

METODOLOGIAS DE PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE MATERIAIS, SISTEMAS OU COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

MARISA RAQUEL PINTO SANTOS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientadora: Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho

JULHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais

*Não é de patriota nem de político abandonar o futuro às contingências da sorte, não criar
para uma obra condições de duração e de estabilidade. Por definição só fica feito o que
perdura*
António Salazar

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta dissertação gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso da concretização deste trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Professora Maria Helena Corvacho, minha orientadora, pela disponibilidade, interesse e cooperação demonstrados durante a realização da dissertação.

Agradeço aos meus irmãos e amigos pela companhia, amizade e apoio dedicado.

Agradeço ao meu namorado, António, pela compreensão, dedicação e estímulo transmitidos nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha mãe pelo tempo dispendido na leitura e correcção da dissertação.

Aos meus pais, em conjunto, agradeço a formação inculcada, o apoio incondicional e a confiança que me transmitiram em todos os momentos e a oportunidade de concretizar os meus objectivos, a quem dedico este trabalho.

RESUMO

Actualmente, tem-se assistido a um aumento significativo de degradação precoce nas construções. A constatação de que mesmo estruturas bem projectadas e construídas, estão sujeitas à ocorrência de deteriorações inesperadas e as preocupações ambientais com que se confronta a sociedade recente, fazem com que seja urgente repensar as actuais construções, tornando imperativo tomar mais medidas de controlo de durabilidade. Como tal, as metodologias de previsão de vida útil das construções e seus elementos assumem um papel muito importante, levando ao interesse do seu estudo por parte de vários autores.

Neste contexto, esta dissertação insere-se numa linha de investigação sobre as metodologias de previsão da vida útil de materiais, sistemas ou componentes da construção existentes, fazendo uma revisão do seu estado da arte.

São analisadas mais pormenorizadamente as metodologias mais relevantes, nomeadamente o Método Factorial, detalhando as suas vantagens, limitações, bem como desenvolvimentos feitos para a sua melhoria, e os métodos de engenharia. Estes apresentam-se como métodos promissores para a avaliação da vida útil estimada de materiais ou componentes de construção, pois utilizam técnicas de engenharia fiáveis, aplicadas de forma sistemática e simples.

Um exemplo de aplicação de uma das metodologias de previsão de vida útil é feito, utilizando o princípio “step-by-step” para vários casos de estudo.

São ainda feitas algumas considerações finais sobre o estudo e propostos desenvolvimentos futuros para melhoria das metodologias abordadas.

Com este trabalho, espera-se contribuir para que todos os agentes intervenientes no processo construtivo e proprietários tenham mais informação e possam tomar opções mais conscientes durante as etapas construtivas e durante a própria utilização do edifício, de modo a ir de encontro a uma construção mais durável e sustentada.

PALAVRAS-CHAVE: deterioração, durabilidade, vida útil, metodologias de previsão, Método Factorial

ABSTRACT

A considerable rise in the premature degradation of constructions has recently been noted. The fact that even structures that are properly designed and built are subject to the occurrence of unexpected degradations and the environmental concerns that current society has to deal with, call for the need to rethink the current constructions, making it absolutely imperative to take measures for durability control. That being, the methods for predicting the service life of constructions and their elements take on a very important part, making this topic intensely interesting for several authors.

In this context, this thesis is part of an investigation trend about the methodologies concerning the prediction of the service life of materials, systems, or components of existing constructions, revising its state of the art.

The most relevant methodologies, mainly the Factor Method, are analyzed in profound detail. Its strengths, limitations, as well as the developments that have been made for its improvement and the engineering methods are presented. These are shown to be promising methods for the evaluation of the estimated service life of materials or construction components, for they employ viable engineering techniques, applied in a systematic and simple way.

An example of the application of one of these methodologies is performed, using the "step-by-step" principle for several case studies.

Some final remarks are made about the study, and future developments for the improvement of the addressed methodologies are also proposed.

With this thesis it is intended to contribute to the community so that all the individuals that take part in the construction process as well as the owners have more information and can, that way, take more informed decisions during the construction and usage phases of the building, so as to attain a more durable and sustained construction.

KEYWORDS: degradation, durability, service life, methods for predicting, Factor Method

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	1
1.2. INTERESSE E JUSTIFICAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. OBJECTIVO E METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	5
2. CONCEITOS BÁSICOS NA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES NO ESTUDO DA VIDA ÚTIL	8
2.2.1. CONCEITO DE VIDA ÚTIL	8
2.2.2. DURABILIDADE.....	9
2.2.3. OBSOLESCÊNCIA	10
2.2.4. FIM DE VIDA ÚTIL.....	11
2.2.5. VIDA ÚTIL DE PROJECTO	12
2.2.6. OUTROS CONCEITOS	14
2.3. NECESSIDADE DE PROJECTO DE VIDA ÚTIL	16
2.4. ESTUDOS E TRABALHOS REALIZADOS.....	17
3. NORMAS, REGULAMENTOS E RECOMENDAÇÕES	21
3.1. INTRODUÇÃO	21
3.2. <i>PRINCIPAL GUIDE FOR SERVICE LIFE PLANNING OF BUILDINGS – JAPÃO</i>	21
3.3. <i>NEW ZEALAND BUILDING CODE (NZBC)</i>	22
3.4. <i>BS 7543 GUIDE TO DURABILITY OF BUILDINGS AND BUILDING ELEMENTS, PRODUCTS AND COMPONENTS</i>	23
3.5. <i>CSA S478-95 GUIDELINE ON DURABILITY IN BUILDINGS</i>	24
3.6. <i>ISO 15686 BUILDINGS AND CONSTRUCTED ASSETS – SERVICE LIFE PLANNING</i>	25
3.7. REGULAMENTO GERAL DAS EDIFICAÇÕES URBANAS (RGEU)	27

4. MÉTODOS PARA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL	29
4.1. INTRODUÇÃO	29
4.2. MÉTODOS DETERMINÍSTICOS	30
4.2.1. ASPECTOS GERAIS	30
4.2.2. MÉTODO FACTORIAL	30
4.2.2.1. Vida Útil de Referência (VUR)	31
4.2.2.2. Factores modificadores	38
4.2.3. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE	40
4.2.3.1. Exemplos de aplicação do Método Factorial	40
4.2.3.2. Outros conceitos	42
4.3. MÉTODOS PROBABILÍSTICOS	44
4.3.1. ASPECTOS GERAIS	44
4.3.2. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE	44
4.3.2.1. Modelos de deterioração de Markov (<i>Markov Chain</i>)	44
4.3.2.2. Variáveis definidas como distribuições	46
4.3.2.3. Exemplos práticos de métodos probabilísticos	50
4.3.2.4. Outros conceitos	52
4.4. MÉTODOS DE ENGENHARIA	54
4.4.1. ASPECTOS GERAIS	54
4.4.2. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE	55
4.4.2.1. Aquisição de dados pelo método Delphi (recursivo)	55
4.4.2.2. <i>Failure Modes and Effects Analysis</i> (FMEA)	55
4.4.2.3. <i>Performance Limit Method</i> (PLM)	65
4.4.2.4. Outros conceitos	66
4.4.2.5. Exemplos de aplicação dos Métodos de Engenharia	68
5. MÉTODO FACTORIAL MELHORADO	77
5.1. FRAGILIDADES DO MÉTODO FACTORIAL DA ISO 15686	77
5.2. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE	78
6. ABORDAGEM ESTOCÁSTICA PARA O MÉTODO FACTORIAL. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	87
6.1. PRINCÍPIO “STEP-BY-STEP”	87

6.2. PRINCIPAIS ETAPAS NO PRINCÍPIO “STEP-BY-STEP”	88
6.2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	88
6.2.2. CONDIÇÕES GERAIS	88
6.2.3. DIVISÃO, ESTRUTURA	88
6.2.4. ESTIMATIVA TRIPLA	89
6.2.5. CÁLCULO	89
6.2.6. DETALHES E ITERAÇÃO	90
6.2.7. CONCLUSÃO E TRABALHO COMPLEMENTAR	90
6.3. MUDANÇAS EM RELAÇÃO AO MÉTODO FACTORIAL DA ISO	90
6.4. EXEMPLOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO	91
6.4.1. EXEMPLO 1	91
6.4.1.1. Cálculo da VUE de acordo com o Método Factorial ISO	91
6.4.1.2 Cálculo da VUE de acordo com o princípio “step-by-step”; o método dos elementos	91
6.4.2 EXEMPLO 2	93
6.4.2.1 Cálculo da VUE de acordo com o Método Factorial ISO	98
6.4.2.2 Cálculo da VUE de acordo com o princípio “step-by-step”; o método dos elementos	98
6.4.2.3 Considerações finais	102
6.4.3 EXEMPLO 3	103
6.4.3.1 Cálculo da VUE de acordo com o Método Factorial ISO	107
6.4.3.2 Cálculo da VUE de acordo com o princípio “step-by-step”; o método dos elementos	107
6.4.3.3 Considerações finais	110
6.4.4 EXEMPLO 4	110
6.4.4.1 Cálculo da VUE de acordo com o Método Factorial ISO	114
6.4.4.2 Cálculo da VUE de acordo com o princípio “step-by-step”; o método dos elementos	114
6.4.4.3 Considerações finais	118
6.5 CONCLUSÕES	119
 7. CONCLUSÕES	 121
7.1. CONCLUSÕES GERAIS	121
7.2. SUGESTÕES DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	123
 BIBLIOGRAFIA	 125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estado de conservação dos alojamentos em Portugal, Censos 2001 (INE).....	1
Figura 1.2 - Importância da previsão da vida útil da construção e seus componentes (adaptado de Brisch e Englund (2005)).....	3
Figura 1.3 - Conhecimento de métodos de previsão da vida útil da construção e seus componentes (adaptado de Brisch e Englund (2005))	3
Figura 2.1 – Degradação esquemática dos diferentes grupos de propriedades (Silva (2009)).....	12
Figura 2.2 – Integração do planeamento da vida útil na actividade de projecto (adaptado da ISO 15686-1 (2000))	16
Figura 3.1 – Informação necessária para o planeamento da vida útil de edifícios (adaptado da ISO 15686-1 (2000))	25
Figura 4.1 - Metodologia para a previsão do tempo de vida útil (adaptado da ISO 15686-2 (2001)) ...	32
Figura 4.2 – Exemplo de uma grelha para a vida útil de um componente de construção (Hans <i>et al</i> (2008)).....	36
Figura 4.3 – Quadro de apoio à ferramenta de avaliação da durabilidade (Lee <i>et al</i> (2008))	37
Figura 4.4 - Correlação entre o número de ciclos de envelhecimento artificial acelerado e o tempo real de exposição natural (adaptado de Freitas <i>et al</i> (2008))	38
Figura 4.5 – Função de deterioração de Markov (adaptado de Hovde e Moser (2004)).....	45
Figura 4.6 – Quatro curvas representativas de degradação (Hovde e Moser (2004))	48
Figura 4.7 - Duas fases do regime de degradação utilizado por Dotreppe (adaptado de Hovde e Moser (2004))	48
Figura 4.8 - Efeitos adversos durante a corrosão das armaduras até ao colapso (adaptado de Hovde e Moser (2004))	49
Figura 4.9 - Resultados de vida útil usando diferentes materiais (adaptado de Hovde e Moser (2004))	51
Figura 4.10 - Dados de entrada e efeitos resultantes do recobrimento de betão e da relação água/cimento no betão fissurado e fragmentado (adaptado de Hovde e Moser (2004))	53
Figura 4.11 – Fluxograma da análise FME(C)A (Silva <i>et al</i> (2006)).....	57
Figura 4.12 - Intervalo de vida útil definido pelas duas abordagens utilizadas por Lair <i>et al</i> (adaptado de Hovde e Moser (2004)).....	58
Figura 4.13 - Análise dos Modos de Falha para o planeamento de ensaios de envelhecimento acelerado para previsão da vida útil (adaptado de Carlsson <i>et al</i> (2002))	60
Figura 4.14 – Formalização da informação dos estados de degradação (adaptado de Talon <i>et al</i> (2005)).....	61
Figura 4.15 – Avaliação de um cenário de degradação (adaptado de Talon <i>et al</i> (2005)).....	61
Figura 4.16 - Metodologia de avaliação do perfil de multi-desempenho de todos os componentes de construção em serviço (adaptado de Talon <i>et al</i> (2008a)).....	62

Figura 4.17 - “Failure event graph” usado para apresentar o resultado do FMEA para dois componentes (envidraçado e revestimento) de um painel solar (adaptado de Hans e Chevalier (2005))	63
Figura 4.18 - Metodologia de estimativa de vida útil à escala do produto e do material (adaptado de Hans e Chevalier (2005))	64
Figura 4.19 - Esquema de análise para avaliação da durabilidade dos componentes de construção (adaptado de Daniotti e Lupica Spagnolo (2008a))	65
Figura 4.20 - Distribuições de vida útil estimada para todas as orientações (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	71
Figura 4.21 - Exigência financeira (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	72
Figura 4.22 - Distribuições da vida útil estimada para as fachadas Este e Oeste (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	74
Figura 4.23 - Distribuições de densidade para a profundidade de penetração de cloreto (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	76
Figura 5.1 - Exemplo de grelha de avaliação: classes de desempenho e valores relacionados (Re Cecconi e Iacono (2005))	81
Figura 5.2 – “one-to-one comparison matrix” (Re Cecconi e Iacono (2005))	82
Figura 6.1 - Fases do processo de iteração no princípio “step-by-step” (adaptado de Aarseth e Hovde (1999))	88
Figura 6.2 – Função de densidade “Erlang” (adaptado de Aarseth e Hovde (1999))	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de obsolescência e exemplos (adaptado da ISO 15686-1 (2000))	10
Tabela 2.2 – Categorias de vidas úteis de projecto para edifícios, sugeridas pela norma CSA S478-95	13
Tabela 2.3 – Duração mínima da vida de projecto sugerida pela norma ISO 15686-1 (2000)	13
Tabela 3.1 - Resumo dos requisitos de desempenho para elementos de construção especificados pela cláusula B2 <i>Durability</i> do NZBC (adaptado de Lee <i>et al</i> (2008))	22
Tabela 4.1 – Agentes de degradação (adaptado da ISO 15686-1 (2000))	33
Tabela 4.2 - Valores de desvio dos factores em relação à condição de referência	39
Tabela 4.3 – Escala de classificação do ambiente exterior de um edifício ou componente (adaptado de Mc Duling <i>et al</i> (2008b))	43
Tabela 4.4 - Distribuições de entrada usadas no projecto do túnel <i>Western Scheldt</i> (adaptado de Hovde e Moser (2004))	50
Tabela 4.5 – Classificação visual para avaliação do estado de degradação dos rebocos (Gaspar e Brito (2005))	67
Tabela 4.6 - Valores estimados dos factores para os percentis (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	69
Tabela 4.7- Distribuição da vida útil estimada dos componentes (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	70
Tabela 4.8 - Vida útil e factores equivalentes para diferentes exposições (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	73
Tabela 4.9 - Vida útil e factores equivalentes para diferentes exposições (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	74
Tabela 4.10 - Valores utilizados para os cálculos de difusão (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))	75
Tabela 5.1 – Conjunto de agentes de influência (adaptado de Nicolella e De Pascale (2005))	85
Tabela 5.2 – Principais diferenças entre o Método Factorial e o Método NIC (adaptado de Nicolella e De Pascale (2005))	86
Tabela 6.1 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step” (adaptado de Aarseth e Hovde (1999))	92
Tabela 6.2 – Projecto X: índices aplicáveis aos factores modificadores para a situação S1 (Lopes (2009))	94
Tabela 6.3 – Projecto X: índices aplicáveis aos factores modificadores para a situação S2 (Lopes (2009))	95
Tabela 6.4 – Projecto Y: índices aplicáveis aos factores modificadores para a situação S1 (Lopes (2009))	96

Tabela 6.5 – Projecto Y: índices aplicáveis aos factores modificadores para a situação S2 (Lopes (2009)).....	97
Tabela 6.6 – Cálculo da vida útil estimada para as várias situações de projecto X.....	98
Tabela 6.7 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto X, situação S1....	98
Tabela 6.8 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto X, situação S2....	99
Tabela 6.9 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto Y, situação S1..	100
Tabela 6.10 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto Y, situação S2	101
Tabela 6.11 – Índices aplicáveis aos factores modificadores para a cidade do Porto (Raposo (2009))	104
Tabela 6.12 – Índices aplicáveis aos factores modificadores para a cidade de Bragança (Raposo (2009)).....	105
Tabela 6.13 – Índices aplicáveis aos factores modificadores para a cidade de Lisboa (Raposo (2009))	106
Tabela 6.14 – Cálculo da vida útil estimada para a cidade do Porto	107
Tabela 6.15 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para a cidade do Porto	107
Tabela 6.16 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para a cidade de Bragança.....	108
Tabela 6.17 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para a cidade de Lisboa	109
Tabela 6.18 – Projecto A: índices aplicáveis aos factores modificadores para os produtos 1 e 2 (Matos (2007)).....	112
Tabela 6.19 – Projecto B: índices aplicáveis aos factores modificadores para os produtos 1 e 2 (Matos (2007)).....	113
Tabela 6.20 – Cálculo da vida útil estimada para os vários produtos do projecto A.....	114
Tabela 6.21 – Cálculo da vida útil estimada para os vários produtos do projecto B.....	114
Tabela 6.22 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto A, produto 1 ...	114
Tabela 6.23 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto A, produto 2 ...	115
Tabela 6.24 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto B, produto 1 ...	116
Tabela 6.25 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto B, produto 2 ...	117

SÍMBOLOS

f_A - qualidade do material ou componente

f_B - nível de qualidade do projecto

f_C - nível de qualidade da execução do trabalho

f_D - características do ambiente interior

f_E - características do ambiente exterior

f_F - características do uso

f_G - nível de manutenção

ABREVIATURAS

ASTM - American Society for Testing and Materials

CIB - Conseil International du Bâtiment

CIRSL - Consolidated Intrinsic Reference Service Life

CSA - Canadian Standards Association

CSTB - Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

DBMC - Durability of Buildings Materials and Components

EPIQR - Energy Performance Indoor Environment Quality Retrofit

EUA – Estados Unidos da América

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FMEA - Failure Mode and Effects Analysis

FMECA - Failure Mode Effects and Criticality Analysis

IEA - International Energy Agency

INE - Instituto Nacional de Estatística

IRSL - Intrinsic Reference Service Life

ISO – International Organization for Standardization

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MEDIC – Prediction Method of probable Deterioration Scenarios and Refurbishment

NZBC - New Zealand Building Code

PeBBu - Performance Based Building Investment Budgets

PLM - Performance Limit Method

PROBE – Post-occupancy Review of Buildings and their Engineering

PVU – Previsão da vida útil

RGEU - Regulamento Geral das Edificações Urbanas

RILEM - International Union Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

UE – União Europeia

VUE – Vida útil estimada

VUP – vida útil prevista

VUR – Vida útil de referência

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Nas últimas décadas, tem-se verificado um rápido aumento do património construído. Este não teve em consideração questões de sustentabilidade e durabilidade, não tendo sido adoptadas quaisquer medidas de gestão de manutenção em fase de serviço, resultando assim, no célere envelhecimento prematuro, a que se assiste hoje.

De acordo com os resultados publicados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) com base nos resultados definitivos dos Censos 2001, cerca de 40% das habitações em Portugal necessitam de reparações (ver figura 1.1). Este valor pode ser explicado pelo reduzido investimento na sua manutenção.

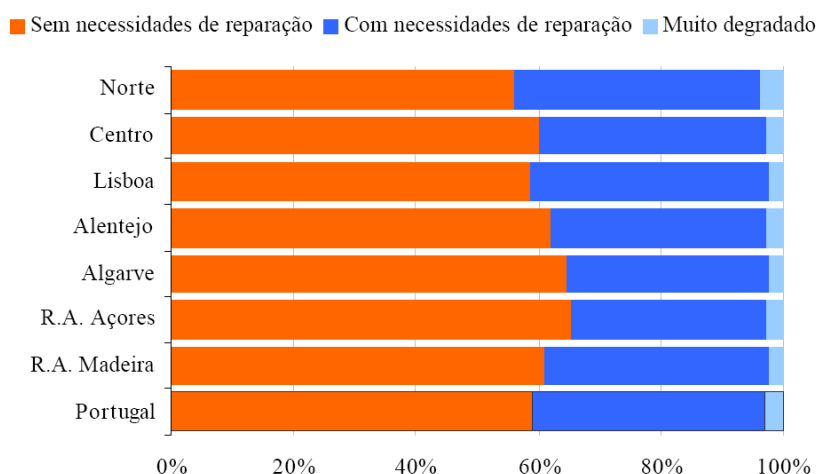


Figura 1.1 - Estado de conservação dos alojamentos em Portugal, Censos 2001 (INE)

Além disso, sabemos que a indústria da construção recorre enormes quantidades de materiais e de energia. Em todas as sociedades é o sector que mais materiais emprega. Estima-se que, no Japão, a construção civil seja responsável pelo consumo de 50% da matéria bruta, o que nos EUA corresponde a 75% do consumo total de materiais. As estimativas indicam que na União Europeia as construções consomem cerca de 40% da energia total, sendo responsáveis por 30% das emissões de CO₂, e geram cerca de 40% dos resíduos resultantes da acção humana (Gomes e Ferreira (2009)).

Os edifícios e o património construído constituem uma parte importante do valor real de um país. O planeamento, construção, utilização, gestão e demolição dos edifícios e património construído

desempenham, portanto um papel determinante no desenvolvimento de sociedades mais sustentáveis. Uma parte importante desse desenvolvimento são os esforços para obter uma correcta vida útil das construções (Hovde (2002)).

Construir, tendo em conta a durabilidade dos materiais e o aumento da sua vida útil, contribui directamente para a menor produção e depósito de resíduos. Como tal, para salvaguardar o nosso ambiente construído é necessário estudar, analisar e agir de modo a controlar e aumentar a durabilidade dos materiais, componentes e elementos de construção.

