
	Causa não evidente (Z)	Z		80
BAH	**Ligações defeituosas**			
	Posição de ligação não é a correcta (A)		A	60
	Abertura na ligação das tubagens (B)		B	80
BAHC1	Abertura circunferencial na ligação das tubagens (C)		C	80
	A ligação está danificada (D)		D	80
	A ligação está bloqueada (E)		E	100
BAJ	**Nó deslocado**			
	Longitudinal - deslocados paralelamente ao eixo dos tubos (A)		A	40
BAJC1	Radial - deslocados na direcção perpendicular ao eixo dos tubos (B)		B	40
	Angulares - os eixos dos tubos não são paralelos (C)		C	40
BAK	**Revestimento interior defeituoso**			
BAKC1	**Revestimento interior destacado (A)**		A	
	Longitudinal (A)	A		20
BAKC2	Circunferencial (B)	B		15
	Complexa (C)	C		15
BAKC1	**Descoloramento do revestimento (B)**		B	
	Longitudinal (A)	A		10
BAKC2	Circunferencial (B)	B		10
	Complexa (C)	C		10

BAKC1	**extremidade do revestimento defeituoso (C)**		C	
BAKC2	Longitudinal (A)	A		20
	Circunferencial (B)	B		10
	Complexa (C)	C		10
BAKC1	**revestimento enrugado (D)**		**D**	
BAKC2	Longitudinal (A)	A		20
	Circunferencial (B)	B		10
	Complexa (C)	C		10
BAKC1	**empolamento do revestimento (E)**		E	
BAKC2	Longitudinal (A)	A		20
	Circunferencial (B)	B		10
	Complexa (C)	C		10
BAKC1	Outros defeitos (Z)		Z	15
BAL	**Reparação defeituosa**			
BALC1	Ausência de uma parte da parede da tubagem (A)		A	250
	Reparação defeituosa (B)		B	60
	Outro tipo de defeitos (Z)		Z	60
BAM	**Falha na soldadura**			
BAMC1	Longitudinal (A)		A	80
	Circunferencial (B)		B	60
	Helicoidal (C)		C	60
BBC	**Material depositado**			
BBCC1	Areia (A)		A	60
	Saibro (B)		B	60
	Material compacto (betão) (C)		C	60
	Outros (Z)		Z	60
BBD	**Ingresso de solos**			
BBDC1	Areia (A)		A	120
	Turfa (B)		B	100
	Material fino (C)		C	60
	Cascalho (D)		D	250
	Outros (Z)		Z	100
BBF	**infiltração**			
BBFC1	Humidade (A)		A	40
	Gotas de água (B)		B	60
	Fluxo contínuo (C)		**C**	
	Nº<0.8/m			100
	0.8/m<Nº<1.4/m			140
	nº>1.4/m			160
	Sob pressão (D)		**D**	
	Nº<0.8/m			120
	0.8/m<Nº<1.4/m			160
	nº>1.4/m			180
BBG	**Fuga (rotura)**			
BBGC1	Visível uma fuga (rotura) na tubagem			165
BCAC	**Tipo de ligação (entre tubagens)**			

BCAC1	**Betonagem (A)**		**A**	
BCAC2	Ligação aberta (A)	A		120
	Ligação fechada (B)	B		0
	Fissurada			40
BCAC1	**Rígidas (B)**		**B**	
BCAC2	Ligação aberta (A)	A		120
	Ligação fechada (B)	B		0
	Fissurada			40
BCAC1	**Abocardadas, com juntas Standart (C)**		**C**	
BCAC2	Ligação aberta (A)	A		120
	Ligação fechada (B)	B		0
	Fissurada			40
BCAC1	**Abocardadas, com juntas travadas (D)**		D	
BCAC2	Ligação aberta (A)	A		120
	Ligação fechada (B)	B		0
	Fissurada			40
BCAC1	**Soldadas (E)**		**E**	
BCAC2	Ligação aberta (A)	A		120
	Ligação fechada (B)	B		0
	Fissurada			40
BCAC1	**Flangeadas (F)**		**F**	
BCAC2	Ligação aberta (A)	A		120
	Ligação fechada (B)	B		0
	Fissurada			40
BCAC1	**Por acessórios (G)**		**G**	
BCAC2	Ligação aberta (A)	A		120
	Ligação fechada (B)	B		0
	Fissurada			40
BCAC1	**Tipo de ligação não evidente (H)**		**H**	
BCAC2	Ligação aberta (A)	A		120
	Ligação fechada (B)	B		0
	Fissurada			40
BCAC1	**Ligação desconhecida (I)**		**I**	
BCAC2	Ligação aberta (A)		A	120
	Ligação fechada (B)		B	0
	Fissurada			40
BCB	**Ponto de reparação**			
BCBC1	Tubo substituído (A)		A	5
	Novo revestimento (B)		B	5
	Injecção de argamassa (C)		C	5
	Injecção material selante (D)		D	5
	Abertura reparada (E)		E	0
	Outro tipo de reparação (Z)		Z	5