De facto, nos decénios recentes, tem-se assistido a uma crescente preocupação em determinar a durabilidade e vida útil dos materiais, componentes, instalações, estruturas e edifícios. Segundo Hovde (2002), esta tem sido baseada principalmente em dois aspectos importantes:

- Problemas ambientais: devido à falta de recursos de materiais e de energia sendo o sector da construção grande consumidor desses recursos. Acresce a isto o impacto ambiental causado pela construção;
- Problemas económicos: devido ao valor total do ambiente construído a nível nacional e de cada unidade específica (edifícios, estruturas, estradas, pontes, cais, etc.) e a nível mais específico (autarquias, empresas privadas ou indivíduos). As condições do ambiente construído, os custos anuais de gestão e de manutenção e os custos do ciclo de vida são cruciais para a economia.

1.2. INTERESSE E JUSTIFICAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Como se depreende do que foi dito anteriormente, a proliferação desenfreada de construções, de forma não sustentada, e os subsequentes custos elevados de reparação e manutenção a longo prazo levaram a uma grande evolução da deterioração das construções. Outra das causas deste desgaste precoce é a introdução de novos produtos e/ou sistemas na actividade da construção associados às novas tecnologias, sem o devido conhecimento da sua correcta aplicação e do seu futuro desempenho. Estas e outras razões têm obrigado a uma reflexão criteriosa sobre a temática da durabilidade e da previsão do tempo de vida útil dos produtos usados na construção com o intuito de avaliar qual o seu desempenho ao longo do tempo de serviço.

Esta durabilidade deve ser tida em conta, logo a partir da fase de projecto, uma vez que é nesta etapa que se escolhem os produtos a aplicar na construção, sendo de extrema importância a selecção adequada da solução construtiva e o conhecimento exaustivo do desempenho dos seus componentes para um projecto de durabilidade.

De acordo com a ISO 15686-1 (2000) o projecto para a durabilidade (através do planeamento da vida útil, “Service Life Planning”) é definido como a elaboração do programa seguido do projecto do edifício e dos seus constituintes, de forma a cumprir a vida de projecto requerida, a reduzir os custos da propriedade e facilitar a manutenção e a reparação.

Na fase de construção, também se devem seguir procedimentos que assegurem a qualidade da execução. Já na fase de utilização, deverão existir planos de manutenção e reparação, evitando a degradação precoce e a obsolescência das construções.

O recurso a metodologias de previsão da vida útil dos produtos da construção no sentido de avaliar, em anos de serviço, o seu desempenho nos edifícios, tem permitido seleccionar alternativas ao nível da concepção de edifícios. É importante saber, *a priori*, o tempo de vida útil dos diversos elementos constituintes de uma construção, de modo a aplicar componentes com a durabilidade adequada à

construção no geral, ou prever a substituição dos mesmos, quando deixarem de cumprir as exigências requeridas, aumentando assim a vida útil de toda a construção ou evitando a sua deterioração precoce.

De acordo com um inquérito feito por Brisch e Englund (2005) a pesquisadores, universidades, fabricantes, entre outras entidades ligadas à área da construção, 63% responderam que a previsão de vida útil do edifícios e componentes de construção é importante, mas apenas 40% utilizam métodos de previsão de vida útil, como se pode ver nas figuras 1.2 e 1.3, respectivamente, provenientes dos resultados obtidos nesse inquérito.

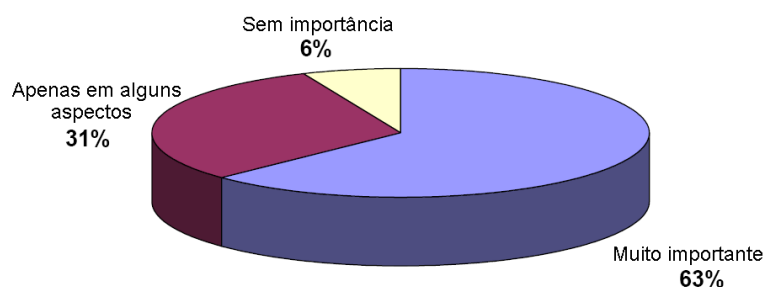


Figura 1.2 - Importância da previsão da vida útil da construção e seus componentes (adaptado de Brisch e Englund (2005))

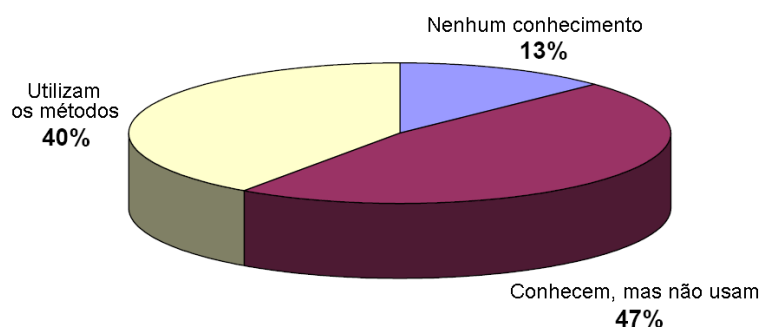


Figura 1.3 - Conhecimento de métodos de previsão da vida útil da construção e seus componentes (adaptado de Brisch e Englund (2005))

No entanto, a previsão da vida útil das construções é um assunto bastante complexo, que continua a ser alvo de constante estudo por parte dos vários intervenientes na construção, nomeadamente arquitectos, engenheiros, projectistas, entre outros especialistas, bem como por parte de várias organizações internacionalmente reconhecidas.

Lee *et al* (2008) referem que os métodos e metodologias de avaliação de desempenho existentes, a nível material, a nível do componente de construção, e a nível de construção, têm a mesma limitação: tentam estudar um ou vários critérios de desempenho relevantes para a mesma preocupação, como por exemplo, a resistência às acções de carácter excepcional ou acção accidental, conforto térmico, etc.

Neste contexto, é necessária uma visão de conjunto, uma metodologia aplicável a todos os componentes de construção e que, em cada momento da vida útil, proporcione uma visão global de todos os critérios de desempenho relevantes para as expectativas dos utilizadores em relação aos componentes de construção.

Um dos estudos pioneiros nesta área foi a publicação de uma metodologia de previsão de vida útil elaborada pelo Instituto de Arquitectura do Japão – o *Factor Method* (Método Factorial), que serviu de base à norma ISO 15686 - *Service Life Planning of Buildings* do *International Organization for Standardization*. Esta norma pretende fornecer uma orientação e uma generalização dos procedimentos para previsão da vida útil dos elementos de construção. Este método apesar de ter algumas limitações é um dos métodos mais utilizados pela sua clareza e facilidade de aplicação, necessitando ainda de algumas melhorias.

Vários países têm desenvolvido legislação nesta área, permitindo aos projectistas estimar a vida útil dos materiais e elementos de construção usados.

Ora, face ao exposto é determinante contribuir para o alargamento do conhecimento das metodologias existentes para previsão da vida útil, no sentido de incrementar a sua aplicação e os estudos necessários nesta área e, é neste sentido, que elaborei esta dissertação.

1.3. OBJECTIVO E METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho tem como objectivo principal fazer uma revisão do estado da arte das metodologias de previsão de vida útil de materiais, sistemas ou componentes da construção existentes.

De modo a complementar o estudo, pretende-se ir um pouco mais longe, fazendo a aplicação de uma das metodologias abordadas, com o intuito de verificar a sua viabilidade de execução. Este exemplo de aplicação será analisado, de modo a apontar as principais vantagens e limitações na sua aplicação e propor futuros desenvolvimentos de melhoria.

Esta exposição visa contribuir, portanto, para o conhecimento das principais metodologias de previsão de vida útil e para a melhoria de durabilidade dos elementos da construção. É possível então definir estratégias de manutenção e reparação desses mesmos elementos e fazer uma boa racionalização de escolha dos elementos de construção na altura do projecto, com vista a uma construção sustentável.

A realização desta dissertação obedeceu a várias etapas, assentes na metodologia a seguir descrita.

Recolha de informação: Esta foi uma fase crucial na realização deste trabalho, sendo a base essencial para o seu desenvolvimento, estando sempre presente e constituindo um processo contínuo. Nela obteve-se um enquadramento de toda a temática em estudo, consolidando os conhecimentos na área, constituindo, deste modo, o ponto de partida para a realização das etapas seguintes. A realização da pesquisa incidiu principalmente nos seguintes conceitos:

- Vida útil;
- Durabilidade;
- Deterioração;
- Planeamento da vida útil;
- Metodologias/Métodos de previsão da vida útil;
- Ferramentas para a previsão da vida útil;
- Normas/regulamentos relacionados com a previsão da vida útil;
- Método Factorial.

Estado da arte: Nesta fase foi feita uma revisão dos estudos feitos nesta área. Tentou-se focar os principais trabalhos e actividades realizados até ao momento, quer a nível nacional, quer a nível internacional. Esta recolha de informação baseou-se, principalmente, nas investigações feitas por organizações e entidades experientes nesta temática.

Estudo das metodologias de previsão: Foi feita uma análise mais aprofundada de algumas das metodologias de previsão de vida útil de construções e seus elementos, explorando-as tanto quanto possível.

Aplicação das metodologias: Depois do estudo detalhado das metodologias, procedeu-se à aplicação de uma das metodologias. Essa metodologia foi aplicada a alguns casos de estudo, com o intuito de analisar a sua aplicabilidade a qualquer caso. A escolha da metodologia a aplicar recaiu numa das que detinha mais informação detalhada do seu modo de procedimento e com bastante potencial de aplicação, não sendo considerada necessariamente como a melhor metodologia a aplicar.

Análise e discussão dos resultados: Analisaram-se os resultados obtidos na aplicação da metodologia para os vários casos de estudo, discutindo as principais vantagens, desvantagens e limitações na sua aplicação. É ainda feita uma proposta para desenvolvimentos futuros, com o pressuposto de melhoria dos estudos feitos até ao momento, para uma correcta previsão da vida útil de materiais, sistemas ou componentes da construção.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos.

No presente capítulo, introduz-se o tema, enquadrando a importância da durabilidade no sector da construção e no contexto de uma construção sustentável. Refere-se a importância da previsão de vida útil nas construções e seus elementos, apelando à urgência de aplicação de metodologias de previsão. Apresentam-se ainda o objectivo pretendido com a elaboração desta dissertação e a metodologia utilizada na sua concepção, bem como a maneira como está organizada.

No capítulo dois, abordam-se os principais conceitos relacionados com a vida útil das construções para melhor compreensão do presente trabalho. Alerta-se para a necessidade de um projecto de vida útil e indicam-se os principais estudos e trabalhos realizados nesta área.

No capítulo três, faz-se um enquadramento das principais normas, regulamentos e recomendações em vigor nalguns países, no que diz respeito à durabilidade e previsão da vida útil das construções. São abordados os documentos prescritivos mais importantes, descrevendo os aspectos principais que neles se aplicam.

No capítulo quatro, explicita-se o estado da arte dos diversos métodos de previsão da vida útil dos edifícios, elementos e materiais de construção existentes, começando por uma caracterização geral dos vários tipos de métodos. É detalhada a descrição de cada um deles, a sua metodologia de aplicação, bem como uma alusão a vários exemplos de aplicação.

No capítulo cinco, especificam-se alguns estudos referentes especificamente à melhoria do Método Factorial. É feita uma revisão do estado da arte dos desenvolvimentos feitos por alguns especialistas nessa área, com o objectivo de combater algumas das limitações verificadas na simples aplicação do Método Factorial.

No capítulo seis, é apresentada uma abordagem estocástica para o Método Factorial, pormenorizando as principais etapas de procedimento do princípio “step-by-step” e procede-se à sua aplicação a alguns exemplos de casos, de acordo com a informação disponível.

Por último, no capítulo sete, fazem-se algumas considerações finais sobre o estudo realizado, assim como são retiradas ilações finais e faz-se uma importante referência a desenvolvimentos futuros para melhoria das metodologias abordadas.

2

CONCEITOS BÁSICOS NA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL

2.1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente preocupação com a durabilidade da construção têm surgido inúmeros documentos que exploram e regulamentam métodos para a previsão da vida útil na construção.

Segundo Freitas *et al* (2008) “o objectivo de qualquer previsão de vida útil de um material, sistema ou componente integrado num edifício é o de avaliar a sua capacidade de executar satisfatoriamente as suas operações em toda a vida útil do edifício ou ao longo do período considerado razoável para a sua substituição ou reparação. A definição de um modelo de previsão de vida útil e a sua aplicação são fundamentais, por esta ser capaz de avaliar a fiabilidade do modelo definido”.

Apesar dos muitos esforços feitos nesta área e dos vários temas abordados serem cada vez mais específicos, o seu conteúdo parece ser bastante geral, sem bases suficientes de aplicação. É então indispensável continuar a reunir forças, no sentido de combater esta subjectividade e tornar a construção mais pensada.

De modo a fornecer orientações para a investigação sobre a previsão de vida útil de materiais e componentes, Masters (1986) define “Dez Mandamentos”, que são os seguintes:

1. Definir explicitamente o problema antes de tentar resolvê-lo;
2. Definir a vida útil de tal forma que a) possa ser medida (quantitativamente) e b) possa estar relacionada com o desempenho em serviço;
3. Estar aberto a novas abordagens e métodos, em vez de aceitar cegamente os tradicionais;
4. Usar procedimentos simples e sistemáticos tendo por base a lógica, senso comum e material científico;
5. Estar ciente de que, dados qualitativos de ensaios de envelhecimento acelerado não sistemáticos podem conduzir a conclusões erradas.
6. Reconhecer que é impossível simular em laboratório todas as condições verificadas em serviço, mas também não é necessário fazê-lo;
7. Garantir que os processos de degradação induzidos por ensaios de envelhecimento acelerado são os mesmos que os verificados em serviço;
8. Medir os factores de degradação;
9. Ser cauteloso em relação às correlações;
10. Reconhecer que, usando procedimentos quantitativos sistemáticos, podem ser desenvolvidos ensaios de envelhecimento acelerado válidos.

Neste capítulo alerta-se para a necessidade de um projecto de vida útil das construções, como um aliado da durabilidade e sustentabilidade e serão abordados os principais conceitos associados a esse tema, tais como a definição de vida útil, durabilidade, obsolescência e fim de vida útil.

2.2. TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES NO ESTUDO DA VIDA ÚTIL

Este assunto engloba uma série de conceitos que aparecem definidos em diferentes normas e documentos, no entanto estas nomenclaturas não se encontram completamente consolidadas. Muitas vezes existe confusão entre os vários conceitos relacionados com esta temática. Estabelecer uma terminologia comum é, portanto, um passo crítico.

Em seguida, apresentam-se alguns conceitos pertinentes no contexto deste trabalho para uma melhor compreensão do mesmo, que visam estabelecer um conjunto de definições como um fundamento básico para qualquer estrutura.

2.2.1. CONCEITO DE VIDA ÚTIL

Apesar da utilização do conceito de vida útil ser universal, a sua definição não reúne um consenso geral, não sendo possível uma uniformização do seu significado. A definição deste termo é abordada por vários autores e varia consoante o contexto em que se enquadra, os requisitos mínimos exigidos, bem como os critérios utilizados na sua definição.

Existem diversas definições para este conceito, vejamos em seguida algumas delas.

Segundo a norma ISO 15686-1 (2000), a vida útil é definida como o período de tempo, após instalação, durante o qual o edifício ou suas partes atingem ou excedem os requisitos de desempenho, sendo os requisitos de desempenho o nível mínimo aceitável de uma propriedade crítica.

Baseados nesta definição, Balaras *et al* (2005) são um pouco mais exigentes considerando a vida útil de um componente de construção o período de tempo após a instalação ou construção, durante o qual todas as propriedades atingem ou superam o desempenho mínimo aceitável, quando sujeitos a uma rotina de manutenção.

A norma canadiana CSA S478-95 “Guideline on Durability in Buildings” descreve-a como o período de tempo real durante o qual o edifício ou qualquer um dos seus componentes cumpre os seus objectivos sem custos imprevistos ou interrupções para manutenção e reparações.

Ripper (2003), numa palestra sobre o desempenho das construções refere que a “vida útil de uma construção é o período durante o qual esta conserva os requisitos estabelecidos em projecto quanto a segurança, funcionalidade e estética, sem custos inesperados de manutenção (reparação).”

Este termo pode ainda ser visto como “o período de tempo em anos, desde o fim da construção até ao momento em que o edifício, no seu todo ou os seus elementos ou equipamentos, atinge determinados estados limite de deterioração física, de degradação de comportamento ou obsolescência económica ou funcional. O patamar limite de vida útil pressupõe a tomada de acções de reparação e renovação destinadas a prolongar a utilização em pleno do edifício no seu todo.” (in <http://joseromanoarquitectos.com.pt/servicos/planos.htm>).

A descrição deste conceito varia, essencialmente, no que diz respeito às rotinas de manutenção, sendo necessário implementar um conceito global e normalizado, entendido de igual modo por todos os intervenientes na construção.

2.2.2. DURABILIDADE

A previsão da vida útil de um material, sistema ou componente de construção implica o conhecimento da durabilidade do mesmo.

De acordo com Gomes e Ferreira (2009) “uma construção é durável se for capaz de desempenhar as funções para que foi concebida, durante o período de vida previsto, sem que para tal seja necessário dispendir custos de manutenção e reparação imprevistos. A durabilidade, sendo caracterizada pela vida útil de um conjunto de materiais e componentes, desempenha uma função importante para a obtenção duma construção sustentável”.

Assegurar que os edifícios têm uma durabilidade adequada sempre foi um aspecto importante da regulamentação da construção. Isto é também enfatizado pelo actual *New Zealand Building Code* (NZBC), que inclui o requisito funcional de que: “os materiais de construção, componentes e métodos de construção devem ser suficientemente duráveis para garantir que o edifício, sem grandes obras de renovação ou reconstrução, satisfaça os outros requisitos funcionais deste código ao longo da vida do edifício” (Lee *et al* (2008)).

Segundo a norma canadiana CSA S478-95, “durabilidade é a capacidade de uma construção ou qualquer um dos seus componentes para realizar as funções requeridas no seu ambiente de serviço, durante um intervalo de tempo, sem custos imprevistos para manutenção ou reparação”.

Já a ISO 15686 define-a como sendo a “capacidade de um edifício ou de uma parte de um edifício de desempenhar a sua função durante um determinado intervalo de tempo, sob a acção dos agentes presentes em serviço”, acrescentando uma nota importante de que “esta não é uma propriedade intrínseca de um produto ou componentes, mas sim uma característica que depende das condições a que está sujeito, em serviço”.

Em nenhuma destas normas é especificada a definição de período de tempo, podendo este não ser necessariamente um longo período de tempo.

A vida útil, assim como a durabilidade, é muito dependente dos agentes externos que actuam num material, bem como sobre as características inerentes ao material ou a capacidade de resistir a esses agentes.

As propriedades inerentes não conduzem necessariamente à durabilidade em todas as condições. Não há dúvida de que, para um determinado conjunto de condições, alguns materiais têm uma vida útil mais longa do que outros. No entanto, essas condições devem ser sempre tidas em conta, e a nota inserida na ISO após a sua definição denota essa diferença subtil, mas fundamental (Athena Institute (2006)).

Mc Duling *et al* (2008) têm em consideração as condições a que um elemento pode estar sujeito, defendendo que a “durabilidade é a capacidade de um edifício ou de um componente para resistir aos efeitos adversos da exposição ao ambiente. A degradação é determinada pelo ambiente, que pode ser dividido em ambiente físico e operacional. O ambiente físico em torno do edifício ou componente compreende um macroclima (condições meteorológicas brutas), mesoclima (terreno e local do ambiente construído) e microclima (proximidade absoluta de uma superfície do material). O ambiente operacional ou a “cultura do utilizador” é determinado pelo nível e extensão da utilização do edifício pelos ocupantes”. No entanto, não faz alusão a qualquer período de tempo e tal como a ISO 15686 não faz referência explícita a custos imprevistos de manutenção ou reparação.

Como tal, nenhuma das definições se encontra completamente consolidada, sendo necessária uma actualização de conceitos, substituindo as definições já existentes por uma melhorada, que tenha em conta todos estes aspectos.

2.2.3. OBSOLESCÊNCIA

A obsolescência é também um problema de vida útil. A obsolescência não é decorrente de um processo de degradação, mas de mudanças nas exigências do utilizador. Pode ser considerada como a vida útil de serviço definida socialmente. Como não é possível estimar as mudanças sociais que irão ocorrer a longo prazo, não se pode controlar a durabilidade perante a obsolescência. No entanto, podem ser minimizadas as acções ambientais relativas à obsolescência, fazendo com que os componentes que se podem tornar antiquados com maior facilidade sejam facilmente substituídos. Além disso, todo o edifício pode tornar-se obsoleto. As decisões de projecto podem controlar a velocidade de obsolescência do edifício e facilitar o processo de demolição e reutilização dos componentes. O conhecimento é o factor decisivo no controlo dos problemas de durabilidade relacionados com a obsolescência (John *et al* (2001)).

Obsolescência é definida na norma ISO 15868 como “a perda de aptidão de um determinado item para desempenhar satisfatoriamente as suas funções devido a alterações no nível de desempenho exigido”.

De acordo com a mesma norma, é possível distinguir três tipos de obsolescência nos edifícios: a funcional, a tecnológica e a económica. A sua ocorrência típica e exemplos dos diferentes tipos de obsolescência são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 2.1 - Tipos de obsolescência e exemplos (adaptado da ISO 15686-1 (2000))

Tipo de Obsolescência	Ocorrência Típica	Exemplos
Funcional	A função em causa já não é requerida	Processo industrial obsoleto, instalações desnecessárias, divisória removida (em escritórios, por ex.)
Tecnológica	Alternativas actuais com melhor desempenho, mudança de padrões de uso	Mudança do isolamento térmico para um melhor desempenho, mudança para caixilharias mais estanques
Económica	Item ainda totalmente funcional, mas menos eficiente e económico que novas alternativas	Mudança do sistema de aquecimento

Akivuori (1999) classifica a obsolescência de acordo com mais tipologias para além da funcional, económica e tecnológica, acrescentando a obsolescência de localização, obsolescência legal, obsolescência estética e visual (moda/obsolescência da imagem) e obsolescência ambiental.