Quadro A 4-Ficha de registo de anomalias

N.º	Distâncias [m]			Código	Descrição		Descrição C1	C1		Descrição C2	C2	Q1	Q1/m
	Perfil	Início	Fim										
78	2428.00	255.00		BCA	Tipo de ligação (entre tubagens)	BCAC1	Soldadas (E)	E	BCAC2	Ligação fechada (B)	B		Não aplicável
79	2428.00	255.00	262.00	BAB	Fissura	BABC1	Fendilhação na superfície (A)	A	BABC2	Circunferencial (B)	B	3.00	0.43
80	2421.00	262.00		BCA	Tipo de ligação (entre tubagens)	BCAC1	Soldadas (E)	E	BCAC2	Ligação fechada (B)	B		Não aplicável
81	2421.00	262.00	269.00	BAB	Fissura	BABC1	Fendilhação na superfície (A)	A	BABC2	Circunferencial (B)	B	3.00	0.43
82	2414.00	269.00		BCA	Tipo de ligação (entre tubagens)	BCAC1	Soldadas (E)	E	BCAC2	Ligação fechada (B)	B		Não aplicável
83	2414.00	269.00	276.00	BAB	Fissura	BABC1	Fendilhação na superfície (A)	A	BABC2	Circunferencial (B)	B	3.00	0.43
84	2407.00	276.00		BCA	Tipo de ligação (entre tubagens)	BCAC1	Soldadas (E)	E	BCAC2	Ligação fechada (B)	B		Não aplicável
85	2407.00	276.00	282.00	BAB	Fissura	BABC1	Fendilhação na superfície (A)	A	BABC2	Circunferencial (B)	B	3.00	0.50

FICHA DE INSPECÇÃO PRINCIPAL

- CONDUTAS -

Código	
Insp. n.º	
Data	

A. - IDENTIFICAÇÃO DA INFRA-ESTRUTURA

Designação ou Subsistema		Área de Negócio	
Troço		Departamento	
Subtroço		Unidade	
Sub-subtroço		Código SIG	
Localização (da Inspecção)		Coordenadas do ponto de entrada	
Responsável		Lat =	Lon =

B. - CARACTERIZAÇÃO

Material da Conduta no Troço	(Ex. Alvenaria/Betão Armado/FF/PRV/FFD/Aço)	Material da Conduta na Localização	(Ex. Alvenaria/Betão Armado/FF/PRV/FFD/Aço)
Diâmetro Nominal (mm)		Tipo de Secção	(Ex. Circular/Ovóide)
Fabricante	(Ex. Nome do fornecedor dos tubos)		
Época de Construção	(Ex. Ano (xxxx) ou Década (xx))	Tipo de juntas da tubagem inspeccionada	(Ex.Não Tem/Betonagem/Rígidas/ Abocardadas/Standard/Travadas/Soldadas)
Tipo de Escoamento	**Pressão-Gravítico** (Ex. Superfície Livre/Baixa Pressão/Pressão-Gravítico/Pressão-Elevatório)	Natureza da Localização	**Trincheira** (Ex.Trincheira/Sifão/Túnel/Galeria/Arcadas/À vista/Cavaleiros/Obras Especiais/Travessias Aéreas)

Extensão	Troço (m)	Subtroço (m)	Sub-subtroço (m)	Localização (m)

Revestimento Interior (Ex. Não Tem/Argamassa/Epoxy/etc.)