É muito difícil estimar o momento em que um determinado elemento da construção se torna obsoleto, uma vez que este depende de vários factores que variam ao longo do tempo, tais como a cultura, a mentalidade da sociedade, a moda, as tendências, entre outros, e que são muito difíceis de quantificar.

Como tal é extremamente importante conhecer o ritmo e as causas das alterações destes factores de forma a facilitar a quantificação do critério de obsolescência.

2.2.4. FIM DE VIDA ÚTIL

Um elemento de construção atinge o fim da sua vida útil quando deixa de desempenhar adequadamente as funções que lhe foram previamente exigidas, devido a alterações no desempenho requerido em relação à utilização destinada. Uma vez que o desempenho requerido é de difícil quantificação, a definição do fim de vida útil é complexa.

“Considera-se que se atingiu o limite de durabilidade do componente quando determinado fenómeno de degradação (ou a acção conjugada de vários fenómenos) que age sobre determinado elemento conduz à ultrapassagem de determinado estado limite previamente definido. Esta tarefa não é fácil (os próprios critérios do que é aceitável mudam ao longo do tempo) e a forma de definir os estados limite pode variar consoante se considerem exigências de segurança, de funcionalidade ou de aparência” (Gaspar e Brito (2005)).

Segundo Hovde e Moser (2004), todos os métodos de previsão de vida útil exigem definições claras do fim da vida útil. Este não é, contudo, um valor universal e facilmente definido. Em termos gerais, o fim de vida útil é o momento em que a função para a qual a construção e os seus componentes foram previstos deixa de ser cumprida. De modo a clarificar e facilitar a sua definição, este autor divide as propriedades de um elemento de construção em exigências de segurança, função e aparência, considerando o fim de vida útil quando uma dessas exigências deixar de ser cumprida. Assim para cada uma delas, a exigência é cumprida se:

- Segurança: a integridade do elemento de construção é mantida no nível padrão de segurança;
- Função: a função desejada é cumprida;
- Aparência: a aparência esperada é verificada.

Este conceito pode ser definido graficamente, fazendo uma comparação das diferentes degradações destes três conjuntos de propriedades e indicando diferentes níveis mínimos de exigência para cada um. A segurança é um critério fundamental, tendo por isso um nível de exigência superior ao dos outros critérios. No entanto, as propriedades estéticas são apresentadas como o grupo que mais rapidamente atinge os níveis mínimos, sendo assumido que estas correspondem muitas vezes às propriedades condicionantes da vida útil (Sousa (2008), Silva (2009)).

Na figura seguinte é possível visualizar esse gráfico.

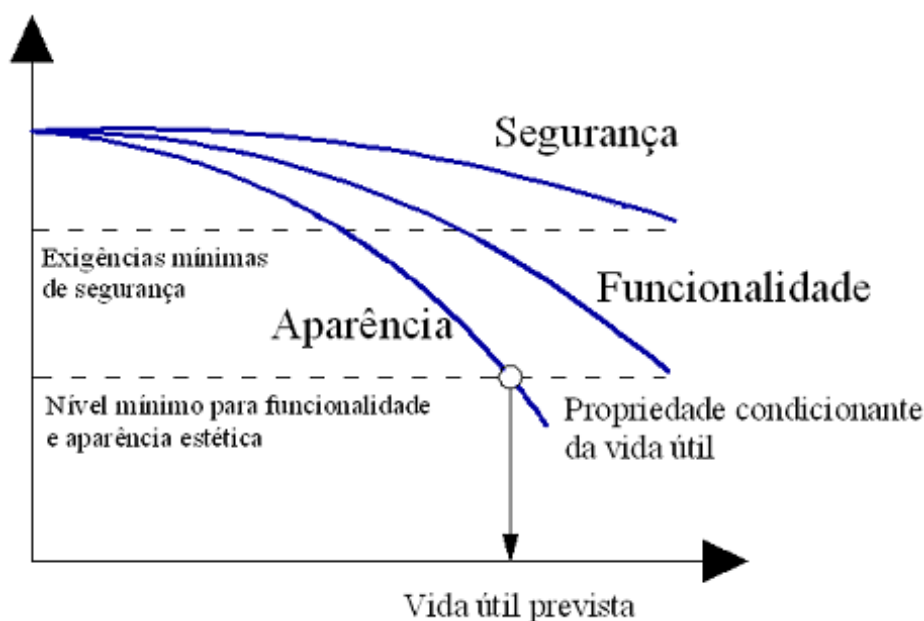


Figura 2.1 – Degradação esquemática dos diferentes grupos de propriedades (Silva (2009))

Aikivuori (1999) defende que o fim da vida útil ocorre quando o edifício deixa de funcionar como o requerido. Essa falha pode ser um resultado de três causas:

1. Falha resultante de mudança(s) no desempenho (falha baseada na deterioração);
2. Falha resultante de mudança(s) no(s) requisito(s) (falha baseada na obsolescência);
3. Falha resultante de mudança(s) de utilização.

2.2.5. VIDA ÚTIL DE PROJECTO

A norma ISO 15686-1 (2000) define vida útil de projecto como sendo “a vida útil considerada pelo projectista como base para as suas especificações”.

A norma canadiana CSA S478-95 “Guideline on Durability in Buildings” vai mais longe, envolvendo as exigências dos proprietários da construção e definindo-a então como “a vida útil especificada pelo projectista de acordo com as expectativas (ou requisitos) dos donos do edifício ou construção”.

Esta está então intimamente ligada aos requisitos de durabilidade pretendidos no edifício, quer sejam por parte do projectista, quer por parte do utilizador, correspondendo estes à base da definição da vida útil de projecto.

Contudo, estes requisitos de durabilidade variam com vários aspectos, diferindo de acordo com as características do edifício e dos seus elementos, o que vai originar uma variabilidade na vida útil dos mesmos.

Apresentam-se, em seguida, nas tabelas 2.2 e 2.3 as vidas úteis de projecto usuais em edifícios e em diferentes categorias de componentes, respectivamente.

Tabela 2.2 – Categorias de vidas úteis de projecto para edifícios, sugeridas pela norma CSA S478-95

Categoria	Vida útil de projecto para edifícios	Exemplos
Temporários	Até 10 anos	- Construções não permanentes, escritórios de venda - Construções para exposições temporárias
Curta duração	10 a 24 anos	- Salas de aulas temporárias
Média duração	25 a 49 anos	- Maioria das construções industriais - Maioria das construções para estacionamento
Longa duração	50 a 99 anos	- Maioria das construções habitacionais, comerciais, para escritórios e serviços
Permanente	Período mínimo de 100 anos	- Monumentos (museus, galerias de arte e arquivos) - Património

Tabela 2.3 – Duração mínima da vida de projecto sugerida pela norma ISO 15686-1 (2000)

Vida útil de projecto do edifício	Elementos inacessíveis ou estruturais	Elementos de manutenção difícil ou onerosa	Elementos facilmente substituíveis	Instalações de serviços e trabalhos exteriores
Ilimitada	Ilimitada	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

Hovde e Moser (2004) dão ainda contornos para a definição do fim de vida útil no conceito da engenharia estrutural, especificamente para elementos de betão armado. Dependendo da função da parte de um edifício ou estrutura, são utilizados, frequentemente, critérios de engenharia para o fim da vida útil, a fim de permitir um cálculo significativo da vida útil. Esses critérios são:

- O recobrimento mínimo de betão para um determinado ambiente;

- A chegada da frente de carbonização para a face externa do aço de reforço é considerado o fim da vida útil;
- A chegada da frente de penetração de cloreto para a face externa do aço de reforço é considerado o fim da vida útil;
- O início de fragmentação é considerado como o fim da vida útil.

2.2.6. OUTROS CONCEITOS

Os conceitos que se seguem têm como principal referência as definições abrangidas na norma ISO 15686-1 (2000).

Vida útil de referência (*Reference Service Life*) é a vida útil padrão que serve de base para a estimativa da vida útil de um edifício ou de parte de um edifício (inseridos num contexto determinado).

Vida útil estimada (*Estimated Service Life*) é o resultado da multiplicação da vida útil de referência por factores relativos a um contexto específico, como por exemplo, as características do projecto, as condições ambientais, o uso, a manutenção prevista, etc.

Vida útil prevista (*Predicted Service Life*) é o resultado da previsão da vida útil através do tratamento de dados de desempenho ao longo do tempo provenientes, por exemplo, de modelos do processo de degradação ou de ensaios de envelhecimento.

Vida útil prognosticada (*Forecast Service Life*) é a duração da vida útil considerada no projecto com base na vida útil estimada ou na vida útil prevista.

Planeamento da vida útil (*Service Life Planning*) é a elaboração do programa seguido do projecto do edifício e dos seus constituintes de forma a cumprir a vida do projecto requerida, a reduzir os custos da propriedade e a facilitar a manutenção e reparação.

Vida útil residual é o período de tempo restante entre o momento da análise e o final da vida útil prognosticada.

Ensaio de envelhecimento é a combinação entre uma exposição ao envelhecimento e uma avaliação do desempenho, usada para estudar as alterações nas propriedades críticas, com o propósito de prever a vida útil.

Agente de degradação é tudo o que actue sobre um edifício ou parte dele, afectando negativamente o seu desempenho.

Mecanismo de degradação é uma forma de alteração química, física ou mecânica que produz efeitos negativos em propriedades críticas dos produtos de construção.

Degradação é a alteração ao longo do tempo da composição, microestrutura e propriedades de um produto (material ou componente) que resulta numa redução do seu desempenho.

Colapso, Falência é a perda de aptidão de um edifício ou de parte de um edifício para cumprir a função que lhe é exigida.

Avaliação do desempenho é a avaliação das propriedades críticas com base em medições ou inspecções.

Desempenho em serviço é a aptidão de um edifício ou de uma parte de um edifício para cumprir a função que lhe é exigida nas condições de serviço.

Desempenho exigido ou critério de desempenho é o nível quantitativo ou qualitativo de desempenho exigido para uma determinada propriedade crítica.

Desempenho ao longo do tempo é a descrição da variação de uma propriedade crítica ao longo do tempo, sob influência dos agentes de degradação.

Propriedade é uma característica, inerente ou adquirida, de um determinado item (edifício, produto de construção, material, componente).

Propriedade crítica é uma propriedade que terá, necessariamente, de ser mantida acima de um determinado nível para que o edifício, ou uma das suas partes, mantenham a aptidão para desempenhar as funções para que foram concebidos.

Estado do edifício é o nível das propriedades críticas do edifício ou de uma parte do edifício que caracterizam a sua aptidão para desempenhar as suas funções.

Defeito, deficiência, anomalia é uma falha ou desvio do estado pretendido para o edifício ou partes deste.

Edifício é uma construção que fornece abrigo a pessoas e bens, sendo, normalmente, esse o seu principal propósito. É, geralmente, fechado e concebido para permanecer sempre no mesmo local.

Produto de construção é um item manufacturado ou processado para incorporação ou aplicação em trabalhos de construção.

Componente (de edifício) é um produto manufacturado como uma unidade distinta para desempenhar uma determinada função.

Material de construção é uma substância que pode ser utilizada para fabricar produtos ou para ser incorporada directamente em trabalhos de construção.

Reparação é a reposição num estado aceitável de um edifício ou parte de um edifício, através da renovação, substituição ou reparação de partes usadas, degradadas ou danificadas.

Manutenção é a combinação das acções de carácter técnico e administrativo, durante a vida útil do edifício, que visam mantê-lo num estado adequado ao desempenho das suas funções.

Reabilitação é a modificação ou melhoria de um edifício existente com o objectivo de lhe devolver ou atribuir um estado aceitável.

Projectista é a pessoa ou organização que define a forma e as especificações do edifício ou de parte do edifício.

Fabricante é a pessoa ou empresa que fabrica os produtos de construção.

Fornecedor é a pessoa ou empresa que fornece os produtos para a construção.

Utilizador é a pessoa ou organização para a qual o edifício é projectado (inclui o proprietário, o gestor e os ocupantes).

Custo do ciclo de vida (Life Cycle Cost) é o custo total de um edifício ou de uma parte de um edifício considerando a sua vida útil, incluindo os custos de planeamento, projecto, aquisição, exploração, manutenção e transmissão, menos o seu valor residual.

Este conjunto de definições mostra a complexidade do tema em questão e nele transparece a importância do conhecimento adequado das suas definições, por vezes complexas e um pouco ambíguas, de modo a conhecer bem as características dos produtos, componentes e materiais de construção, permitindo assim, uma avaliação correcta da sua vida útil.

2.3. NECESSIDADE DE PROJECTO DE VIDA ÚTIL

Hovde e Moser (2004) referem que a necessidade de previsão de vida útil das construções em fase de projecto é uma preocupação já de algum tempo. Em 1996 foi sugerida uma padronização do projecto de vida útil e um ano depois foi declarada a necessidade de um relatório do estado da arte para o projecto de vida útil.

O objectivo do projecto para a durabilidade é o de garantir, dentro do possível, que a vida útil estimada de um novo edifício, num determinado sítio, sujeito a manutenção planeada, iguale ou exceda a sua vida de projecto. Como a duração da vida útil de um edifício não pode ser conhecida com rigor, antecipadamente, o objectivo consiste em fazer um prognóstico fiável, usando os dados disponíveis.

A estimativa da vida útil em fase de projecto permitirá a consideração de factores específicos ligados ao local de implantação e às condições específicas daquela construção. Essa estimativa ajudará a estabelecer planos de manutenção, facilitará a escolha das condições técnicas óptimas e evitará desperdícios (Corvacho (2000), ISO 15686-1 (2000)).

Como tal, a norma ISO 15686-1 (2000) apresenta um esquema representativo do planeamento da vida útil integrado como critério de projecto, exemplificado na figura 2.2.

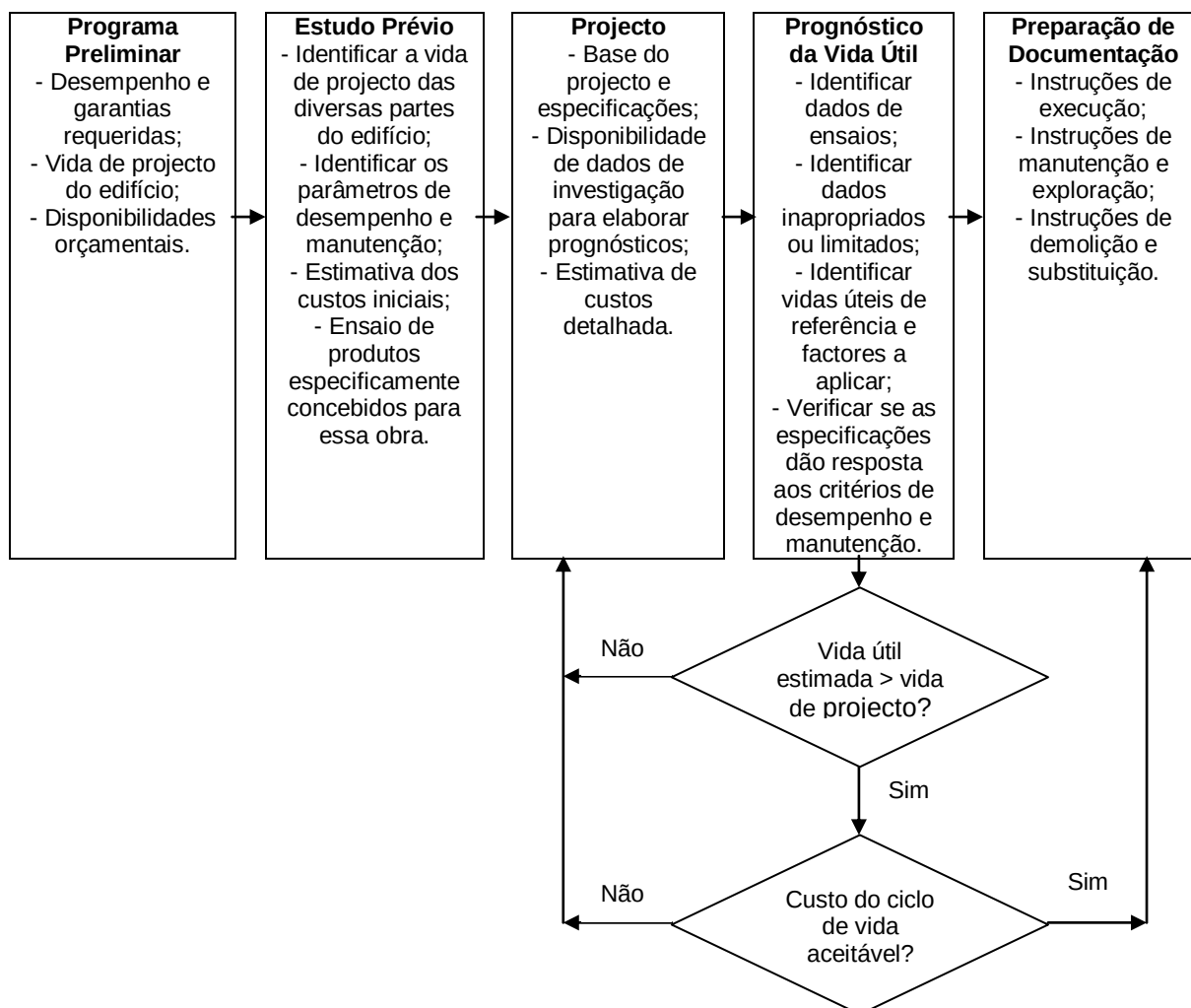


Figura 2.2 – Integração do planeamento da vida útil na actividade de projecto (adaptado da ISO 15686-1 (2000))

De acordo com um estudo feito, 42% das causas de anomalias em edifícios nos países europeus são referentes ao projecto e estas anomalias, segundo pesquisas efectuadas em Inglaterra, têm graves efeitos na durabilidade e estabilidade das estruturas (Rodrigues (2009)).

Aikivuori (1999) também refere que foi realizada uma pesquisa empírica para descobrir os verdadeiros motivos para a realização de projectos de reparação de edifícios e verificou-se que apenas 17% desses projectos foram iniciados devido à deterioração. Existe muito pouca racionalidade técnica ou económica nas decisões de reabilitação. Na maioria dos casos, o factor limitativo da vida útil não é a durabilidade.

Se a vida útil é vista como o tempo em serviço dos componentes de construção, os modelos de previsão de vida útil não devem ser baseados apenas na durabilidade e economia dos elementos de construção. A durabilidade é, claro, o factor limitativo da vida útil, no sentido em que a vida útil não pode exceder os limites estabelecidos pela durabilidade, mas na verdade o tempo de vida útil raramente atinge o potencial do tempo de vida dos componentes limitado pela durabilidade. A previsão da necessidade de reabilitação não deve, portanto, depender apenas dos conceitos baseados na durabilidade. A gestão de recursos e manutenção devem prestar mais atenção e ter uma percepção mais crítica da qualidade detectada nos edifícios.

Porém, esta não é a única razão para a necessidade de iniciação de projectos de reabilitação antes do fim de vida útil. A introdução de novas técnicas construtivas, novos elementos e utilização de diversos produtos combinados nas construções, aliados ao desconhecimento do seu desempenho e das interações entre os mesmos, também têm gerado graves problemas de redução de durabilidade.

É possível aumentar a durabilidade, seleccionando materiais resistentes adequados ao ambiente em questão e/ou detalhando o projecto de forma a proteger os materiais dos agentes de degradação. Como tal, é importante avaliar a vida útil das construções e seus elementos já na fase de projecto.

O principal obstáculo para a integração da exigência da durabilidade na fase de projecto tem sido a inexistência de informação tratada e acessível. De um modo geral, a informação existente encontra-se bastante dispersa e não sistematizada, o que impede a sua utilização, como ferramenta eficaz, ao longo da fase de projecto.

Como tal é urgente a elaboração apropriada de documentos que regulamentem um projecto de vida útil adequado, com informação devidamente tratada e sistematizada para fácil utilização e percepção por parte dos projectistas.

2.4. ESTUDOS E TRABALHOS REALIZADOS

O trabalho de desenvolvimento sobre os métodos de previsão de vida útil é vital para alcançar a base necessária para o avanço necessário das normas.

Vários autores referem, em relatórios sobre o assunto, os trabalhos mais importantes desenvolvidos até ao momento nesta área, tais como Hovde e Moser (2004), Lacasse e Sjöström (2004 e 2005), Daniotti e Lupica Spagnolo (2007), Hans *et al* (2008), Balaras *et al* (2005), Masters (1986), Lee *et al* (2008).

Dado o nível de interesse nacional e internacional sobre a durabilidade dos produtos, as actividades de normalização relacionadas com a vida útil e durabilidade são, portanto, uma preocupação em curso. Neste sentido, tem-se vindo a assistir à realização de inúmeros encontros e congressos com o objectivo de debater os principais aspectos inerentes ao tema. Algumas dessas actividades são listadas em seguida.

Em 1989 é publicado pela *International Union Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM) uma recomendação para a previsão da vida útil dos materiais e componentes de edifícios.

Em 1992 foi realizada no Rio de Janeiro uma importante conferência, *United Nations Conference on Environment and Development* - UNCED, onde se definiu a necessidade de alcançar uma maior sustentabilidade das construções.

Em consequência deste congresso, com o objectivo de alcançar um desenvolvimento sustentável da construção, é apresentada, em 1999, a “*Agenda 21*” desenvolvida pelo *International Council for Research and Innovation in Building and Construction* (CIB).

Foram criadas, dentro do CIB, algumas comissões onde se tem desenvolvido e investigado as seguintes áreas: “Performance concept in building” (W60), “Management maintenance and modernization of buildings facilities” (W70), “Prediction of service life of building materials and components” (W080), “Design for durability” (W094) e “Building Pathology” (W086). Nestas destacam-se as acções do grupo de trabalho CIB-W080 como as mais importantes para o presente trabalho, juntando-se mais tarde ao Comité Técnico TC59 do RILEM, formando o CIB W080/RILEM 175-SLM, que desenvolve estudos no âmbito das metodologias de previsão de vida útil.

Em 1998, a ISO TC 59 SC14 (Planeamento da vida útil) foi criada na sequência de elaboração das várias partes da norma ISO 15686 *Buildings and Constructed Assets – Service Life Planning*, publicadas a partir do ano 2000.

A Organização Europeia para a aprovação técnica (EOTA), estabelecida sob as disposições do Conselho da UE da Directiva 89/106/CEE (Directiva dos Produtos de Construção), publicou um documento que descreve a forma de avaliar a vida útil de produtos relacionados com a durabilidade. Este documento é baseado em documentos publicados pelo RILEM e pela ISO.

Em 1992, um importante passo é dado no Japão, com a introdução de um regulamento que serve de guia à previsão da vida útil das construções e seus elementos, o *Principal Guide for Service Life Planning of Buildings*, surgindo em 1993 a sua tradução inglesa.

Foi um dos primeiros documentos com a preocupação de regular e demonstrar os conceitos fundamentais da durabilidade, em cada fase do ciclo de vida das construções e numa abordagem do desempenho global dos edifícios. Este guia funcionou como ponto de partida para muitas das normas que abordam este tema.

Em muitos países tem existido uma preocupação crescente, no sentido de estabelecer regulamentos e normas, com o intuito de prever a durabilidade e vida útil durante o planeamento, projecto, construção e fases de utilização do edifício.

Na Nova Zelândia foi publicado, em 1992, o *New Zealand Building Code* (NZBC), que contém os requisitos quantitativos para a vida útil de várias partes de edifícios ou de produtos de construção.

No Reino Unido, no mesmo ano, surge a norma *Guide to Durability of Buildings and Buildings Elements, Products and Components* (BS 7543) e no Canadá, em 1995, a norma *Guideline on Durability in buildings* (S478-9514).

A mesma preocupação tem sido manifestada em congressos e conferências internacionais nomeadamente no ciclo de congressos *Durability of Buildings Materials and Components* (DBMC) levados a cabo pelo CIB, RILEM, ASTM *International Standards*, entre outros.

Foi iniciada, em 2001, uma rede temática europeia PeBBu (*Performance Based Building*). O domínio específico dentro da PeBBu em materiais de construção e componentes aborda questões relacionadas com a implementação e adopção de um padrão no planeamento da vida útil, baseado no desempenho, desenvolvido de acordo com a ISO 15686.

Em 2003 foi elaborado, em Itália, um núcleo de investigação, composto por seis universidades, sobre “Metodologias de planeamento e avaliação de durabilidade de componentes de edifícios para o processo de produção sustentável”.

Têm-se desenvolvido várias metodologias e programas de apoio à previsão da vida útil entre as quais: o projecto MEDIC (*Prediction Method of probable Deterioration Scenarios and Refurbishment Investment Budgets*), o projecto PROBE (*Post-occupancy Review Of Buildings and their Engineering*), o projecto INVESTIMMO, entre outros.

Tem-se ainda assistido à criação de inúmeros programas de recolha de dados para a previsão da vida útil, tais como a plataforma de base de dados incluída no projecto INVESTIMMO - *French national service life information platform*, *The Construction Durability Database* criada para a *UK Corporation Housing - Building LifePlans*, a *Buildingslife.com* em desenvolvimento em Portugal, entre outros.

Todos estes esforços têm sido muito importantes, contribuindo para uma grande melhoria na previsão de vida útil das construções. Todavia, ainda é necessário um maior aprofundamento destes estudos, de modo a obter resultados mais objectivos e facilmente aplicáveis.

3

NORMAS, REGULAMENTOS E RECOMENDAÇÕES

3.1. INTRODUÇÃO

O cuidado com a sustentabilidade na construção e com a problemática da durabilidade das construções cresceu muito nos últimos tempos. Como tal tem-se verificado um grande progresso dos desenvolvimentos e estudos realizados nesta área, com o aparecimento de várias metodologias de previsão de vida útil, sendo necessária uma normalização que defina claramente os procedimentos a seguir durante todas as fases intervenientes: planeamento, projecto, construção e fases de utilização do edifício, com o intuito de regular correctamente a previsão da vida útil e durabilidade dos edifícios e seus componentes.

Segundo Lacasse e Sjöström (2005) “o desenvolvimento de normas de vida do produto e padronização do projecto e planeamento de vida útil dos edifícios e instalações construídas são elementos-chave para alcançar uma construção sustentável”.

Vários países estabeleceram regulamentos e normas que tentam ir de encontro à descrição dos procedimentos para previsão da vida útil das construções, de forma a alcançarem uma maior durabilidade na construção.

Em seguida descrevem-se mais detalhadamente algumas das normas e guias mais importantes desenvolvidos até à data.

3.2. *PRINCIPAL GUIDE FOR SERVICE LIFE PLANNING OF BUILDINGS – JAPÃO*

No Japão, a previsão da vida útil tem sido um tema abordado há varias décadas, culminando na elaboração de um guia com o intuito de regular e demonstrar os conceitos fundamentais da durabilidade, em cada fase do ciclo de vida das construções e numa abordagem do desempenho global dos edifícios. Este documento normativo, elaborado pela Ordem dos Arquitectos Japoneses em 1992, tem o intuito de adaptar o projecto, construção e manutenção dos edifícios aos objectivos planeados para os mesmos em termos de durabilidade.

Já Rudbeck (2002), citado por Silva (2009), afirma que o Regulamento Japonês estabelece um guia para a previsão da vida útil de um edifício, como um todo, das partes do edifício ou dos seus elementos, dos seus componentes ou equipamentos, admitindo que o fim da vida útil é determinado pela deterioração física ou obsolescência.

Este documento serviu de ponto de partida para muitas das normas existentes actualmente.

3.3. NEW ZEALAND BUILDING CODE (NZBC)

Em 1992, um novo código de construção foi publicado na Nova Zelândia e contém os requisitos quantitativos para a vida útil das várias partes de edifícios ou produtos de construção.

O *New Zealand Building Code* (NZBC) é essencialmente baseado no desempenho. No entanto, apenas para algumas classes de materiais, como madeira e betão, existem soluções prescritivas consideradas satisfatórias. Para outras situações, o código refere apenas que o desempenho da durabilidade pode ser demonstrado através de ensaios de laboratório, um caso documentado de uso, ou por analogia com o comportamento de elementos de construção semelhantes. Poucas mais orientações são prestadas sobre a forma como estes critérios podem ser satisfeitos na prática.

Assegurar que os edifícios têm uma durabilidade sempre foi um aspecto importante da regulamentação da construção. Isto é enfatizado pelo actual NZBC, que inclui o requisito funcional de que: "Os materiais de construção, componentes e métodos de construção devem ser suficientemente duráveis para garantir que o edifício, sem grandes obras de renovação ou reconstrução, satisfaça os outros requisitos funcionais deste código ao longo da vida do edifício".

O NZBC é baseado no desempenho, destinado a permitir soluções inovadoras e a minimizar as restrições impostas no projecto de construção ou na escolha de materiais e técnicas, garantindo que os níveis mínimos de desempenho sejam alcançados. A cláusula B2 *Durability* do código é a única excepção a esta filosofia, estabelecendo vidas padrão para elementos de construção em função da sua criticidade da função e facilidade de substituição (tabela 3.1), esta cláusula contém requisitos específicos, a nível qualitativo e quantitativo. Estas disposições de durabilidade aplicam-se a qualquer parte do edifício que cumpra outra exigência do código (por exemplo, a estabilidade estrutural ou desempenho perante o fogo), mas não se estendem a considerações estéticas.

Tabela 3.1 - Resumo dos requisitos de desempenho para elementos de construção especificados pela cláusula B2 *Durability* do NZBC (adaptado de Lee *et al* (2008))

Natureza do elemento de construção	Vida útil exigida	Exemplos típicos
(i) Fornece estabilidade estrutural	50 anos	Paredes estruturais
(ii) Difícil de substituir		Cabos eléctricos enterrados
(iii) Falha indetectável em regime de manutenção normal		Material oculto no interior de uma parede
(i) Moderadamente difícil de substituir	15 anos	Fachada ventilada
(ii) Falha indetectável durante a ocupação diária do edifício		Vedantes
(i) Facilmente substituídos	5 anos	Revestimentos arquitectónicos
(ii) Falhas aparentes		Calhas externas

Note-se que, apesar desta prescrição, para a escolha dos materiais para a produção de elementos de construção, a durabilidade exigida não fica regulamentada.

A Nova Zelândia tem uma norma obrigatória para a durabilidade desde 1992. Em teoria, isso deveria ter estimulado a consciência da indústria para as questões necessárias para alcançar a vida útil

adequada dos materiais de construção e promover uma participação activa no desenvolvimento de normas e metodologias que possam facilitar um bom projecto de durabilidade.

Na prática, a transição desta norma para soluções baseadas no desempenho tem ainda algumas dificuldades e ainda não foram completamente utilizados os potenciais benefícios inovadores e económicos. A Nova Zelândia é um país pequeno e existem poucas organizações independentes com os recursos técnicos e amplitude de conhecimentos necessários para realizar avaliações rigorosas da durabilidade dos materiais. Isto é particularmente evidente quando é introduzido no mercado um novo sistema de construção (Lee *et al* (2008)).

3.4. BS 7543 GUIDE TO DURABILITY OF BUILDINGS AND BUILDING ELEMENTS, PRODUCTS AND COMPONENTS

Esta norma britânica foi publicada em 1992 e fornece orientações sobre a durabilidade, vida útil requerida e prevista e vida de projecto de edifícios e seus componentes e/ou partes. Aplica-se principalmente para os novos edifícios e seus componentes e/ou partes, em vez de alterações e reparações. Também dá orientações sobre a comunicação de informações sobre a vida útil e vida de projecto de edifícios e seus componentes e/ou partes entre as entidades envolvidas num projecto de construção, ou seja, clientes, projectistas, construtores, empreiteiros e especialistas. Pretende também evitar expectativas não realistas da vida útil dos edifícios e partes de edifícios.

Aplica-se a todos os projectos de engenharia civil que envolvem edifícios, mas apenas parcialmente a outros projectos de engenharia civil, tais como estradas, pontes e barragens.

Segundo esta norma, a previsão da vida útil pode ser realizada das seguintes formas:

- Através da experiência adquirida, com construções iguais ou semelhantes, sujeitas a ocupação ou condições climáticas similares;
- Através da avaliação do nível de degradação dos elementos num curto período de utilização ou exposição, estimando o valor para o qual o limite da durabilidade é atingido;
- Através de ensaios de envelhecimento acelerado - método complexo e muito discutível, devido à necessidade de simular situações reais, que têm inúmeras variáveis associadas.

Esta norma não trata de muitos aspectos de obsolescência, ou seja, quando os edifícios ou partes de edifícios devem ser substituídos ou alterados, quer para atender às diferentes necessidades e mudanças nas condições, incluindo as alterações de uso e os requisitos obrigatórios, quer quando os novos produtos oferecem melhor desempenho sem um aumento correspondente de custo.

Nesta norma podem ser encontrados três anexos importantes, cujo conteúdo de cada um é descrito em seguida.

Anexo A - apresenta informações sobre a previsão de durabilidade de edifícios e partes de edifícios e fornece dados básicos sobre a acção dos principais agentes que afectam a durabilidade dos materiais de construção. Sempre que possível são mostrados exemplos para ilustrar os dados e, em alguns casos, há uma explicação sobre o processo ocorrido. Em muitos casos, a deterioração não é o resultado da acção de um único agente, mas o efeito de uma combinação de agentes. Por conseguinte, é importante considerar cada tipo de agente e em que medida os seus efeitos combinados são susceptíveis de afectar uma forma particular de construção.

Anexo B - descreve alguns exemplos comuns de falhas de construção que têm ocorrido nos últimos trinta anos em que as expectativas de durabilidade não foram cumpridas. Porém, esses exemplos não devem ser considerados como os mais comuns ou os casos mais graves de deterioração precoce

ocorrida, embora incluam elementos que levaram à necessidade de reparo extensivo e, em alguns casos, à demolição. Os exemplos não se aplicam necessariamente à prática corrente.

Anexo C - é uma bibliografia anotada dando uma leitura mais adicional sobre os tópicos abordados neste guia.

3.5. CSA S478-95 GUIDELINE ON DURABILITY IN BUILDINGS

Esta orientação é o primeiro documento abrangente, publicado no Canadá, relativo à durabilidade em edifícios.

Este regulamento, publicado em 1995, considera os agentes e os mecanismos relacionados com a durabilidade e oferece conselhos para a integração dos requisitos de durabilidade no projecto, operação, manutenção e provisões para os edifícios e seus componentes.

Inclui definições dos conceitos relacionados com a durabilidade na construção e fornece orientações para os projectistas, construtores, proprietários e operadores para alcançarem a durabilidade no planeamento do projecto, construção, manutenção, reparação e renovação dos edifícios.

São descritos três métodos para previsão da vida útil:

1. Eficácia demonstrada ou desempenho histórico (*Demonstrated effectiveness*);
2. Modelação de montagem (*Modeling of assembly*);
3. Ensaios de montagem (*Testing of assembly*).

São ainda destacadas algumas questões que um projectista deve considerar no planeamento da vida útil, incluindo:

- Projecto convencional ou inovador;
- Selecção de materiais;
- Detalhes;
- Facilidade de construção;
- Operação e manutenção;
- Obsolescência funcional;
- Custo do ciclo de vida.

O pressuposto básico deste guia é que a vida útil deve igualar ou exceder a vida útil prevista ou de projecto. Para auxiliar o processo de tomada de decisões que podem levar a esse resultado, o guia oferece uma série de tabelas recomendadas como um meio de registo e explicação dos objectivos e pressupostos relacionados com a vida útil para a construção e componentes. As tabelas tratam do seguinte:

- Dados de projecto de construção;
- Opções preliminares de projecto e manutenção;
- Resumo detalhado do projecto e manutenção.

Finalmente, o guia recomenda o custo do ciclo de vida, como parte do quadro de decisão.

Não é considerada a durabilidade dos sistemas mecânicos e eléctricos e serviços em edifícios. No entanto, é reconhecido que a vida útil destes sistemas e serviços deve ser incluída num projecto integrado. As cargas dos componentes e edifícios resultantes do funcionamento dos sistemas e serviços devem ser consideradas juntamente com as cargas ambientais e estruturais.

São ainda apontadas as seguintes críticas de modo a melhorar todo este processo de avaliação de vida útil: a obtenção de durabilidade exige que a expectativa de vida seja considerada nos procedimentos de projecto de edifícios e seus componentes; as decisões tomadas durante a vida de um edifício, e mesmo antes da elaboração de documentos de projecto, afectam todas as decisões subsequentes e o desempenho resultante; começando com o conceito inicial de um edifício, o processo de projecto deve ter em conta as acções ambientais e os agentes nocivos a que os elementos de construção serão expostos (Athena Institute (2006)).

3.6. ISO 15686 BUILDINGS AND CONSTRUCTED ASSETS – SERVICE LIFE PLANNING

O conjunto de normas ISO 15686 (*Building and construction assets - service life planning*) surgiu como um apoio normativo para dar suporte nos assuntos respeitantes ao planeamento da vida útil. Este constitui uma das fontes mais respeitadas e consultadas por parte dos intervenientes da construção, responsáveis pela sua durabilidade e é alvo de alusão em inúmeros documentos sobre vida útil, como por exemplo em Daniotti e Lupica Spagnolo (2008a e 2008b) e em Lacasse e Sjöström (2004).

O planeamento da vida útil necessita de informação proveniente de várias fontes. A figura 3.1, adaptada da norma ISO 15686-1 (2000), sintetiza bem essa ideia.

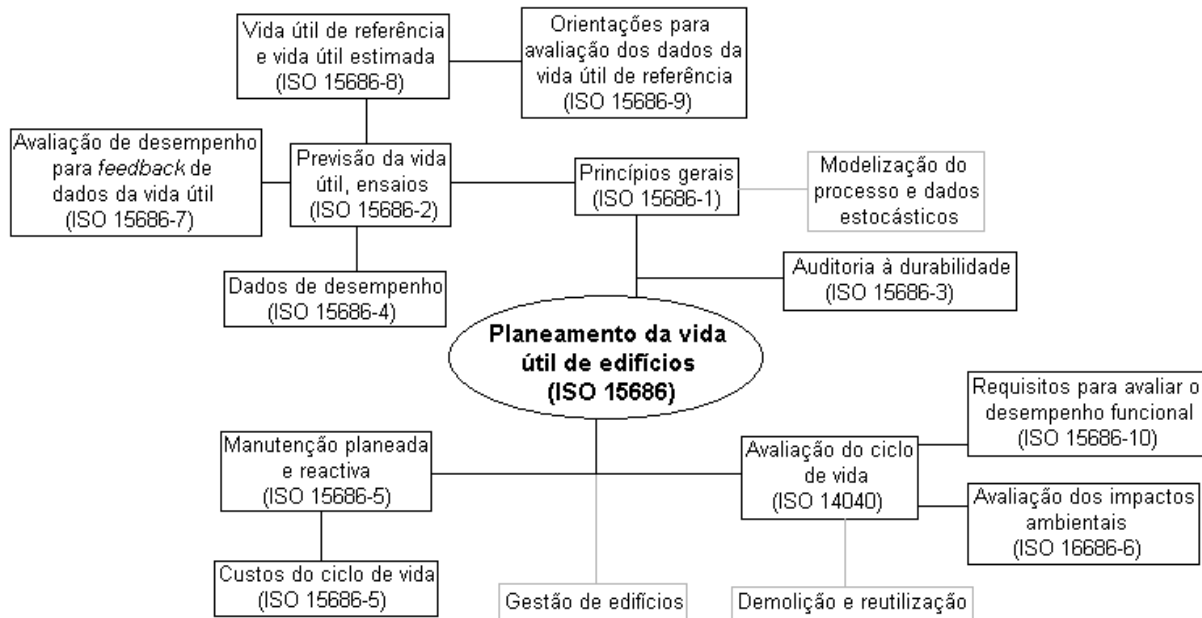


Figura 3.1 – Informação necessária para o planeamento da vida útil de edifícios (adaptado da ISO 15686-1 (2000))

A maior motivação para a produção da ISO 15686 foi a necessidade de prever e controlar os “custos da propriedade” (encargos que o proprietário terá ao longo da vida útil do edifício, incluindo o investimento na sua aquisição e os custos de manutenção, reparação e exploração que se farão sentir ao longo do tempo).

Esta norma está dividida em várias partes, algumas ainda sem publicação definitiva, sendo de destacar as partes 1, 2 e 8 para a temática da previsão da vida útil, que é o objecto de estudo desta dissertação. Como tal, será feita uma abordagem mais aprofundada às partes consideradas mais relevantes para este caso, aquando da descrição do Método Factorial descrito no capítulo seguinte.

Vejamos, agora, uma breve descrição do conteúdo de cada uma das partes constituintes da ISO 15686:

- ISO 15686-1:2000 (*General principles*) - aponta os princípios e procedimentos que se aplicam ao projecto, no planeamento da vida útil dos edifícios e bens construídos. Apresenta ainda um método (Método Factorial) para estimar a vida útil de construções e seus elementos;
- ISO 15686-2:2001 (*Service life prediction procedures*) - descreve um procedimento que facilita a previsão de vida útil dos componentes do edifício. São apresentados um quadro geral, princípios e requisitos para conduzir e descrever tais estudos. De ressaltar que a norma não descreve detalhadamente as técnicas de previsão de vida útil de componentes de construção;
- ISO 15686-3:2002 (*Performance audits and reviews*) - refere a abordagem e os procedimentos a serem aplicados à instrução prévia, instrução de projecto, construção e, quando requerido, o cuidado de gestão e disponibilidade dos edifícios e bens construídos para garantir que as medidas, necessárias para alcançar um desempenho satisfatório ao longo do tempo, sejam implementadas;
- ISO 15686-4 (*Data requirements*) - especifica os requisitos dos dados necessários para estimar a vida útil de uma estrutura, sistema de construção ou edifício, considerando as diferentes condições ambientais e de uso;
- ISO 15686-5:2008 (*Life cycle costing*) - desenvolve modelos de custo, de gestão e manutenção das construções, tendo em vista o custo global, de modo a permitir uma avaliação comparativa do desempenho de custos de edifícios e património construído ao longo de um determinado período de tempo;
- ISO 15686-6:2004 (*Procedure for considering environmental impacts*) – descreve o modo de avaliação, na fase de projecto, dos potenciais impactos ambientais. Identifica a relação entre a avaliação ambiental do ciclo de vida e o planeamento de vida útil;
- ISO 15686-7:2006 (*Performance evaluation for feedback of service life data from practice*) – fornece uma base genérica para avaliação de desempenho para *feedback* de dados da vida útil dos edifícios existentes e bens construídos, incluindo a definição dos termos a serem usados e a exposição de como o desempenho (técnico) pode ser descrito e documentado para garantir consistência;
- ISO 15686-8:2008 (*Reference service life and service life estimation*) – transmite orientações sobre o fornecimento, selecção e formatação de dados da vida útil de referência e sobre a aplicação desses dados no cálculo de vida útil estimada usando o Método Factorial. A orientação para a vida útil de referência (VUR) está estruturada em discussões sobre: fornecimento de dados de VUR, utilizando dados existentes; selecção de dados de VUR ou dados gerais; e formatação de dados dentro dos dados registados de VUR. Os fabricantes de edifícios e produtos de construção possuem, geralmente, um conhecimento considerável sobre a vida útil e a durabilidade de seus produtos. No entanto, tal informação é tornada pública apenas ocasionalmente, geralmente nas declarações de produtos, outros documentos, websites de empresas e/ou bases de dados. A utilização desta norma visa motivar os fabricantes a reunir os seus conhecimentos e fornecer dados de vida útil que sigam as orientações e requisitos estabelecidos na própria proposta;
- ISO/TS 15686-9:2008 (*Guidance on assessment of service-life data*) - dá orientações para a avaliação e apresentação dos dados da vida útil de referência. É aplicável aos fabricantes ou produtores que fornecem dados da vida útil de referência, para utilização no planeamento da vida útil de acordo com a norma ISO 15686;
- ISO 15686-10:2010 (*When to assess functional performance*) - estabelece requisitos para verificar o desempenho funcional durante a vida útil dos edifícios e instalações relacionadas

com a construção e para verificar a capacidade de edifícios e instalações para atender aos requisitos identificados.