A conduta possui algum sistema de protecção contra a corrosão (p.e. P. Catódica)? **Sim, em caixas** (Sim) ☐ (Não) ☐

C. - ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO COMPONENTE

	Estado de Conservação: Muito Bom (1)	Bom (2)	Razoável (3)	Mau (4)	Muito Mau (5)	Não se aplica / Não tem*		Ponderação (1 a 5)		Pontuação
C.1 - Faixa de expropriação										
1. Pista de circulação		x					×	2	=	**4**
2. Taludes		x					×	3	=	**6**
3. Maciços de amarração						x	×	4	=	
4. Sistema de drenagem de águas (Ex. Caleiras)		x					×	3	=	**6**
5. Marcos (Ex. hectométricos, limite de faixa, sinalização, etc.)		x					×	1	=	**2**
C.2 - Câmaras de acessórios, clarabóias e/ou órgãos de manobra										
6. Paredes exteriores			x				×	4	=	**12**
7. Tampas ou vão de acesso			x				×	3	=	**9**
8. Sistema de ventilação				x			×	2	=	**8**
9. Escada de acesso ao interior		x					×	3	=	**6**

C. - ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO COMPONENTE (cont.)

	Estado de Conservação: Muito Bom (1)	Bom (2)	Razoável (3)	Mau (4)	Muito Mau (5)	Não se aplica / Não tem*		Ponderação (1 a 5)		Pontuação
C.2 - Câmaras de acessórios, clarabóias e/ou órgãos de manobra										
10. Laje de cobertura				x			×	4	=	**16**
11. Paredes interiores			x				×	4	=	**12**

12.	Pavimento			x				×	3	=	**9**	
13.	Tubagem			x				×	5	=	**15**	
14.	Equipamento (Ex. válvulas, ventosas, bombas, etc.)			x				×	5	=	**15**	
15.	Acessórios (Ex. juntas, flanges, purgas, etc.)			x				×	5	=	**15**	
C.3 - Câmaras de válvulas, casas de água e/ou de medidores												
16.	Laje de cobertura da caseta (inclui estrutura e impermeabilização)						x	×	4	=		
17.	Escadas de acesso						x	×	3	=		
18.	Dispositivos de protecção contra quedas						x	×	3	=		
19.	Paredes exteriores da caseta						x	×	4	=		
20.	Paredes interiores da caseta						x	×	4	=		
21.	Pavimento da caseta						x	×	2	=		
22.	Vãos de portas e janelas						x	×	3	=		
23.	Instalações eléctricas/Telegestão						x	×	3	=		
24.	Sistema de ventilação				x			×	2	=	**8**	
25.	Tampas ou vãos de acesso			x				×	3	=	**9**	
26.	Escadas interiores		x					×	3	=	**6**	
27.	Dispositivos de protecção contra quedas						x	×	3	=		
28.	Lajes de cobertura, intermédia e/ou vigas				x			×	4	=	**16**	
29.	Paredes e pilares da câmara ou casa de água			x				×	4	=	**12**	
30.	Pavimento da câmara			x				×	3	=	**9**	
31.	Tubagem			x				×	5	=	**15**	
32.	Tubagem de by-pass (Ex: descarga) ou descarregador			x				×	4	=	**12**	
33.	Equipamento (Ex. válvulas, comportas, medidores, bombas, etc.)			x				×	5	=	**15**	
34.	Acessórios (Ex. juntas, flanges, purgas, etc.)			x				×	5	=	**15**	
C.4 - Galerias/Túneis												
35.	Tampas ou vãos de acesso						x	×	3	=		
36.	Escadas interiores						x	×	3	=		
37.	Sistema de ventilação						x	×	2	=		
38.	Tecto da galeria/túnel						x	×	5	=		
39.	Paredes da galeria/túnel						x	×	5	=		
40.	Soleira da galeria/túnel						x	×	5	=		
41.	Juntas da galeria/túnel						x	×	5	=		
42.	Tubagem						x	×	5	=		
43.	Apoios da tubagem						x	×	4	=		
44.	Equipamento (Ex. válvulas, ventosas, medidores, bombas, etc.)						x	×	5	=		
45.	Acessórios (Ex. juntas, flanges, purgas, etc.)						x	×	5	=		

C. - ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO COMPONENTE (cont.)

	Estado de Conservação							
	Muito Bom	Bom	Razoável	Mau	Muito Mau	Não se aplica / Não tem*	Ponderação	Pontuação
C.4 - Galerias/Túneis	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(1 a 5)	
46. Drenagem de águas (inclui caleira e sistema de bombagem)						x	3	
47. Outros componentes (Ex. iluminação, calhas técnicas, etc.)						x	2	
C.5 - Chaminés de equilíbrio								
48. Paredes exteriores						x	5	
49. Câmara de acesso ao interior						x	3	
50. Paredes interiores						x	5	
51. Pavimentos						x	4	
52. Juntas						x	4	
C.6 - Tubagem								

53	Corpo do tubo			x				×	5	=	**15**
54	Revestimento interior						x	×	4	=	
55	Juntas dos tubos/Juntas de betonagem			x				×	5	=	**15**
56	Derivações/interligações, incluindo respectivas válvulas			x				×	4	=	**12**
57	Acessórios (Ex. curvas, tês, etc.)			x				×	4	=	**12**
58	Órgãos de manobra (Ex. válvulas, comportas, med caudal, etc.)			x				×	4	=	**12**
59	Reparações já efectuadas (Ex. AMEX, zonas reparadas, etc.)			x				×	4	=	**12**

D. - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTADO DE CONSERVAÇÃO

Peso Percentual dos capítulos

C.1 - 5% **C.2 -** 10% **C.3 -** 10% **C.4 -** 0% **C.5 -** 0% **C.6 -** 75%

Índice do Estado de Conservação **2.93**

Avaliação Global da localização inspeccionada

Estado de Conservação				
Muito Bom	Bom	Razoável	Mau	Muito Mau
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
		x	x	

ANEXO IV-Probabilidades de transição de estado

Quadro A 6-Probabilidades de transição do estado 1

	Probabilidades					
ANO	1	2	3	4	5	Condição média
0	1	0	0	0	0	1
1	0.88	0.12	0.00	0.00	0.00	1.12
2	0.78	0.21	0.00	0.00	0.00	1.22
3	0.69	0.30	0.01	0.00	0.00	1.32
4	0.61	0.37	0.02	0.00	0.00	1.42
5	0.54	0.42	0.03	0.01	0.00	1.51
6	0.48	0.47	0.05	0.01	0.00	1.59
7	0.42	0.50	0.06	0.02	0.00	1.68
8	0.37	0.53	0.07	0.02	0.00	1.76
9	0.33	0.55	0.08	0.03	0.01	1.84
10	0.29	0.57	0.09	0.04	0.01	1.91
11	0.26	0.58	0.10	0.05	0.02	1.99
12	0.23	0.59	0.11	0.06	0.02	2.06
13	0.20	0.59	0.11	0.07	0.03	2.14
14	0.18	0.59	0.12	0.08	0.04	2.21
15	0.16	0.58	0.13	0.09	0.05	2.28
16	0.14	0.58	0.13	0.10	0.06	2.36
17	0.12	0.57	0.13	0.11	0.07	2.43
18	0.11	0.56	0.14	0.11	0.08	2.50
19	0.09	0.55	0.14	0.12	0.09	2.57
20	0.08	0.54	0.14	0.13	0.11	2.64
21	0.07	0.53	0.14	0.13	0.12	2.71
22	0.07	0.52	0.14	0.14	0.14	2.77
23	0.06	0.50	0.14	0.14	0.16	2.84
24	0.05	0.49	0.14	0.15	0.17	2.91
25	0.05	0.47	0.14	0.15	0.19	2.97
26	0.04	0.46	0.13	0.16	0.21	3.04
27	0.04	0.45	0.13	0.16	0.23	3.10
28	0.03	0.43	0.13	0.16	0.25	3.16
29	0.03	0.42	0.13	0.16	0.27	3.22
30	0.02	0.40	0.12	0.16	0.29	3.28
31	0.02	0.39	0.12	0.16	0.31	3.34
32	0.02	0.38	0.12	0.16	0.32	3.39
33	0.02	0.36	0.12	0.16	0.34	3.45
34	0.01	0.35	0.11	0.16	0.36	3.50
35	0.01	0.34	0.11	0.16	0.38	3.56
36	0.01	0.33	0.11	0.16	0.40	3.61
37	0.01	0.31	0.10	0.15	0.42	3.66
38	0.01	0.30	0.10	0.15	0.44	3.70
39	0.01	0.29	0.10	0.15	0.46	3.75
40	0.01	0.28	0.09	0.15	0.47	3.80