3.7. REGULAMENTO GERAL DAS EDIFICAÇÕES URBANAS (RGEU)

Segundo o portal do Governo, o RGEU (Regulamento Geral das Edificações Urbanas) em vigor desde 1951, encontra-se completamente desajustado dos padrões actuais de segurança, qualidade, ou mesmo urbanísticos e sofreu, desde aquela data, várias tentativas de actualização que resultaram em alterações pontuais, e traduziram-se num conjunto de normas avulsas que rapidamente se desajustaram da realidade. Este não cobria matérias como durabilidade e manutenção, qualidade da edificação, segurança da intrusão, não estando em conformidade com as normas regulamentares específicas que existem para as edificações, estando desactualizado, também, nas questões tecnológicas.

Deste modo, em 2003 foi elaborada uma proposta de revisão do regulamento existente. O novo texto do Regulamento Geral das Edificações (RGE) resulta não numa actualização do existente, mas num novo regulamento de substituição. Esta proposta para além de considerar o alargamento do âmbito de aplicação quanto aos tipos de edifícios e à definição das intervenções, revela-se como um regulamento estruturante e ajustado à realidade actual, nomeadamente em aspectos que tocam a segurança, o ambiente, a energia, a sustentabilidade, vida útil, manutenção e durabilidade dos edifícios, a defesa do consumidor e a gestão da qualidade.

Este novo regulamento estabelece, relativamente à vida útil e durabilidade das construções, as seguintes considerações:

A vida útil de uma edificação corresponde ao período em que a respectiva estrutura não apresenta degradação dos materiais, em resultado das condições ambientes, que conduzam à redução da segurança estrutural inicial, nomeadamente nas secções críticas dos elementos estruturais principais (Artigo 117º, nº1);

Durante a vida útil de uma edificação, devem realizar-se actividades de inspecção, manutenção e reparação, nomeadamente em relação aos diversos componentes da edificação que tenham durabilidade inferior à vida útil (Artigo 117º, nº2);

A vida útil de cada componente da edificação deve ser definida pelo respectivo fabricante com base em características de deterioração obtidas pela experiência da respectiva utilização (Artigo 117º, nº3).

O que quer dizer que de acordo com a definição considerada no nº1 do artigo 117º, se por exemplo um elemento do edifício colapsar, segundo esta definição, o edifício continua em serviço.

A concepção com durabilidade das novas edificações e das intervenções do nível IV, para a vida útil definida, implica a abordagem, no projecto de execução, dos seguintes aspectos:

- a) Concepção da estrutura para a vida útil da edificação;
- b) Concepção para reduzir os efeitos de degradação pelos agentes agressivos, nomeadamente os atmosféricos;
- c) Adopção de concepções flexíveis que permitam a substituição fácil dos componentes com durabilidade inferior à VUE;
- d) Adopção de dispositivos de acesso que permitam realizar inspecções periódicas dos componentes mais degradáveis, bem como proceder a operações de manutenção e de limpeza necessárias à garantia da respectiva durabilidade. (Artigo 118º, nº1)

No entanto, esta proposta de actualização, não passou mesmo disso, de uma proposta, que não foi

posta em vigor, mantendo-se o RGEU completamente desactualizado e desadaptado à realidade actual. É importante repensar e alterar esta situação.

4

MÉTODOS PARA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL

4.1. INTRODUÇÃO

Como mencionado nos capítulos anteriores, tem havido muita avaliação e discussão de métodos de previsão de vida útil ao longo destes anos, principalmente numa base teórica. Como os vários métodos de previsão de vida útil têm sido publicados e os diferentes utilizadores têm alguma experiência, as exigências têm sido mais específicas.

Nos documentos que descrevem a durabilidade e os métodos de previsão de vida útil, existem também recomendações e explicações dos dados de entrada necessários para a utilização dos métodos e para uma avaliação e utilização segura e fiável dos resultados. Em muitos dos documentos destaca-se que a previsão de durabilidade e vida útil está sujeita a muitas variáveis e, por isso, não pode ser uma ciência exacta. Os resultados devem ser tratados como uma indicação do que será a vida útil, quando se tem em consideração os factores e circunstâncias reais que influenciam a durabilidade e vida útil (Hovde (2002)).

Hovde (2002) referencia uma lista de características essenciais e/ou desejáveis de um sistema de previsão de vida útil:

- Fácil de aprender;
- Fácil de usar;
- Rápido de usar;
- Exacto;
- De fácil actualização;
- Fácil de comunicar;
- Adaptável;
- Suportado por dados;
- Relacionado com métodos de projecto e ferramentas existentes;
- Livre de excesso de burocracia;
- Reconhecer a importância da inovação;
- Relevante para vários ambientes;
- Aceitável para os profissionais e clientes;
- Reflectir os conhecimentos actuais;
- Nível de flexibilidade de sofisticação para qualquer esquema ou planeamento detalhado.

Segundo Hovde e Moser (2004) os principais métodos utilizados para a estimativa da vida útil podem ser distinguidos segundo três abordagens diferentes:

- Métodos determinísticos;
- Métodos probabilísticos;
- Métodos de engenharia.

Neste capítulo, cada um deles será abordado mais detalhadamente.

4.2. MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

4.2.1. ASPECTOS GERAIS

Os métodos determinísticos baseiam-se no estudo dos factores de degradação que afectam os elementos estudados, na compreensão dos seus mecanismos de actuação e, por fim, na sua quantificação traduzida em funções de degradação. Estes factores são depois traduzidos em fórmulas que expressam a sua acção ao longo do tempo, até que o valor mínimo aceitável de desempenho do elemento estudado seja atingido.

Estes métodos são de fácil compreensão, mas são alvo de várias críticas quanto à simplicidade com que abordam fenómenos complexos, como é o caso dos fenómenos de degradação (Silva (2009)).

Na abordagem determinística, são utilizados os valores exactos e não é considerada a avaliação de incerteza ou a variação estatística dos factores (Hovde (1998)).

4.2.2. MÉTODO FACTORIAL

O Método Factorial, incluído na classe dos métodos determinísticos, proposto pela ISO 15686, é aquele que tem maior aceitação na comunidade científica e aplicação prática pela sua elevada operacionalidade. Este método permite estimar a vida útil de um determinado produto da construção, sob determinadas condições específicas.

Hovde (2002) refere que “O Método Factorial é uma maneira de reunir a consideração de cada uma das variáveis que é susceptível de afectar a vida útil. Pode ser usado para fazer uma avaliação sistemática, mesmo quando as condições de referência não coincidem totalmente com as condições previstas de utilização. A sua utilização pode reunir a experiência de projectistas, observações, intenções dos gestores, e garantias dos fabricantes, bem como dados de laboratórios de ensaios. O Método Factorial não fornece uma garantia de uma vida útil: apenas fornece uma estimativa empírica baseada em informações disponíveis.”

Partindo de uma duração da vida útil de referência, esperada em condições padrão, obtém-se uma estimativa da vida útil para as condições particulares pretendidas através da multiplicação da vida útil de referência por uma série de factores relacionados com diversos aspectos determinantes para a durabilidade.

Os factores a considerar são os seguintes:

- Factor A – Qualidade do material ou componente;
- Factor B – Nível de qualidade do projecto;
- Factor C – Nível de qualidade da execução;
- Factor D – Características do ambiente interior;
- Factor E – Características do ambiente exterior;

Factor F – Características do uso;

Factor G – Nível de manutenção.

A fórmula para estimar a vida útil de determinado produto da construção através deste método é então a seguinte:

$$VUE = VUR \times f_A \times f_B \times f_C \times f_D \times f_E \times f_F \times f_G \quad (4.1)$$

Onde:

VUE - vida útil estimada;

VUR - vida útil de referência;

f_A - f_G – factores modificadores.

4.2.2.1. Vida Útil de Referência (VUR)

A previsão da vida útil de um determinado produto de construção diz respeito a um determinado conjunto de condições, que raramente coincidirão, exactamente, com as condições de serviço.

Os dados disponíveis para usar na previsão poderão ser provenientes da observação ou medição do desempenho em ensaios de curta ou longa duração, em laboratório ou em serviço.

A capacidade de determinar a VUR é a questão chave para o desempenho do Método Factorial. Um outro passo importante no Método Factorial é a calibração da influência dos factores sobre a VUE. O factor deve ser representativo da diferença entre a referência no conjunto de condições de uso e a condição do estudo de caso. De acordo com o facto de se poder usar vários VUR para o mesmo produto, não é possível propor uma escala única quantificada para cada factor, de acordo com as condições associadas (Hans e Chevalier (2005)).

Sempre que possível o valor da vida útil de referência deve ser o mais confiável e pormenorizado possível e, portanto, de preferência com base numa rigorosa metodologia de previsão de vida útil, tal como a sugerida na ISO 15686-1 (2000), apresentada na figura 4.1.

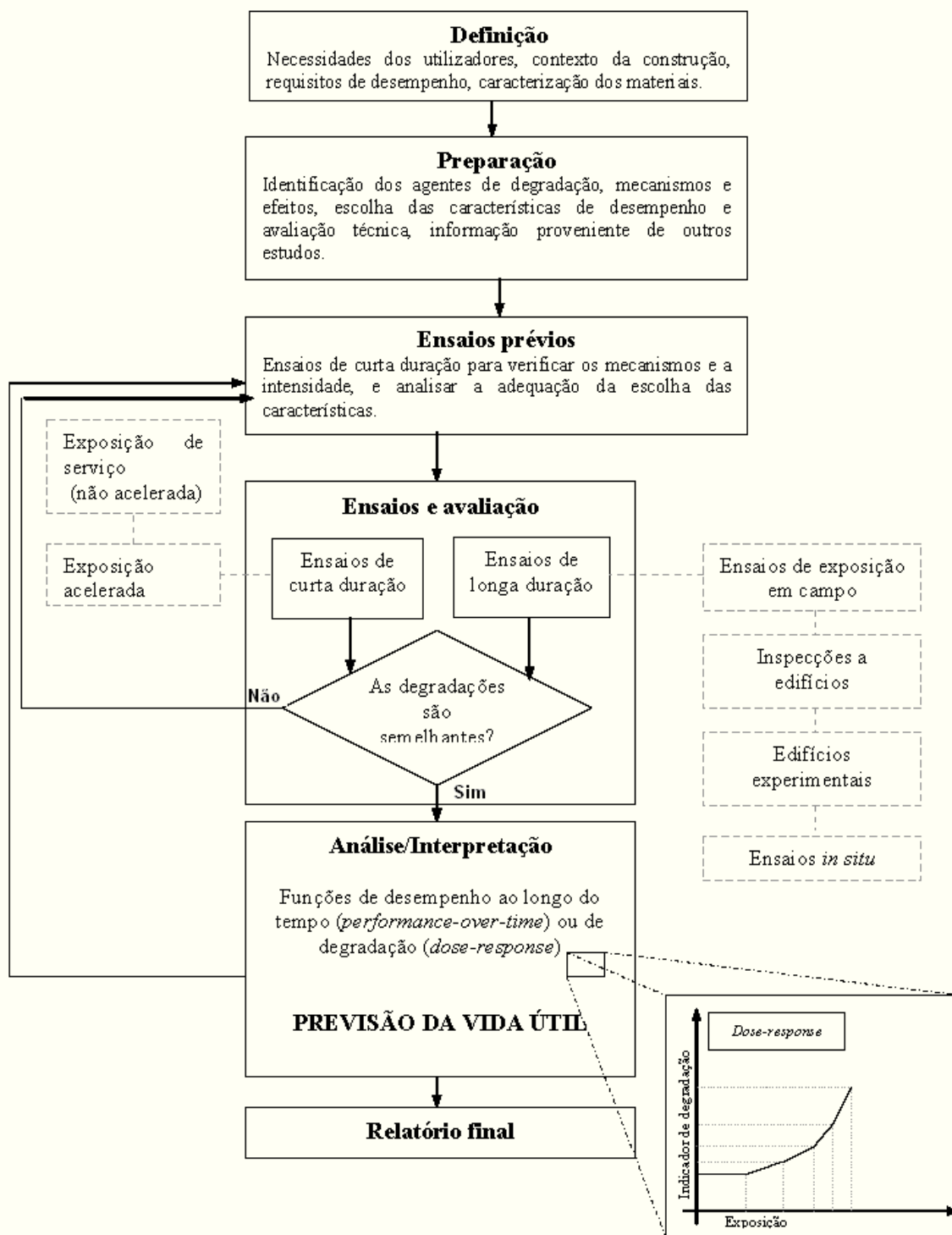


Figura 4.1 - Metodologia para a previsão do tempo de vida útil (adaptado da ISO 15686-2 (2001))

A metodologia proposta pode ser utilizada para um simples estabelecimento de uma função desempenho *versus* tempo (*performance-over-time*), para um local específico, ou pelo estabelecimento de funções de degradação (*dose-response*) válidas para uma gama de condições ambientais.

A previsão de vida útil de acordo com esta metodologia baseia-se num processo iterativo, com tomadas de decisão durante as etapas intermediárias, permitindo melhorar as previsões, em função do conhecimento disponível. As etapas estabelecidas no fluxograma são descritas resumidamente a seguir.

Definição do problema: em primeiro lugar, deve-se analisar o problema, identificar os factores relevantes e obter informação e conhecimento necessários. Para tal, convém especificar o desempenho funcional esperado do elemento em estudo, caracterizar o contexto em que vai estar inserido o mais detalhadamente possível, identificar os níveis de desempenho requeridos para a situação em estudo, estabelecer critérios de avaliação do desempenho e caracterizar o material ou componente nas suas propriedades físicas e químicas.

Preparação: depois da definição do problema deve-se compreender como vai ocorrer a degradação nas condições particulares identificadas. Deste modo, há que quantificar os agentes de degradação, identificar os mecanismos de degradação que esses agentes podem induzir, identificar os efeitos de degradação mensuráveis e seleccionar os métodos através dos quais se pode verificar o cumprimento dos critérios de desempenho. A tabela seguinte apresenta os agentes de degradação mais comuns.

Tabela 4.1 – Agentes de degradação (adaptado da ISO 15686-1 (2000))

Natureza	Classe
Mecânica	Gravitacionais
	Forças aplicadas e deformações impostas ou restringidas
	Energia cinética
	Vibrações e ruídos
Electromagnética	Radiação
	Electricidade
	Magnetismo
Térmica	Níveis extremos ou variações acentuadas de temperatura
Química	Água e solventes
	Agentes oxidantes
	Agentes redutores
	Ácidos
	Bases
	Sais
	Substâncias quimicamente neutras
Biológica	Plantas e micróbios
	Animais

Realização de ensaios prévios: esta fase serve para testar a justeza do plano de ensaios estabelecido e para proceder a ajustes eventualmente necessários. Fazendo actuar os agentes de degradação identificados poderá fazer-se uma primeira avaliação dos seus efeitos.

Ensaio: os ensaios para prever a vida útil de um determinado produto de construção podem ser de curta duração, por exposição aos agentes de degradação com duração consideravelmente menor que a vida útil esperada, e de longa duração, por exposição a condições de uso por período de tempo da mesma ordem de grandeza da vida útil. As exposições de curta duração podem ser aceleradas, com o objectivo de reproduzir, de forma relativamente rápida, as mudanças que ocorrem nas condições de uso do componente ou também podem ser feitas nas condições de uso do componente (sem acelerar o processo de envelhecimento), aplicando-se aos casos em que as mudanças nas propriedades podem ser determinadas em curto espaço de tempo.

Interpretação: a partir de avaliações de desempenho efectuadas ao longo dos vários programas de exposição, é determinada a vida útil prevista, envolvendo duas ou três etapas:

- a) A partir de dados de avaliação de desempenho são estabelecidas as funções desempenho *versus* tempo ou de degradação, nas condições de exposição;
- b) Se as condições de exposição não abrangerem as condições em que o componente vai ser avaliado, deve ser determinada a função desempenho *versus* tempo ou dose-resposta na condição desejada, sintetizando, modelando e/ou interpolando ou extrapolando as funções estabelecidas em a);
- c) A função desempenho *versus* tempo ou de degradação, obtida nas etapas a) ou b) é utilizada para determinar a vida útil prevista para o componente.

A fiabilidade do valor a calcular pelo Método Factorial, depende da adequação do valor da vida útil de referência. Como tal, este deverá aplicar-se a condições ambientais próximas ou comparáveis com as específicas da situação a estimar. Deste modo, os valores dos factores a adoptar na estimativa serão o mais próximo possível da unidade, minimizando os erros introduzidos pelo método.

Não sendo possível determinar o valor da vida útil de referência através da metodologia descrita, o valor a considerar para a vida útil de referência pode ser baseado em:

- Dados fornecidos pelo fabricante ou resultados de um laboratório de ensaios (para um produto novo, normalmente, apenas se tem acesso a dados do fabricante);
- Dados de experiências anteriores ou observações de construções similares ou que se encontram em condições similares;
- Informação contida em Documentos de Homologação ou outra documentação desse tipo;
- Informação recolhida em bibliografia relacionada com o tema da durabilidade.

Quando se utilizam dados de fabricantes ou fornecedores deverá tentar-se conhecer as condições relativas às suas previsões e quais os métodos utilizados, para que não se duplique a quantificação do efeito de determinadas variáveis. (Corvacho (2000), ISO 15686-1 (2000))

Segundo Nicoletta e De Pascale (2005), o Método Factorial propõe muitas soluções e muitas formas de determinação do VUR, que mostram diferente importância e fiabilidade e não são homogêneas. O projectista pode definir o valor de referência, que é o elemento mais importante da fórmula, com base em dados fornecidos por várias informações disponíveis.

Assim, é possível afirmar que o Método Factorial não fornece uma garantia de vida útil, apenas apresenta uma estimativa com base em informações disponíveis e, portanto, a fiabilidade depende da precisão dos dados de entrada.

De modo a sistematizar e tornar mais objectiva a vida útil de referência, foram desenvolvidos vários projectos de criação de plataformas para reunião de informações, com bases de dados úteis sobre a vida útil de referência, descrevendo-se em seguida alguns exemplos.

Mayer e Bourke (2005) apresentam uma plataforma com dados sobre a durabilidade para mais de 900 componentes de construção - *the Construction Durability Database* - disponível em www.componentlife.com, resultante de um projecto de pesquisa para o *UK Housing Corporation, Building LifePlans*. Para cada componente existe um conjunto de descrições de durabilidade que definem, através dos seus principais critérios de durabilidade, as opções dos componentes comuns disponíveis.

As principais informações subjacentes aos dados de durabilidade têm em conta:

- O conhecimento do componente: os materiais que compõem o componente, o processo de fabrico e os dados de desempenho do componente;
- O desempenho da durabilidade dos componentes na prática: onde os modos de falha e os dados de tempo de vida são analisados à luz das experiências e pesquisas publicadas;
- Os factores que influenciam a durabilidade dos componentes, tais como o projecto, a instalação e a manutenção.

Todos os 3000 *rankings* de durabilidade são definidos no contexto do uso da habitação social no Reino Unido. As fontes de informação utilizadas para determinar os *rankings* de durabilidade, são baseadas em informações geralmente disponíveis em domínio público, tais como normas internacionais, europeias e britânicas, publicações oficiais e certificações independentes, associações comerciais, fabricantes e experiência prática e profissional.

Para cada componente, material ou conjunto, são apresentados os principais modos de falha e problemas de durabilidade, que fornecem um quadro para o *Failure Mode Effect and Criticality Analysis* (FMECA), que está na base dos *rankings* de durabilidade estimada para cada componente. É estudada ainda a relação entre os *rankings* de durabilidade e a vida útil estimada para comparar e validar as estimativas atribuídas aos componentes.

Este projecto fornece então informações essenciais para:

- Estabelecer as especificações dos componentes e permitir fazer escolhas no contexto de componentes com vida útil esperada igual e ter uma justificação de durabilidade para a utilização de materiais e componentes sustentáveis;
- Desenvolver planos de manutenção e avaliações de propriedades que darão informações sobre o planeamento de negócios, opções de investimento e gestão de riscos;
- Fornecer uma medida quantitativa do melhor valor e melhoria de desempenho, incorporando as informações de modelos de custo de ciclo de vida e de avaliações de desempenho durante todo o tempo de vida.

Também o *Research Group on Durability of Building Components* do Politécnico de Milão, em colaboração com o CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Batiment*), está a recolher dados provenientes de pesquisas no seu politécnico e da rede de durabilidade italiana. O trabalho pretende fornecer uma base de dados aberta que pode ser constantemente implementada e melhorada através da ajuda de pesquisadores, proprietários, projectistas, fabricantes, seguradoras, administradoras de bens construídos em toda a Europa. A base de dados fornecerá os dados de entrada para prever a vida útil de cada componente de construção e estará disponível na Web, em www.duree-de-vie.batiment.fr.

O objectivo da plataforma é estabelecer uma ponte entre os especialistas em durabilidade e os utilizadores finais dos dados de vida útil, bem como o desenvolvimento de ferramentas para a aplicação do Método Factorial melhorado através de redes para orientar os utilizadores na atribuição de valores aos factores, evitando a subjectividade.

A aplicação do Método Factorial precisa do conhecimento da vida útil de referência dos componentes de construção, ponto de partida do cálculo. Essa é a razão pela qual, é fundamental proporcionar um conjunto de dados de vida útil de referência que podem ajudar e conduzir o projectista na obtenção do valor de vida útil estimado em cada contexto de aplicação.

Esta plataforma permite a criação de grelhas específicas para cada família de elementos de construção estabelecidas de acordo com a ISO 15686-8 (2004). Estas grelhas de avaliação estão a ser progressivamente desenvolvidas com os utilizadores e em parceria com especialistas de componentes relevantes. Os dados recolhidos são documentados com informações necessárias para uma avaliação objectiva e confiável da vida útil.

As grelhas têm em conta todos os factores que influenciam a vida útil dos componentes de construção, como se pode ver na figura 4.2.

Accueil

cover in small el...