41	0.01	0.27	0.09	0.14	0.49	3.84
42	0.01	0.26	0.09	0.14	0.51	3.88
43	0.00	0.25	0.08	0.14	0.52	3.93
44	0.00	0.24	0.08	0.13	0.54	3.97
45	0.00	0.23	0.08	0.13	0.56	4.00
46	0.00	0.22	0.08	0.13	0.57	4.04
47	0.00	0.21	0.07	0.12	0.59	4.08
48	0.00	0.21	0.07	0.12	0.60	4.11
49	0.00	0.20	0.07	0.12	0.62	4.15
50	0.00	0.19	0.07	0.11	0.63	4.18
51	0.00	0.18	0.06	0.11	0.64	4.21
52	0.00	0.17	0.06	0.11	0.66	4.24
53	0.00	0.17	0.06	0.10	0.67	4.27
54	0.00	0.16	0.06	0.10	0.68	4.30
55	0.00	0.15	0.05	0.10	0.69	4.33
56	0.00	0.15	0.05	0.09	0.71	4.35
57	0.00	0.14	0.05	0.09	0.72	4.38
58	0.00	0.14	0.05	0.09	0.73	4.40
59	0.00	0.13	0.05	0.08	0.74	4.43
60	0.00	0.13	0.04	0.08	0.75	4.45
61	0.00	0.12	0.04	0.08	0.76	4.47
62	0.00	0.12	0.04	0.08	0.77	4.49
63	0.00	0.11	0.04	0.07	0.78	4.51
64	0.00	0.11	0.04	0.07	0.78	4.53
65	0.00	0.10	0.04	0.07	0.79	4.55
66	0.00	0.10	0.03	0.07	0.80	4.57
67	0.00	0.09	0.03	0.06	0.81	4.59
68	0.00	0.09	0.03	0.06	0.82	4.60
69	0.00	0.09	0.03	0.06	0.82	4.62
70	0.00	0.08	0.03	0.06	0.83	4.63
71	0.00	0.08	0.03	0.05	0.84	4.65
72	0.00	0.08	0.03	0.05	0.84	4.66
73	0.00	0.07	0.03	0.05	0.85	4.68
74	0.00	0.07	0.03	0.05	0.86	4.69
75	0.00	0.07	0.02	0.05	0.86	4.70
76	0.00	0.07	0.02	0.04	0.87	4.71
77	0.00	0.06	0.02	0.04	0.87	4.72
78	0.00	0.06	0.02	0.04	0.88	4.74
79	0.00	0.06	0.02	0.04	0.88	4.75
80	0.00	0.06	0.02	0.04	0.89	4.76

Quadro A 7- Probabilidades de transição do estado 2

	Probabilidades					
ANO	1	2	3	4	5	Cond média
0	0	1	0	0	0	2
1.00	0.00	0.96	0.04	0.00	0.00	2.04
2.00	0.00	0.92	0.07	0.01	0.00	2.09

3.00	0.00	0.88	0.10	0.02	0.00	2.14
4.00	0.00	0.85	0.12	0.03	0.00	2.19
5.00	0.00	0.81	0.14	0.05	0.01	2.25
6.00	0.00	0.78	0.15	0.06	0.01	2.31
7.00	0.00	0.75	0.16	0.08	0.02	2.37
8.00	0.00	0.72	0.16	0.09	0.03	2.43
9.00	0.00	0.69	0.17	0.11	0.04	2.50
10.00	0.00	0.66	0.17	0.12	0.05	2.56
11.00	0.00	0.63	0.17	0.13	0.07	2.63
12.00	0.00	0.61	0.17	0.14	0.08	2.70
13.00	0.00	0.58	0.17	0.15	0.10	2.77
14.00	0.00	0.56	0.17	0.16	0.12	2.83
15.00	0.00	0.54	0.16	0.17	0.14	2.90
16.00	0.00	0.51	0.16	0.17	0.16	2.97
17.00	0.00	0.49	0.16	0.17	0.18	3.03
18.00	0.00	0.47	0.15	0.18	0.20	3.10
19.00	0.00	0.45	0.15	0.18	0.22	3.16
20.00	0.00	0.44	0.14	0.18	0.24	3.23
21.00	0.00	0.42	0.14	0.18	0.26	3.29
22.00	0.00	0.40	0.13	0.18	0.28	3.35
23.00	0.00	0.38	0.13	0.18	0.31	3.41
24.00	0.00	0.37	0.13	0.18	0.33	3.46
25.00	0.00	0.35	0.12	0.18	0.35	3.52
26.00	0.00	0.34	0.12	0.17	0.37	3.57
27.00	0.00	0.33	0.11	0.17	0.39	3.63
28.00	0.00	0.31	0.11	0.17	0.41	3.68
29.00	0.00	0.30	0.10	0.16	0.43	3.73
30.00	0.00	0.29	0.10	0.16	0.45	3.78
31.00	0.00	0.28	0.10	0.16	0.47	3.82
32.00	0.00	0.26	0.09	0.15	0.49	3.87
33.00	0.00	0.25	0.09	0.15	0.51	3.91
34.00	0.00	0.24	0.09	0.15	0.53	3.95
35.00	0.00	0.23	0.08	0.14	0.54	3.99
36.00	0.00	0.22	0.08	0.14	0.56	4.03
37.00	0.00	0.22	0.08	0.13	0.58	4.07
38.00	0.00	0.21	0.07	0.13	0.59	4.11
39.00	0.00	0.20	0.07	0.12	0.61	4.14
40.00	0.00	0.19	0.07	0.12	0.62	4.18
41.00	0.00	0.18	0.06	0.12	0.64	4.21
42.00	0.00	0.17	0.06	0.11	0.65	4.24
43.00	0.00	0.17	0.06	0.11	0.66	4.27
44.00	0.00	0.16	0.06	0.10	0.68	4.30
45.00	0.00	0.15	0.05	0.10	0.69	4.33
46.00	0.00	0.15	0.05	0.10	0.70	4.35
47.00	0.00	0.14	0.05	0.09	0.71	4.38
48.00	0.00	0.14	0.05	0.09	0.72	4.40
49.00	0.00	0.13	0.05	0.09	0.74	4.43
50.00	0.00	0.13	0.04	0.08	0.75	4.45
51.00	0.00	0.12	0.04	0.08	0.76	4.47
52.00	0.00	0.12	0.04	0.08	0.77	4.49

53.00	0.00	0.11	0.04	0.07	0.78	4.51
54.00	0.00	0.11	0.04	0.07	0.78	4.53
55.00	0.00	0.10	0.04	0.07	0.79	4.55
56.00	0.00	0.10	0.03	0.07	0.80	4.57
57.00	0.00	0.09	0.03	0.06	0.81	4.59
58.00	0.00	0.09	0.03	0.06	0.82	4.60
59.00	0.00	0.09	0.03	0.06	0.82	4.62
60.00	0.00	0.08	0.03	0.06	0.83	4.64
61.00	0.00	0.08	0.03	0.05	0.84	4.65
62.00	0.00	0.08	0.03	0.05	0.84	4.67
63.00	0.00	0.07	0.03	0.05	0.85	4.68
64.00	0.00	0.07	0.02	0.05	0.86	4.69
65.00	0.00	0.07	0.02	0.05	0.86	4.70
66.00	0.00	0.06	0.02	0.04	0.87	4.72
67.00	0.00	0.06	0.02	0.04	0.87	4.73
68.00	0.00	0.06	0.02	0.04	0.88	4.74
69.00	0.00	0.06	0.02	0.04	0.88	4.75
70.00	0.00	0.05	0.02	0.04	0.89	4.76
71.00	0.00	0.05	0.02	0.04	0.89	4.77
72.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.90	4.78
73.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.90	4.79
74.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.91	4.80
75.00	0.00	0.04	0.02	0.03	0.91	4.80
76.00	0.00	0.04	0.02	0.03	0.91	4.81
77.00	0.00	0.04	0.01	0.03	0.92	4.82
78.00	0.00	0.04	0.01	0.03	0.92	4.83
79.00	0.00	0.04	0.01	0.03	0.92	4.83
80.00	0.00	0.04	0.01	0.03	0.93	4.84