Grid's Features cover in small elements terracotta

Family : Superstructure, Category : Toitures, Sub Category : Couvertures

Failure ways

[List of the failure ways associated to the Grid]

Facteurs		Niveaux des facteurs respectif				
A	Geometry	Interlocking tiles		Sliding tiles	Plain tiles	Channel tiles
	surface mass	ms [kg/m²] < 25	25 < ms [kg/m²] < 35	35 < ms [kg/m²] < 45	ms [kg/m²] > 45	
B	Height of the building	Very high building		High building	Low building	
	Complexity of the roof	Complex roof		Simple roof		
	Screen under roof	absence of screen		presence of screen		
	Orientation of the roof	North		East-West	South	
	Value of the slope	p < 0,30	0,70 < p < 0,90	0,30 < p < 0,50	0,50 < p < 0,70	p > 0,90
	Tiles type of fixing	No fixing		Fixing by nail		Fixing by hook
	Fixing density	1/6		1/3	1/2	
C	respect of DTU prescribed slopes	NO			YES	
D	Non Applicable	Non Applicable				
E	Zone of wind considered	Zone 4		Zone 3	Zone 2	Zone 1
	Roughness of the ground	Category of ground IV	Category of ground IIIb	Category of ground IIIa	Category of ground II	Category of ground 0
F	Site effect	With site effect			Without particular site effect	
	Impact of the successive access	Presence of equipment on the roof			No equipment on the roof	
G	Frequency of cleanings	Never			Regular	

Figura 4.2 – Exemplo de uma grelha para a vida útil de um componente de construção (Hans *et al* (2008))

Esta plataforma não visa identificar patologias, falhas nos materiais ou erros grosseiros de execução. No entanto, fornece respostas em termos de quantificação da duração de vida, quando os desafios são diferentes de resultados de não qualidade, permitindo a consulta de dados de vida útil armazenados, a fim de estimar a vida útil de um componente em condições semelhantes (Hans *et al* (2008), Daniotti e Lupica Spagnolo (2008b)).

Lee *et al* (2008) desenvolveram uma ferramenta de avaliação da durabilidade, designada de BRANZ. Esta ferramenta fornece informações, pesquisas, ensaios de materiais e serviços de consultoria para a indústria da construção civil, com um foco predominante sobre as necessidades dos clientes na Nova Zelândia.

Esta ferramenta envolve a criação de uma base de dados de durabilidade fundamentada e independente e informações sobre compatibilidade, que abrangem os componentes de construção e materiais utilizados na construção habitacional e estará disponível como uma ferramenta interactiva na Web, com o potencial de gerar um caminho para a verificação do cumprimento dos requisitos de vida útil do *New Zealand Building Code* (NZBC). A base de dados servirá como uma guia para as actuais soluções

aceitáveis e como um repositório em constante evolução de novas informações e pesquisas, geradas tanto no BRANZ como noutras ferramentas.

A ferramenta poderá ser utilizada por pessoas com uma vasta gama de conhecimentos e experiências, tais com projectistas, órgãos regulamentares, fabricantes, bem como pesquisadores na área da construção e deverá fornecer explicitamente:

- Um catálogo de informações existentes de durabilidade, incluindo resumo e referências para correntes soluções aceitáveis;
- Um recurso para o desenvolvimento de métodos para materiais de construção novos e um meio de expor essas ideias a toda a indústria para uma análise crítica;
- Um registo explícito de lacunas no conhecimento da durabilidade de materiais de construção correntes e ambientes de exposição, servindo para focalizar a orientação de pesquisas futuras;
- Um método potencial para demonstrar a conformidade de um edifício com a cláusula B2 *Durability* do NZBC.

O quadro para comunicação com a base de dados, mostrado na figura 4.3, tem uma estrutura modular criada para dar respostas a três questões básicas:

1. Quais os requisitos de desempenho (**performance**) do NZBC para um determinado componente de construção?
2. Que verificação (**verification**) dos métodos é adequada para demonstrar o desempenho requerido?
3. Que aconselhamento (**advice**) especializado é subjacente a esta informação?

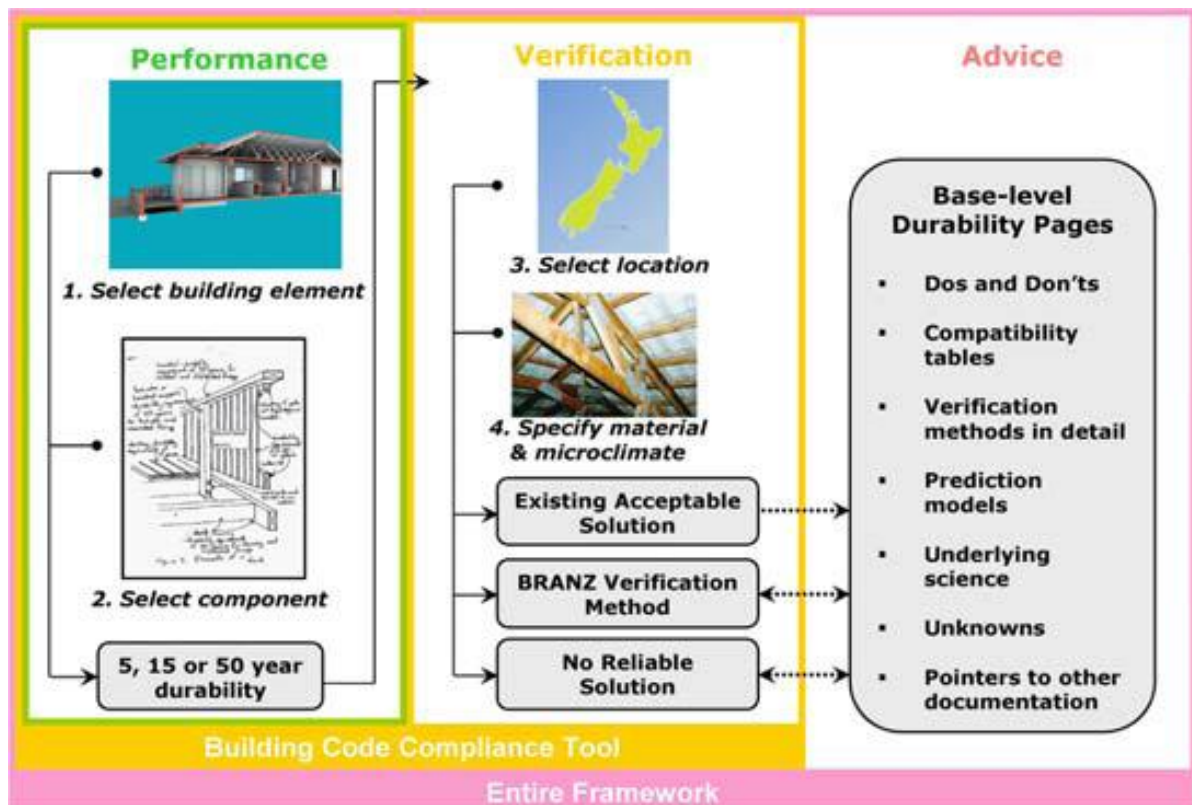


Figura 4.3 – Quadro de apoio à ferramenta de avaliação da durabilidade (Lee *et al* (2008))

Freitas *et al* (2008) realizaram dois estudos experimentais, no Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), baseados na metodologia geral proposta pela norma ISO 15686-1 (2000), com o intuito principal de, no final, obter um valor de vida útil de referência. No seu estudo, apresentam uma discussão sobre a correlação entre os resultados dos testes de envelhecimento acelerado e os emitidos a partir de uma exposição natural, tendo como referência os estudos acima mencionados relativamente ao desempenho ao longo do tempo de dois tipos de argamassas de cimento industrial expostas a testes de envelhecimento acelerado e natural.

Com os resultados dos ensaios relativos ao envelhecimento acelerado e envelhecimento natural, concluiu-se que o tipo de degradação resultante de um ou outro teste é semelhante. Como tal, é possível interpretar esses resultados e desenvolver um modelo de previsão de vida útil dos produtos e sistemas, por meio do estabelecimento de uma correlação entre o número de ciclos de envelhecimento artificial e o tempo real do envelhecimento natural (figura 4.4).

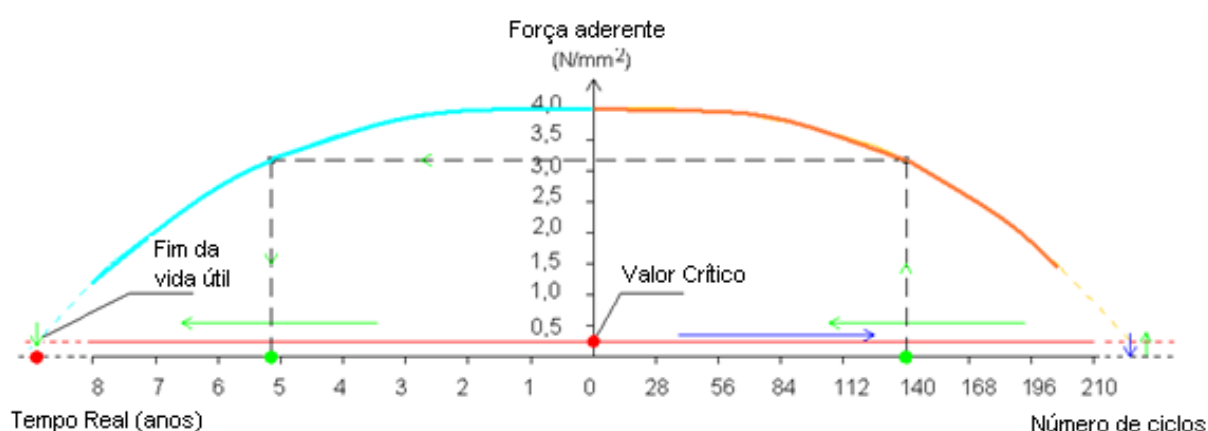


Figura 4.4- Correlação entre o número de ciclos de envelhecimento artificial acelerado e o tempo real de exposição natural (adaptado de Freitas *et al* (2008))

O objectivo do modelo é obter uma previsão de um valor de referência para a vida útil. Com este valor determinado, será então possível ter em conta os efeitos de factores modificadores relacionados com os diversos aspectos presentes no ciclo de vida de cada sistema ou material.

Para os produtos ou sistemas com um histórico de aplicações, também será exequível complementar a informação com um estudo do seu registo no que diz respeito às patologias e às medidas de reparação, podendo mais facilmente avaliar a importância da deterioração observada nas fases iniciais da instalação experimental.

O modelo proposto pode ser adoptado desde que seja possível identificar uma curva de degradação em função do tempo, no entanto a dispersão dos resultados determinados pela influência de factores, como as características de execução e o papel das interfaces entre as camadas, levou à inviabilidade da sua adopção.

4.2.2.2. Factores modificadores

A escolha dos valores dos factores poderá ser baseada em experiência prévia. É importante identificar os efeitos de cada uma das condições específicas sobre a vida útil do item em estudo. Para isso é, também, necessário recorrer a informações do fabricante, a documentos de laboratórios ou a bibliografia especializada.

Os valores a adoptar representam o desvio em relação às condições de referência e, por isso, deverão ser sempre próximos de 1. Os valores sugeridos pela norma ISO 15686 encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 4.2 - Valores de desvio dos factores em relação à condição de referência

Valor	Desvio em relação à condição de referência
0,8	Influência negativa
1,0	Sem desvio
1,2	Influência positiva

Tal como na vida útil de referência, nos factores modificadores também se deverá ter cuidado para não duplicar a contabilização da influência de uma determinada condição.

Vejamos, então, o significado de cada um dos factores modificadores:

O factor A representa a qualidade dos materiais ou componentes, nas condições em que são fornecidos à obra, segundo as especificações do projectista.

O factor B exprime o nível de qualidade do projecto. Este factor tem a ver com a adequação da escolha de uma solução construtiva específica, das medidas de protecção previstas, etc.

O factor C refere-se ao nível de qualidade da execução. A avaliação deste factor deverá reflectir o grau de confiança da mão-de-obra, mas também a existência ou não de uma fiscalização rigorosa.

Os factores D e E dizem respeito às características dos ambientes interior e exterior, respectivamente. Para a sua quantificação deverão ser tidos em conta os agentes de degradação.

O factor F reflecte o efeito do uso na degradação do material ou componente. Aqui, é geralmente importante a distinção entre uso comum e uso privado.

Finalmente, o factor G é relativo à manutenção e deve dar conta da probabilidade da existência de uma manutenção adequada (Corvacho (2000), ISO 15686-1 (2000)).

Como o Método Factorial pode ser aplicado a uma variedade quase infinita de situações não existem factores “standard”, embora os anexos da norma ISO 15686-1 (2000) forneçam alguns exemplos de como a abordagem pode ser usada.

Hovde e Moser (2004) referem que o estado da arte dos métodos focados no Método Factorial descrito na norma ISO 15686-1 (2000) deverá ser uma boa base para a aplicação e desenvolvimento dos tais métodos. Contudo, ainda existem muitos assuntos que têm de ser avaliados antes de estes entrarem numa aplicação prática:

- Determinação e recolha de dados para a vida útil de referência e factores individuais;
- Desenvolvimento de métodos de engenharia que combinem os benefícios dos mais sofisticados métodos probabilísticos e dos simples métodos determinísticos, usando distribuições estatísticas para descrever os diferentes factores;
- Utilização prática dos métodos na avaliação do ciclo de vida dos materiais e componentes de construção e de métodos de avaliação ambiental de edifícios;

- Aplicação dos métodos em projectos de ciclo de vida e em projectos de durabilidade dos edifícios.

4.2.3. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE

4.2.3.1. Exemplos de aplicação do Método Factorial

A introdução do Método Factorial na norma ISO levou à sua avaliação mais detalhada em vários trabalhos, tanto numa base teórica, como com base em algumas aplicações práticas.

Existem vários exemplos na literatura de estimação de vida útil feita pelo Método Factorial. Cada um destes exemplos desenvolve o Método Factorial com limites específicos, de acordo com a componente de construção (material) em análise. Mesmo que esses exemplos sejam muito diferentes uns dos outros, todos eles destacam as vantagens do método e algumas desvantagens.

As principais deficiências apontadas por Hovde e Moser (2004) e Nicolella (2005) podem ser resumidas no seguinte:

- A simples multiplicação dos factores, que na realidade pode ter um peso diferente;
- O resultado é um valor único, em vez de reflectir a variância da realidade;
- Os dados continuam a ser acumulados;
- A falta de uma relação directa com os dados recolhidos, por exemplo, sobre o meio ambiente, o clima, a qualidade da instalação, condições de uso, etc. Os factores normalmente são definidos baseados directamente no comportamento do componente, num determinado conjunto de condições, em vez de se basear na influência de parâmetros individuais, tais como regimes de chuva, temperatura, tipo de utilização, etc.;
- Subjectividade da atribuição dos valores numéricos aos factores. Na mesma situação, projectistas diferentes, sem indicações específicas, valores limite ou intervalo definido de variação dos valores, podem dar vários resultados diferentes.

Já Lounis *et al* (1998), citados por Hovde e Moser (2004), apontam como principais pontos fracos:

- Não ser baseado no desempenho, e como tal, sem identificação dos requisitos de desempenho mínimo aprovados;
- Escolhas arbitrárias da vida padrão e dos factores de ajustamento;
- Abordagem determinística, apesar da grande incerteza e variabilidade do tempo de vida.

Considerando os esforços na recolha de dados de entrada, o resultado de um único valor do Método Factorial, quando executado, tal como estabelecido na norma ISO 15686, parece não ser suficiente.

Até à data, a utilização do Método Factorial, segundo a norma ISO 15686, para a previsão de vida útil de materiais e componentes tem sido muito limitada. A maioria dos casos publicados são descritos em trabalhos de pesquisa ou relatórios onde são fornecidos exemplos do uso das aplicações.

Serão em seguida apresentados alguns exemplos de aplicação do Método Factorial, citados por Hovde e Moser (2004).

Strand e Hovde (1999) realizaram um estudo sobre como os dados de vida útil dos materiais de revestimento exterior (madeira e tijolo) influenciam a avaliação do ciclo de vida dos materiais. Os autores queriam enfatizar a necessidade de dados de vida útil na avaliação do ciclo de vida, como os dados ocorrem e como podem influenciar os resultados. Materiais de construção e componentes são utilizados por um maior período de tempo do que a maioria dos outros produtos. Os autores aplicaram o Método Factorial conforme descrito na ISO 15686-1 (2000), mas destacam, principalmente, o uso

dos factores E (características do ambiente exterior) e G (nível de manutenção). Foi realizada uma avaliação do ciclo de vida para dois climas (industrial e rural interior) e para as fachadas voltadas para norte ou sul e foram utilizados diferentes intervalos de pintura, limpeza e substituição. Nas conclusões diz-se que “Os métodos de previsão de vida útil e a avaliação do ciclo de vida lidam com alguns problemas comuns. A maioria dos dados de previsão de vida útil também são necessários na avaliação do ciclo de vida. A manutenção é a informação mais importante. A avaliação do ciclo de vida e a previsão da vida útil podem ser usadas em conjunto para otimizar a vida útil e a carga ambiental resultante de diferentes materiais.”

Hovde (1999) apresentou a necessidade de previsão de vida útil dos sistemas de protecção passiva contra incêndios. Ele refere-se ao Método Factorial, conforme descrito na norma ISO 15686-1 (2000). A protecção passiva contra incêndios tem tido um crescente interesse e importância em relação à introdução do desempenho baseado na construção e nos códigos de incêndio. Isto torna-se importante para prever a durabilidade e vida útil da protecção contra incêndio e será uma área específica para a aplicação de métodos de previsão de vida útil.

Hed realizou um estudo de planeamento de vida útil de um edifício multifamiliar, que foi construído em Gävle, na Suécia, em 1999. Os resultados foram apresentados em diversas publicações. A ISO 15686-1 (2000) foi utilizada como base para o estudo. O planeamento da vida útil foi integrado no projecto do edifício e seguiu o processo de construção a partir da fase de projecto até ao início da construção do edifício. O relatório é composto por três documentos separados, e num dos documentos é dada uma apresentação e discussão da aplicação do Método Factorial, tal como apresentado na norma ISO 15686-1 (2000). O autor afirma que “Um problema é que ainda existem poucos ensaios realizados de vida útil dos materiais e componentes, incluindo todos os efeitos necessários do componente de construção, quando está em funcionamento no edifício, ou seja, após a metodologia de previsão de vida útil.

A precisão da vida útil estimada é afectada então por este facto. Assim, tem que se discutir se vale a pena o esforço de fazer estimativas ou não. Se o objectivo é encontrar um valor preciso, é claro que o objectivo não é alcançado. Mas se o objectivo é melhorar a situação geral no serviço de planeamento da vida útil, a resposta é sim.

O Método Factorial ISO pretende ser uma ferramenta para melhorar a estimativa da vida útil. Apurou-se no projecto que este método não melhorou as estimativas de vida útil. Esta opinião é baseada no seguinte: a incerteza da VUR e dos valores dos factores; a fórmula factorial compreende um valor de referência e factores modificadores de A a G, se o valor de referência não for determinado com precisão, não é adequado ajustar esses valores com um conjunto de factores incertos; a incerteza do efeito da combinação de factores; o método não tem em conta a necessidade do conhecimento de causa e efeito para estimar a vida útil, como tal, a estimativa será baseada em acontecimentos incontrolláveis, que podem actuar independentemente uns dos outros.”

Na Finlândia, foi realizado um projecto para desenvolver um sistema de gestão de informações relativo à vida útil dos produtos de construção. O objectivo do sistema é assistir projectistas, empreiteiros e organizações responsáveis pelo cuidado e manutenção dos edifícios.

Os resultados do projecto são apresentados num relatório (Häkkinen *et al* (2001)), em que é apresentado o sistema de informação global do comportamento da vida útil dos produtos de construção. Esta informação é dada pelos fabricantes. No entanto, o relatório não trata os princípios e métodos de previsão de vida útil.

Uma parte importante do projecto foi destinada a desenvolver métodos de previsão de vida útil para fachadas e coberturas. Foi utilizado o Método Factorial descrito na norma ISO 15686-1 (2000). A aplicação do Método Factorial para estimar a vida útil do betão em fachadas foi apresentada por Vesikari (2000) e foi aplicada uma simulação de computador como um novo método de produzir os valores dos factores. Isto fez com que seja relativamente fácil determinar as propriedades essenciais e factores estruturais e seus efeitos na vida útil.

O estudo mostrou que o uso de apenas um único factor não é suficiente para cobrir todos os efeitos materiais ou ambientais. Dois factores parciais foram, então, determinados para os parâmetros materiais e outros dois para os parâmetros ambientais. Estes factores práticos são multiplicados para obter o efeito total. O Método Factorial é uma ferramenta simples para previsão da vida útil e pode ser avaliado para uso prático numa grande variedade de produtos no futuro.

Num curso nórdico, alguns participantes interessaram-se pelo Método Factorial como uma ferramenta simples para a previsão de vida útil. Nos relatórios do projecto são discutidas as possibilidades de aplicar o Método Factorial para a previsão de vida útil de diferentes produtos, componentes, estruturas e instalações de construção.

Um dos relatórios foi apresentado por Marteinson (2001) e nele foram apresentados os resultados de uma pesquisa extensiva do estado de janelas de madeira na Islândia. O Método Factorial foi aplicado conforme descrito na ISO 15686-1 (2000), para estimar a vida útil dos componentes da janela. Os resultados da avaliação do estado e as respostas dos proprietários da casa a um questionário são combinados e é utilizada uma distribuição de probabilidade *Weibull* para avaliar a vida útil estimada das janelas. Nas conclusões do estudo, Marteinson afirma que “Os resultados mostram que, para alguns materiais, a sinergia entre os agentes que afectam a durabilidade dos materiais é tão grande que é difícil dar a cada um dos factores um valor com base em resultados obtidos pelo estudo sistemático do objecto em uso.

A extensão real do factor de multiplicação é considerável e, portanto, o utilizador da metodologia não será capaz de escolher os valores apropriados para os factores, sem conhecimento aprofundado sobre os materiais e as práticas locais de construção. Em qualquer caso, ele precisa de informações sobre os principais factores para o componente e material considerado, e que intervalo é normal para os factores. A metodologia está longe de ser fácil de usar correctamente.”