Quadro A 8- Probabilidades de transição do estado 3

	Probabilidades					
ANO	1	2	3	4	5	Cond média
0	0	0	1	0	0	3
1.00	0.00	0.00	0.85	0.15	0.00	3.15
2.00	0.00	0.00	0.71	0.27	0.02	3.30
3.00	0.00	0.00	0.60	0.35	0.05	3.45
4.00	0.00	0.00	0.51	0.40	0.09	3.58
5.00	0.00	0.00	0.43	0.43	0.14	3.71
6.00	0.00	0.00	0.36	0.44	0.19	3.83
7.00	0.00	0.00	0.31	0.45	0.24	3.94
8.00	0.00	0.00	0.26	0.44	0.30	4.04
9.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.35	4.13
10.00	0.00	0.00	0.19	0.41	0.40	4.22
11.00	0.00	0.00	0.16	0.39	0.45	4.29

12.00	0.00	0.00	0.13	0.37	0.50	4.37
13.00	0.00	0.00	0.11	0.35	0.54	4.43
14.00	0.00	0.00	0.09	0.32	0.58	4.49
15.00	0.00	0.00	0.08	0.30	0.62	4.54
16.00	0.00	0.00	0.07	0.27	0.66	4.59
17.00	0.00	0.00	0.06	0.25	0.69	4.63
18.00	0.00	0.00	0.05	0.23	0.72	4.67
19.00	0.00	0.00	0.04	0.21	0.75	4.71
20.00	0.00	0.00	0.03	0.19	0.77	4.74
21.00	0.00	0.00	0.03	0.17	0.80	4.77
22.00	0.00	0.00	0.02	0.16	0.82	4.79
23.00	0.00	0.00	0.02	0.14	0.84	4.82
24.00	0.00	0.00	0.02	0.13	0.85	4.84
25.00	0.00	0.00	0.01	0.12	0.87	4.85
26.00	0.00	0.00	0.01	0.10	0.88	4.87
27.00	0.00	0.00	0.01	0.09	0.90	4.88
28.00	0.00	0.00	0.01	0.08	0.91	4.90
29.00	0.00	0.00	0.01	0.08	0.92	4.91
30.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.93	4.92
31.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.93	4.93
32.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.94	4.94
33.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.95	4.94
34.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.95	4.95
35.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.96	4.96
36.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.96	4.96
37.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.97	4.97
38.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.97	4.97
39.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.97	4.97
40.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	4.98
41.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	4.98
42.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	4.98
43.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	4.98
44.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
45.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
46.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
47.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
48.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
49.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
50.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
51.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
52.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99

53.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
54.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
55.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
56.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
57.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
58.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
59.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
60.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
61.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
62.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
63.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
64.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
65.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
66.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
67.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
68.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
69.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
70.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
71.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
72.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
73.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
74.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
76.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
77.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
78.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
79.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00

Quadro A 9- Probabilidades de transição do estado 4

	Probabilidades					
ANO	1	2	3	4	5	Cond média
0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	4.00
1.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.12	4.12
2.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.23	4.23
3.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.32	4.32
4.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.40	4.40
5.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.47	4.47
6.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.54	4.54
7.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.59	4.59

8.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.64	4.64
9.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.68	4.68
10.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.72	4.72
11.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.75	4.75
12.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.78	4.78
13.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.81	4.81
14.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.83	4.83
15.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.85	4.85
16.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.87	4.87
17.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.89	4.89
18.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.90	4.90
19.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.91	4.91
20.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.92	4.92
21.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.93	4.93
22.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.94	4.94
23.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.95	4.95
24.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.95	4.95
25.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.96	4.96
26.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.96	4.96
27.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.97	4.97
28.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.97	4.97
29.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	4.98
30.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	4.98
31.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	4.98
32.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	4.98
33.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
34.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
35.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
36.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
37.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
38.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
39.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
40.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
41.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	4.99
42.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
43.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
44.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
45.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
46.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
47.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
48.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
49.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00

51.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
52.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
53.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
54.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
55.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
56.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
57.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
58.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
59.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
60.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
61.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
62.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
63.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
64.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
65.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
66.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
67.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
68.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
69.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
70.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
71.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
72.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
73.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
74.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
76.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
77.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
78.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
79.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00
80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.00