4.2.3.2. Outros conceitos

Brandt *et al* (2008) explicam e analisam um modelo, baseado na experiência, para previsão de vida útil dos telhados de baixa inclinação, desenvolvido há alguns anos. Este método é muito semelhante ao Método Factorial, tendo em conta os factores considerados mais importantes para a deterioração dos telhados. Os factores do modelo são: o tipo de membrana de telhado, o número de folhas, a inclinação do telhado, o substrato, a fixação ao substrato, o projecto, especialmente os detalhes, a circulação no telhado e a manutenção. Da multiplicação de todos estes factores pelo tempo de vida esperado, para um material de cobertura de referência, obtém-se a vida útil desse material. Os factores têm valores entre 0 e 1 e o tempo de vida estimado é a vida útil máxima na condição de que todos os outros factores estão no seu máximo.

Os resultados da inspecção visual e os ensaios de laboratório confirmam que o modelo de vida útil - pelo menos para membranas de telhados betuminosas - dá uma boa estimativa da vida útil. No entanto, o modelo é bastante grosseiro e com consideráveis incertezas como alguns dos factores baseados numa avaliação individual. O modelo de vida útil deve enfatizar o uso de informações correctas mais

detalhadas no projecto do telhado. Como tal, os autores propõem o uso de um factor mais detalhado para o projecto, de modo a melhorar o modelo.

Mc Duling *et al* (2008b) mostram como as características do ambiente exterior (factor E) podem ser avaliadas com base no trabalho de Weinert (1980) sobre a precipitação, evaporação e a resistência dos doleritos do Karoo, usualmente utilizados em toda a África do Sul na construção de estradas e como agregado no betão.

Weinert calculou um valor N baseado numa relação entre a evaporação e a precipitação, onde $N < 5$ representa regiões húmidas e $N > 5$ regiões secas. Apesar dos valores N de Weinert poderem ser usados para classificar o macroclima, relevante para a degradação de componentes de construção, outros factores de degradação, como a poluição, também devem ser tidos em consideração. Agentes de degradação químicos e biológicos são dominantes em regiões húmidas, enquanto agentes de degradação mecânica, electromagnética e térmica ocorrem, principalmente, em regiões secas. O mesmo macroclima pode ser agressivo para um componente, mas favorável para o outro. Uma avaliação do macroclima deve ser baseada numa análise do impacto dos agentes de degradação aplicáveis à região climática e componente em questão.

Foi utilizado um sistema de classificação de cinco valores para avaliar as condições e factores de degradação e durabilidade, semelhantes aos factores utilizados no Método Factorial, num modelo de previsão de vida útil baseado na Cadeia de Markov e na *Artificial Intelligence Neuro-Fuzzy*. São utilizadas as seguintes classificações para avaliar as características do ambiente exterior:

Tabela 4.3 – Escala de classificação do ambiente exterior de um edifício ou componente (adaptado de Mc Duling *et al* (2008b))

Escala de classificação	Condições	Factor correspondente no Método Factorial
1 - Favorável	Ambiente exterior com muito pouco ou nenhum efeito sobre o edifício ou componente	1,2
2 - Menos favorável	Edifício ou componente exposto a agentes externos de degradação ambiental ao longo do tempo. Doses relativamente baixas e de curta duração	1,1
3 - Um pouco agressivo	Edifício ou componente exposto a agentes externos de degradação ambiental por períodos mais longos	1,0
4 - Agressivo	Edifício ou componente exposto a altas doses de agentes externos de degradação ambiental, onde está presente, a maioria do tempo, uma combinação de agentes de degradação sobre a superfície do componente	0,9
5 - Muito agressivo	Edifício ou componente constante e directamente exposto a agentes externos de degradação ambiental muito agressivos	0,8

Embora esta escala seja diferente dos valores dos factores propostos no Método Factorial, entre 0,8 e 1,2, a mesma escala convertida pode ser usada para minimizar a subjectividade na avaliação do ambiente exterior (factor E), conforme demonstrado na última coluna da tabela 4.3.

4.3. MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

4.3.1. ASPECTOS GERAIS

Estes métodos têm geralmente como base o cálculo matricial ou probabilístico, que define a probabilidade de ocorrência de uma mudança de estado de elemento, procurando assim ultrapassar a incerteza relacionada com as suas formas de degradação e a própria irreversibilidade das respectivas condições de serviço. O objectivo destes métodos é a elaboração de modelos que procuram descrever a evolução da degradação e as respectivas incertezas decorrentes dos períodos de tempo considerados. Para se obter estes resultados, é necessário o levantamento periódico do desempenho do elemento estudado, registado em bases de dados. Apesar de promissores, estes métodos ainda não têm uma grande aplicabilidade, dado serem bastante complexos, necessitarem de grande quantidade de informação para serem fiáveis e terem uma enorme dependência do trabalho de campo (Sousa (2008)).

Moser e Edvardsen (2002) também referem que a grande desvantagem dos métodos probabilísticos e outras técnicas feitas à medida, que são na sua maioria, baseadas na teoria probabilística, é que são demasiado especializadas, pesadas ou complicadas para serem utilizadas pelos planeadores comuns em aplicações *standard*, tais como edifícios ou pontes rodoviárias.

4.3.2. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE

4.3.2.1. Modelos de deterioração de Markov (*Markov Chain*)

O Modelo de Markov é uma abordagem estocástica utilizada na simulação da transição de um nível de degradação para outro ao longo do tempo. De acordo com Hovde e Moser (2004), o Modelo de Markov assume que a deterioração é um processo estocástico regido por variáveis aleatórias, que por sua vez definem parâmetros probabilísticos que afectam uma curva de degradação. As variáveis aleatórias são os critérios de desempenho definidos e os seus parâmetros probabilísticos correspondem aos parâmetros de desempenho. Estes últimos são geralmente escalonados em níveis de 1 a n (da rotura à excelência) de acordo com a degradação contínua do sistema. Da combinação do número de parâmetros com o número de níveis por parâmetro resulta uma matriz que representa o número de estados de um determinado elemento. Em seguida, define-se a probabilidade de passagem de um estado para outro, por unidade de tempo, para cada nível. Para este procedimento, utiliza-se como base observações de campo em função de cada variável ambiental (Sousa (2008)). Com este conjunto de informação, formam-se as matrizes e a probabilidade de passagem de estado, que podem ser graficamente exemplificadas pela figura 4.5.

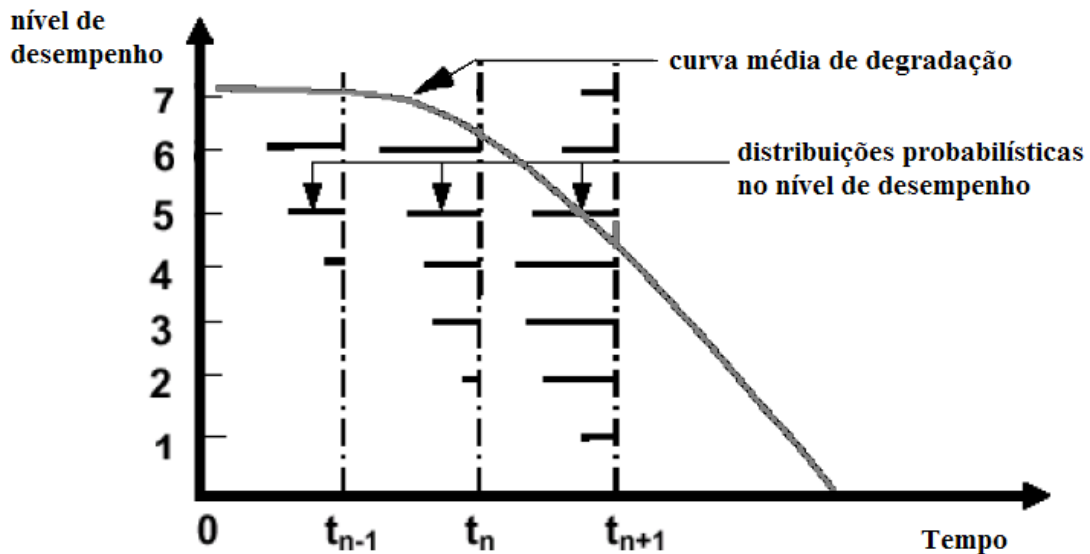


Figura 4.5 – Função de deterioração de Markov (adaptado de Hovde e Moser (2004))

Para Mc Duling *et al* (2008a), este método é considerado o método preferido para a previsão de vida útil e para o cálculo das alterações das condições. No entanto, segundo os mesmos autores a sua aplicação é restringida por uma disponibilidade limitada de dados históricos de desempenho sobre a degradação de materiais de construção necessários para preencher as matrizes de probabilidades de transição. Além disso, os dados históricos não permitem a consideração de novas soluções.

Lounis *et al* (1998), citado por Hovde e Moser (2004), refere que: “O Modelo de Markov considera sistemas progressivamente degradantes, onde para cada propriedade, em cada período de tempo, uma probabilidade de deterioração é definida. Este método, portanto, requer dados de entrada bastante sofisticados, sob a forma de probabilidades, que não são facilmente estimados, já que não podem ser lidos directamente a partir do comportamento real da estrutura em campo. O Modelo de Markov requer um conhecimento profundo do sistema tratado ou, por outro lado, tem que confiar em simplificações significativas.”

Vários projectos de pesquisa e grandes projectos de engenharia geralmente utilizam modelos como o Modelo de Markov. Vejamos em seguida alguns exemplos citados em Hovde e Moser (2004).

Abraão e Wirahadikusumh (1999), em “Development of prediction models for sewer deterioration”, tratam a vida útil do sistema de esgotos. O trabalho explora a abordagem baseada em probabilidade Markoviana para a modelagem da deterioração. Esta abordagem é baseada na suposição de que, desde que o comportamento das redes de esgoto (ou seja, a taxa de deterioração) seja incerta, a escolha de uma estratégia de reparação adequada é também um processo incerto. Modelos de previsão, baseados em probabilidade permitem a comparação das proporções esperadas nos estados de condição dados, com as proporções reais observadas em campo, e desta forma os possíveis defeitos de construção, materiais, controle de qualidade, etc., podem ser identificados. Opiniões de engenheiros peritos são utilizadas para validar os modelos de deterioração desenvolvidos na pesquisa.

Também Kaempfer *et al* (2002) aplicaram um modelo de deterioração mais ou menos simplificado para redes de esgoto. A condição de tubos de esgoto e juntas é avaliada de acordo com a escala e os efeitos de deterioração. A deterioração verificada é atribuída a uma das cinco classes diferentes de deterioração. Numa segunda fase, o estado das secções de esgoto é avaliado de acordo com as maiores

deteriorações. Numa terceira fase, é descrita graficamente a correlação entre as secções de rede e o ano de construção e as diferentes funcionalidades e variáveis constantes. As curvas de envelhecimento foram obtidas a partir dos dados de controlo disponíveis e o ano de construção para cada classe de estado. A vida útil média residual da secção de esgotos é representada por uma linha vertical entre a idade real da secção de esgoto e o ponto de intersecção com a curva de envelhecimento da classe de estado de intervenção. As intersecções diferentes na linha horizontal com as curvas de envelhecimento de diferentes classes de estado indicam as idades em que a secção é susceptível de passar para a classe seguinte.

Leira *et al* (1999), em “Degradation analysis by statistical methods”, abordam vários métodos. Nesse documento descrevem como os métodos estatísticos podem ser aplicados para previsão das necessidades de reabilitação. São mostrados exemplos de *trend plots*, métodos de sobrevivência, transição de classes e análise de parâmetros do modelo estocástico de estruturas de betão, estradas e redes de água. Deve-se realçar que há semelhanças no modo como os vários dados de saída de construção podem ser analisados.

Ansell *et al* (2002) utilizam uma abordagem de Markov para estimar a vida útil dos elementos de pontes na Suécia. É demonstrado como uma matriz de probabilidade de transição pode ser determinada numericamente para descrever o processo de deterioração de um elemento de ponte a partir dos dados de uma base de dados relacional. O método numérico utilizado é baseado numa combinação iterativa gradual dos elementos da matriz até que o erro entre a curva conhecida de deterioração média e uma curva dada pela cadeia de Markov seja minimizado. Também é demonstrado como a vida útil remanescente de um elemento de ponte pode ser estimada pelo estudo da variação do vector de estado com a idade da ponte.

4.3.2.2. Variáveis definidas como distribuições

Os métodos probabilísticos quantificam as incertezas muitas vezes sob a forma de distribuições de densidade. Podem ser utilizadas distribuições, em vez de valores simples, para a avaliação da vida útil usando fórmulas com diversas variáveis. São mostrados em seguida alguns exemplos, citados por Hovde e Moser (2004), que poderão ser úteis para a aplicação nos métodos de projecto de engenharia.

Enright e Frangopol (1998) estudaram a deterioração das pontes rodoviárias usando a abordagem de fiabilidade de séries de variação do tempo, onde a carga e a resistência são dependentes do tempo. O objectivo da análise é o desenvolvimento de uma estratégia de manutenção baseada em fiabilidade. É usada a simulação de Monte Carlo para encontrar a probabilidade de falha do sistema de tempo acumulado. É investigada uma ponte existente de betão armado com viga em T e são estudados os efeitos de vários parâmetros. Os resultados podem ser utilizados para prever melhor a vida útil de pontes de betão armado deterioradas e para desenvolver estratégias de manutenção óptimas baseadas na fiabilidade do tempo de vida para estas pontes.

Lounis *et al* (1998), em “Further steps towards a quantitative approach to durability design”, apresentam novas medidas para o desenvolvimento de abordagens de fiabilidade para o projecto de durabilidade e previsão da vida útil de componentes de construção que integram os requisitos de segurança, manutenção e durabilidade: em geral, a carga e a resistência devem ser modeladas como processos estocásticos e o problema de durabilidade resultante é formulado num formato probabilístico dependente do tempo. Utilizando a abordagem clássica de fiabilidade, o resultante problema de fiabilidade dependente do tempo, transforma-se num problema de fiabilidade independente do tempo através da adopção de uma distribuição de probabilidade de valor extremo

para a carga máxima de tempo de vida. A degradação da resistência e da sua variabilidade são incluídas no modelo e o problema de concepção probabilística é transformado num problema determinístico (ou semi-probabilístico). Esta abordagem semi-probabilística integrada para o projecto de durabilidade e previsão, supera as deficiências da abordagem empírica factorial e as complexidades de um método probabilístico totalmente dependente do tempo.

É proposta uma abordagem alternativa, utilizando a teoria dos processos estocásticos, para formular o problema de projecto de durabilidade como um problema de passagem, para que a probabilidade de falha dentro do tempo de vida do componente seja obtida a partir da probabilidade de primeira passagem para o processo estocástico.

Fagerlund (1999) trata o ataque da geadas, usando esta forma de abordagem probabilística.

Os principais parâmetros são introduzidos como distribuições. O risco de deterioração devido à geadas pode ser calculado quando as funções de frequência dos dois parâmetros, teor de humidade crítico e teor de humidade real, são conhecidas.

A deterioração significativa por causa das geadas não ocorre até um certo nível de humidade crítica avançar sobre uma parte suficientemente grande da estrutura. O nível de humidade crítica é um “valor de ruptura” que pode ser comparado com a capacidade de carga de projecto estrutural. É uma propriedade material que parece ser bastante influenciada por variações normais nas propriedades ambientais, tais como o número de ciclos de gelo-degelo e temperatura mínima de congelação. O teor de humidade no interior da estrutura depende das condições de humidade externa: quanto mais húmido o ambiente, maior o teor de humidade interna e maior é o risco de deterioração com as geadas. O teor de humidade efectivo na estrutura pode ser comparado com a carga efectiva no projecto estrutural.

Foram tratados alguns casos hipotéticos, mostrando que a probabilidade de deterioração com as geadas pode realmente diminuir com o aumento do tempo de exposição em ambientes moderadamente húmidos, mas que normalmente aumenta com o tempo de exposição em ambientes constantemente húmidos, onde a estrutura não tem nenhuma possibilidade de secar.

Flourentzou (1999) utiliza quatro regimes de degradação típica para quantificar o comportamento de um elemento. A escolha da respectiva curva de degradação ou combinação é um pouco teórica. MEDIC (“Prediction Method of probable Deterioration Scenarios and Refurbishment Investment Budgets”) é desenvolvido sobre as teorias de probabilidades condicionais para ajudar a avaliar a vida útil residual e, assim, prever os investimentos necessários na reabilitação.

Quando se passa de produtos gerais, como a duração de vida de janelas de madeira, para objectos específicos, por exemplo, janelas de madeira com 29 anos, a condição actual do objecto deve ser tida em conta. Uma avaliação da vida útil residual deve, portanto, estar intimamente ligada a um bom método de diagnóstico.

No projecto europeu EPIQR (“Energy Performance Indoor Environment Quality Retrofit”), a deterioração dos materiais e componentes de construção é descrita pelo uso de um sistema de classificação para quatro “condições de estado” (ver figura 4.6). MEDIC calcula a probabilidade de mudar de uma classe para outra com o tempo. A previsão é baseada na combinação da probabilidade, *a priori*, com base na experiência de um grande número de investigações/reabilitações anteriores e o estado actual do objecto em estudo.

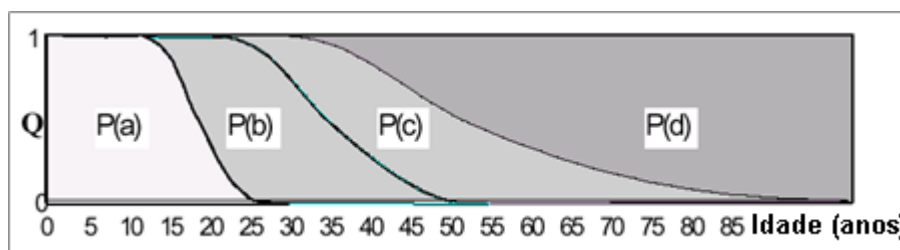


Figura 4.6 – Quatro curvas representativas de degradação (Hovde e Moser (2004))

Dotreppe (1999) utiliza um sistema de duas fases de degradação para modelar o comportamento dos tabuleiros de pontes de betão armado, como mostrado na figura 4.7:

1. Iniciação;
2. Propagação (despassivação).

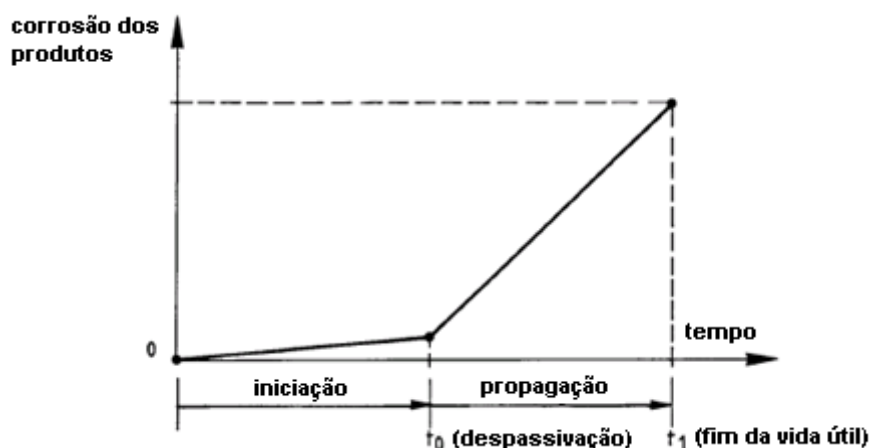


Figura 4.7 - Duas fases do regime de degradação utilizado por Dotreppe (adaptado de Hovde e Moser (2004))

Neste estudo é apresentado o modelo usualmente aceite para a descrição do processo de corrosão num elemento de betão armado. É ainda discutida a evolução em relação ao problema da influência da largura da fenda na durabilidade do betão e são examinados os factores que levam à fissuração da laje de betão, com especial atenção para a retracção térmica que afecta rapidamente as fendas. São ainda apresentados os resultados de um exemplo prático e são mencionados os requisitos essenciais em matéria de durabilidade. Diversos parâmetros têm de ser cuidadosamente avaliados, tais como o tipo e a quantidade de pré-esforço a ser introduzido na laje.

Siemes (1999) apresenta um método probabilístico de previsão do comportamento de estruturas de betão. Ele define quatro fases relevantes para a vida útil:

1. Despassivação;
2. Fendilhação;
3. Fragmentação;
4. Colapso.

Para a corrosão induzida pelo cloreto, foi formulada uma equação que dá o recobrimento do betão exigido em função da concentração de cloreto, para um tempo de serviço escolhido. As variáveis são apresentadas como distribuições. O projecto de vida útil tem sido feito com base na metodologia

desenvolvida num projecto de investigação da Comunidade Europeia, "DuraCrete". Este projecto melhorou a fiabilidade existente e o método de projecto estrutural baseado no desempenho, introduzindo a modelagem das degradações e das acções ambientais.

Siemes (2002) apresenta um modelo de cinco fases mais refinado para betão desde o seu estado inicial até ao colapso, ver figura seguinte.

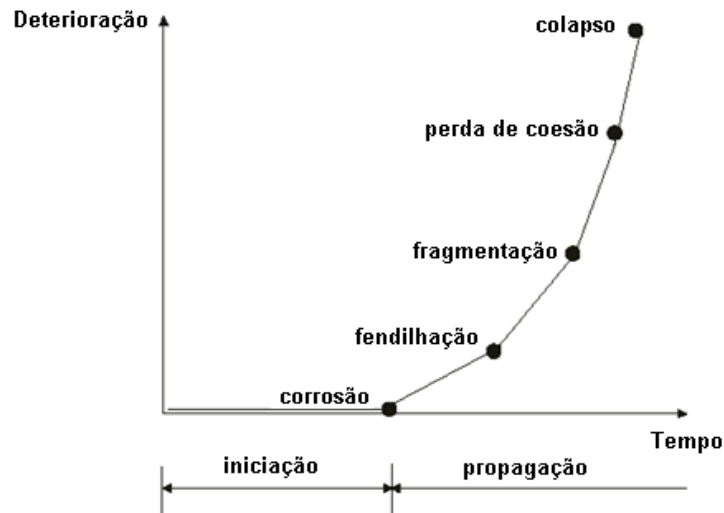


Figura 4.8 - Efeitos adversos durante a corrosão das armaduras até ao colapso (adaptado de Hovde e Moser (2004))

Faber e Gehlen (2002) descrevem o conceito probabilístico para a avaliação da durabilidade de estruturas de betão armado existentes, com especial ênfase na variabilidade espacial do parâmetro dominante de deterioração. Eles usam os conceitos de árvore de falhas (*fault tree*) e árvore de decisão (*decision tree*) e quatro níveis de deterioração. O método é ilustrado para o problema da difusão de cloreto, onde até a concentração de cloreto na superfície é tratada probabilisticamente.

Andrade (2005) apresenta uma proposta para quantificar a vida útil de estruturas de betão quando inseridas num ambiente com cloretos, em fase de projecto, investigando a influência da variabilidade dos parâmetros relacionados com os modelos de penetração de cloretos nas estruturas de betão armado. Para tal, admitiu que o tempo para despassivação de uma estrutura pode ser modelado através da solução da função de erro da 2ª Lei de Fick (considerando a concentração superficial e o coeficiente de difusão de cloretos constante) e considerou que as variáveis que compõem os modelos citados são aleatórias, apresentando uma determinada média e desvio-padrão, com distribuição do tipo lognormal. Com estes dados, utilizou então a técnica da fiabilidade para determinar o índice de fiabilidade associado à vida útil da estrutura, através do processo de simulação de Monte Carlo. Os resultados mostraram que a adopção dos princípios de fiabilidade para a previsão da vida útil pode ser utilizada na fase de projecto das estruturas, a fim de que as mesmas possam ser construídas admitindo uma determinada probabilidade de falha para uma vida útil pré-estabelecida.

4.3.2.3. Exemplos práticos de métodos probabilísticos

Alguns dos exemplos a seguir mencionados são citados por Hovde e Moser (2004).

Breitenbüchner *et al* (1999) apresentam um projecto de vida útil do túnel *Western Scheldt*, que assume que o ataque de cloreto é o principal parâmetro para a degradação do recobrimento. Os dados de entrada para este cálculo foram definidos como variáveis estocásticas (ver distribuições de densidade na tabela 4.4). O projecto de vida útil foi feito com base na metodologia desenvolvida num projecto de pesquisa para a Comunidade Europeia. Este projecto com o nome de *DuraCrete* tem melhorado a fiabilidade e o desempenho do método baseado no projecto estrutural, introduzindo a modelagem das degradações e acções ambientais. Acredita-se que a vida útil de projecto do túnel *Western Scheldt* é o primeiro projecto onde foi aplicada na prática a abordagem *DuraCrete*.

Tabela 4.4 - Distribuições de entrada usadas no projecto do túnel *Western Scheldt* (adaptado de Hovde e Moser (2004))

Nº variável	Parâmetro	Dimensão	μ	σ	Distribuição
1	x_c - recobrimento	[mm]	37	2	Exponencial
2	$D_{RCM,0} - Cl^-$ - Coeficiente de migração	$[10^{-12} m^2/s]$	4,75	0,71	Normal
3	C_{crit} - Teor crítico de cloreto	[wt.-%/binder]	0,70	0,10	Normal
4	n - expoente de idade	[-]	0,60	0,07	Normal
5	k_t - factor de ensaio	[-]	0,85	0,20	Normal
6	k_e - factor do ambiente	[-]	1,00	0,10	Normal
7	k_c - factor de execução	[-]	1,00	0,10	Normal
8	$C_{SN} - c(Cl^-)$ - Superfície de betão	[wt.-%/binder]	4,00	0,50	Normal
9	t_0 - tempo de referência	[ano]	0,0767	-	Determinística

Helland (1999) mostra como foi avaliada a vida útil remanescente das actuais estruturas de betão com base na penetração de cloretos e tendo em conta uma diminuição da difusão de cloreto ao longo do tempo, para diferentes materiais (ver figura 4.9). O documento descreve um cenário onde a avaliação da conformidade pode ser feita dentro de um período bastante curto em relação à possibilidade de uma estrutura para suportar a entrada de cloretos no seu ambiente específico.

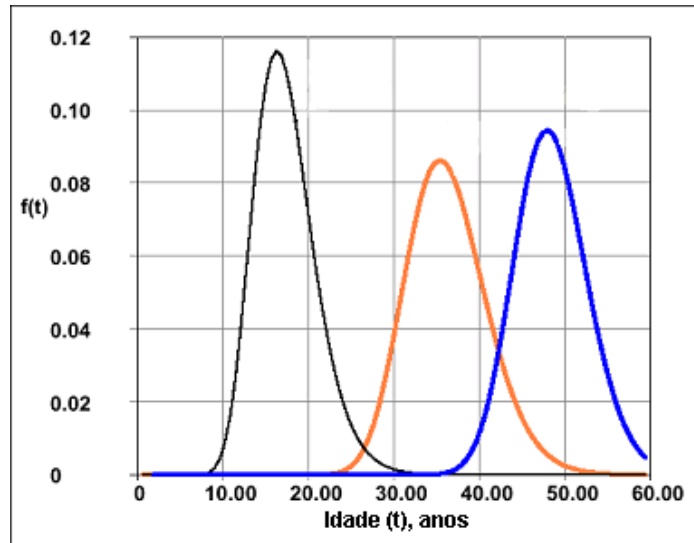


Figura 4.9 - Resultados de vida útil usando diferentes materiais (adaptado de Hovde e Moser (2004))

Wisemann (1999) também mostra um exemplo de previsão de vida útil estrutural utilizando distribuições para os parâmetros para avaliar a durabilidade dos projectos usando materiais diferentes. As configurações dos parques de estacionamento no Canadá representam um dos climas mais adversos para o betão armado. O uso excessivo de sais de degelo nas estradas da América do Norte aumentou a taxa de deterioração das estruturas dos parques de estacionamento. O aparecimento de materiais “inovadores” e métodos promissores de aumento ou alteração do desempenho em serviço tem deixado os projectistas reticentes quanto aos benefícios das abordagens mais tradicionais. O autor analisa os modelos de degradação disponíveis para a previsão da vida útil das estruturas de estacionamento, em particular os métodos que utilizam materiais inovadores.

Teply (1999) lida praticamente com todas as variáveis que influenciam a vida útil de uma viga de betão armado (variações nas propriedades da viga e degradação (corrosão) devido à carbonatação e ataque de cloretos). Para uma viga específica de betão armado, é avaliada a despassivação da armadura e o consequente processo de corrosão ao longo do tempo, usando modelos numéricos. A secção transversal da viga é analisada utilizando a “layer approach”. A modelagem estatística do processo de carbonatação e a consequente corrosão da armadura é actualizada utilizando medições *in situ*. É ainda avaliada a influência da deterioração na probabilidade de falha e realizada uma análise de sensibilidade.

Hong (2000) aborda a degradação das estruturas de betão armado devido a ambientes agressivos e a carregamentos em serviço. Estes dois fenómenos podem causar degradação da resistência das estruturas de betão armado. Como tal, devem ser considerados para uma avaliação e previsão de vida útil segura de estruturas em deterioração. É apresentada uma abordagem integrada para a análise do sistema dependente do tempo, considerando a natureza estocástica dos processos de carga, as incertezas das forças, o tempo de início de degradação e o modo de degradação da força. A abordagem tem em conta a correlação parcial entre as falhas de elementos estruturais. A análise dos resultados obtidos indica que a fiabilidade dos sistemas de série é relativamente insensível à correlação entre a falha de elementos estruturais. No entanto, a fiabilidade do sistema paralelo é altamente sensível à correlação.

Shekarchi *et al* (2009) utilizaram o modelo DuraPGulf como uma abordagem probabilística em projecto de durabilidade de estruturas de betão armado. O ambiente do Golfo Pérsico é caracterizado pelo seu clima rigoroso, característico do deserto, e águas salinas, que aumentam a penetração de cloretos e, consequentemente, as taxas de corrosão da armadura. Como tal, mesmo estruturas projectadas e construídas em conformidade com as normas, expressam problemas de corrosão em fase precoce da sua vida útil. Para resolver este problema, além de alterar as exigências da norma em relação à durabilidade, devem-se representar métodos de projecto de durabilidade. Uma vez que todos os parâmetros para a durabilidade do betão e exposição ambiental normalmente mostram uma dispersão elevada, uma abordagem baseada na probabilidade fornece uma base muito poderosa para a análise de durabilidade.

DuraPGulf é um modelo de projecto de vida útil, que faz uma previsão realista do início de corrosão nas estruturas de betão armado na região do Golfo Pérsico. Os parâmetros de saída são interpolados usando uma base de dados resultante de experiências conduzidas na região. Esta abordagem é aplicada principalmente para obter uma durabilidade e desempenho a longo prazo mais controlados de novas estruturas de betão.

Embora ainda estejam em falta dados relevantes, esta abordagem tem sido aplicada com sucesso a uma estrutura de betão no Golfo Pérsico. A fim de facilitar a análise de durabilidade baseada na probabilidade, uma análise simples foi desenvolvida, onde a abordagem probabilística é baseada numa simulação de Monte Carlo. Um estudo comparativo da abordagem determinística e probabilística foi realizado utilizando os dados disponíveis da avaliação de durabilidade de um quebra-mar no Golfo Pérsico e concluiu-se que o projecto baseado na probabilidade fornece resultados mais realistas do que a análise determinista do projecto de durabilidade.

4.3.2.4. Outros conceitos

Alguns autores têm utilizado diferentes conceitos dos acima referidos para investigações mais sofisticadas. Alguns dos exemplos a seguir mencionados são citados por Hovde e Moser (2004).

Estes e Frangopol (1999) criaram um modelo para as pontes utilizando os modos de falha. Este estudo propõe uma abordagem de fiabilidade do sistema para otimizar a estratégia de reparação do tempo de vida para pontes rodoviárias. A abordagem é demonstrada através de uma ponte já existente no Estado do Colorado. A ponte é modelada utilizando os modos de falha e é computadorizada a fiabilidade do sistema global da ponte utilizando os modelos de deterioração dependentes do tempo e os “live load models”. As conclusões revelam que a abordagem proposta demonstra potencial real para aplicações práticas, precisa de actualizações frequentes através da inspecção e exige um esforço considerável de investigação para desenvolver a introdução de dados precisos.

Liang *et al* (2001) usam um “multiple layer fuzzy method model” para avaliar a vida útil de pontes. A deterioração é modelada utilizando a teoria *fuzzy* e o fim da vida útil é definido pelo índice de segurança mínimo. O objectivo principal deste trabalho é a criação de uma avaliação do “multiple layer fuzzy method model” para determinar o estado de degradação de pontes de betão armado existentes. O modelo avaliado pode ser dividido em graus de classificação de I a V, que vão desde não deteriorados a inaptos para o serviço, respectivamente.

Vu e Stewart (2002) utilizam um modelo que inclui a variabilidade espacial e aleatória da difusão de cloreto e do recobrimento e resistência do betão. É medida a vida útil das estruturas expostas a ambientes agressivos pela probabilidade de fissuração e fragmentação do recobrimento do betão. Esta probabilidade é calculada usando um modelo de deterioração estrutural. Este modelo pode ser usado

para prever a proporção de uma superfície de betão provavelmente fracturada para qualquer período de referência (ver figura 4.10). Este é um critério útil para prever a vida útil das estruturas de betão armado.

Parâmetros	Média	Desvio-padrão	Distribuição
Recobrimento	$D_{\text{tnom}} + 19,8\text{mm}$	$\sigma = 16,5\text{mm}$	Normal
f'_{cyl}	$f'_c + 7,5\text{MP}$	$\sigma = 6\text{mm}$	Normal
$f'_{\text{ct}}(t)$	$0,53 (f'_c(t))^{1/2}$	0,13	Normal
$E_c(t)$	$4600 (f'_c(t))^{1/2}$	0,12	Normal
$k_w(f'_c(28) = k_w f'_{\text{cyl}})$	0,87	0,06	Normal

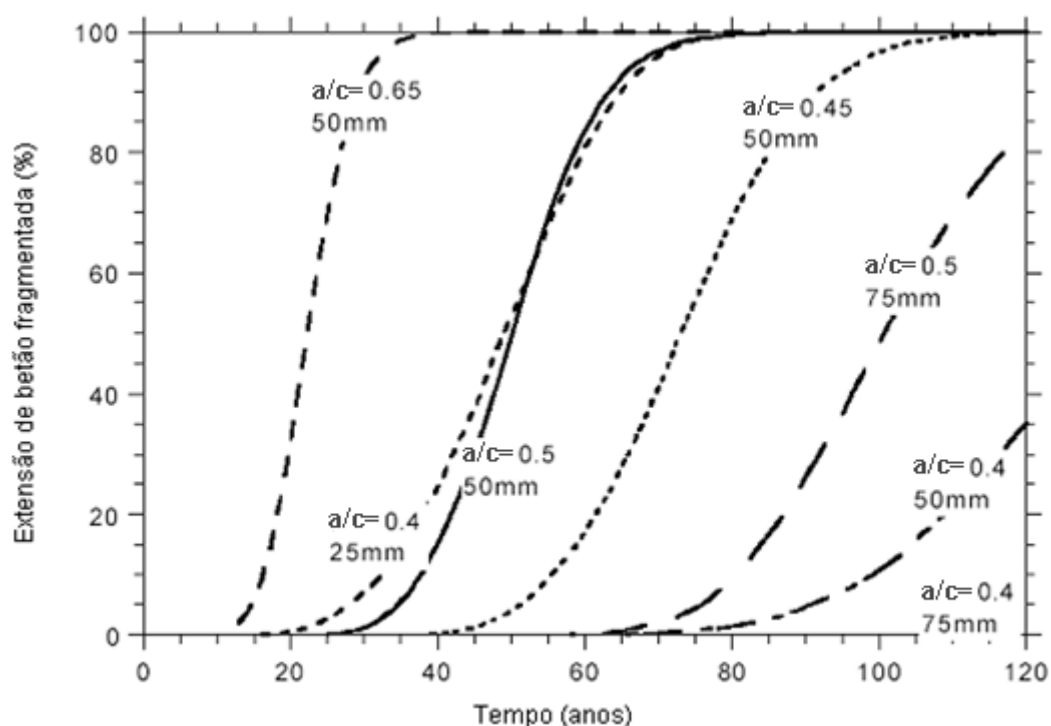


Figura 4.10 - Dados de entrada e efeitos resultantes do recobrimento de betão e da relação água/cimento no betão fissurado e fragmentado (adaptado de Hovde e Moser (2004))

Alguns destes conceitos são ainda mais sofisticados e mais elaborados do que os métodos probabilísticos. No entanto, neste momento, apenas são adequados para pesquisa ou utilização específica em projectos singulares e únicos.

Balaras *et al* (2005) apresentam um novo método e *software* para avaliar a renovação de edifícios residenciais e processos de reabilitação, para a selecção a longo prazo de estratégias de investimento financeiro e estabelecimento de prioridades para grandes edifícios, designado INVESTIMMO.

Este *software* também inclui um modelo capaz de prever a deterioração futura de todas as partes do edifício. O utilizador pode criar e avaliar os vários cenários de reabilitação e realizar uma análise de custos, tendo em conta: o estado de deterioração físico e funcional do edifício, a deterioração futura

dos componentes do edifício, a qualidade de vida dos ocupantes, o consumo de energia e água, bem como o impacto ambiental da operação de construção e acções de reabilitação, redução de custos operacionais e o tempo total efectivo do investimento.

O diagnóstico do estado físico e funcional das construções é baseado no *Energy Performance Indoor Environment Quality Retrofit* (EPIQR), uma metodologia padronizada através de auditorias de construção, e no *software* desenvolvido num projecto europeu anterior. Cada edifício está dividido em cinquenta partes estruturais e funcionais diferentes, definidas como elementos. A condição geral de um edifício é avaliada elemento por elemento. Para cada elemento definido, os problemas mais representativos e deteriorações foram recolhidos e agrupados em categorias colectivas. O diagnóstico é feito através de inspecção visual e é definida usando quatro códigos de deterioração (designados por "a", "b", "c" ou "d"), que correspondem ao estágio de degradação observado e estão associados a acções/obras específicas, correspondendo o código "a" à melhor condição possível (sem acções ou obras necessárias), e o "d" à pior condição (elemento está deteriorado ou obsoleto e precisa de ser substituído).

Mc Duling *et al* (2008a), num relatório baseado numa tese de doutoramento, analisam a aplicação da *neuro-fuzzy artificial intelligence* para traduzir o conhecimento especializado em valores de probabilidade, de modo a completar os dados históricos de desempenho para o desenvolvimento de matrizes de probabilidade de transição Markovianas, relativamente à previsão de vida útil, mudança de condições ao longo do tempo e efeitos dos níveis de manutenção na vida útil dos edifícios. O conhecimento especializado é usado para expressar a durabilidade e os factores de degradação em regras "IF-THEN", que são convertidos em valores de probabilidade com *neuro-fuzzy artificial intelligence*, de modo a preencher as matrizes de probabilidade de transição markovianas. Um caso de estudo é apresentado para provar que a disponibilidade limitada de dados históricos de desempenho sobre a degradação de materiais de construção pode ser complementada com conhecimentos especializados. Esses conhecimentos, traduzidos em valores de probabilidade, são usados para desenvolver matrizes de probabilidade de transição para a Cadeia de *Markov*, relativamente ao cálculo da vida útil estimada de um edifício ou componente, quantificando mudanças nas condições ao longo do tempo e determinando os efeitos dos níveis de manutenção sobre a vida útil.

4.4. MÉTODOS DE ENGENHARIA

4.4.1. ASPECTOS GERAIS

Após a exposição dos métodos determinísticos e dos métodos probabilísticos, os métodos de engenharia (*engineering design methods*) surgem de forma a conciliar as vantagens destes dois métodos. Estes são de acessível utilização e metodologias mais simples, tal como os métodos deterministas, mas descrevem os processos de degradação de forma probabilística, tal como os métodos probabilísticos, integrando um pouco de variabilidade associada à incerteza do mundo real, sem se tornarem excessivamente complexos.

Estes são utilizados para identificação dos fenómenos de degradação e diminuição do desempenho de uma forma mais analítica, possibilitando um controlo melhor destes e permitindo a correcção do projecto ou alterando os planos de manutenção (Quintela (2006); Silva (2009); Sousa (2008)).

O método de engenharia é definido por Moser e Edvardsen (2002) como “qualquer relação matemática simples (o mais simples possível, mas não simplista) trabalhada, usando na relação distribuições de qualquer tipo para os factores individuais”.

Segundo Hovde e Moser (2004), os principais requisitos para os métodos de engenharia são:

- Fácil compreensão (para engenheiros);
- Facilidade e rapidez de aplicação;
- Resultados realistas (para as simplificações dadas).

O mesmo autor estabelece ainda princípios gerais para o seu desenvolvimento, apresentados em seguida:

- Estabelecer uma equação que descreva a vida útil do edifício ou componentes, tendo em conta todos os parâmetros relevantes identificados. Para os casos padrão pode ser utilizada, a equação do Método Factorial, definida na ISO 15686-1 (2000). Noutros casos, têm que ser criadas equações modificadas ou feitas à medida;
- Utilizar dados dos parâmetros da equação acima referida, obtidos a partir da experiência, da opinião de peritos, etc. Criar qualquer tipo de distribuição de densidade de probabilidade para os parâmetros individuais identificados;
- Realizar o cálculo de vida útil;
- Rever a plausibilidade dos resultados usando opinião de especialistas, e quando necessário, modificar os dados de entrada em conformidade, ou seja, entrar em maior detalhe na criação de parâmetros para as variáveis dominantes da vida útil.

4.4.2. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE

4.4.2.1. Aquisição de dados pelo método Delphi (recursivo)

Em muitos casos, os dados não estão disponíveis para uso imediato, sob a forma de valores para os principais factores de influência definidos na equação para a vida útil, muito menos sob a forma de distribuições. Um método muito válido para a sua transformação é o chamado método Delphi (recursivo).

Numa primeira etapa, peritos reúnem e pedem opinião profissional sobre as distribuições dos factores, tipo de distribuição (normal, lognormal, Gumbel, etc), valores médios, desvios-padrão.

O segundo passo envolve o cálculo de vida útil usando dados de entrada de peritos. São utilizadas distribuições em vez de factores simples nas formulações matemáticas para a vida útil.

O terceiro passo é a discussão aprofundada dos resultados e dos parâmetros dominantes e análise de sensibilidade. Após ajuste fino do modelo e distribuições de densidade dos factores, o problema geral pode ser tratado com êxito (Hovde e Moser (2004); Moser e Edvardsen (2002)).

4.4.2.2. *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA)

O *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) ou *Failure Modes Effects and Criticality Analysis* (FMECA) foi desenvolvido na década de sessenta no domínio da aeronáutica. É um método de análise de risco que tem resistido ao longo dos tempos e é utilizado actualmente nas indústrias espacial, nuclear, química e automóvel (Talon *et al* (2006)). Actualmente este método mostra também enormes vantagens quando aplicado à área da construção.

O FMEA é um método de análise de risco, cujo princípio é definir todos os modos de degradações potenciais, as suas causas (acções, incompatibilidades entre os materiais) e as consequências para cada par função/componente. Em seguida, determinam-se os cenários de degradação de uma forma iterativa, onde se define passo a passo as possíveis evoluções, desde o início da exploração, e se determinam em cada passo as possíveis consequências e causas das degradações. Depois de explicitar

para cada componente a evolução da degradação ao longo do tempo e de unificar as informações, a vida útil estimada vai corresponder ao cenário de degradação com a duração mais curta (Talon *et al* (2005)).

Silva *et al* (2006) apresentam as principais fases de desenvolvimento do método:

1. Análise e hierarquização do sistema;
2. Selecção do subsistema a analisar;
3. Estudo funcional e selecção de um estado de funcionamento;
4. Identificação de um modo potencial de falha;
5. Identificação dos efeitos possíveis do modo de falha;
6. Identificação das respectivas causas;
7. Identificação dos métodos de detecção e de prevenção.

Para o FMECA, desenvolvem-se as seguintes fases adicionais:

8. Estimar a gravidade do modo de falha em estudo (S);
9. Estimar a probabilidade de ocorrência do modo de falha (O);
10. Estimar a probabilidade de detecção do modo de falha (D);
11. Análise da criticidade.

Estas fases encontram-se sumarizadas sob a forma de fluxograma representado na figura seguinte.

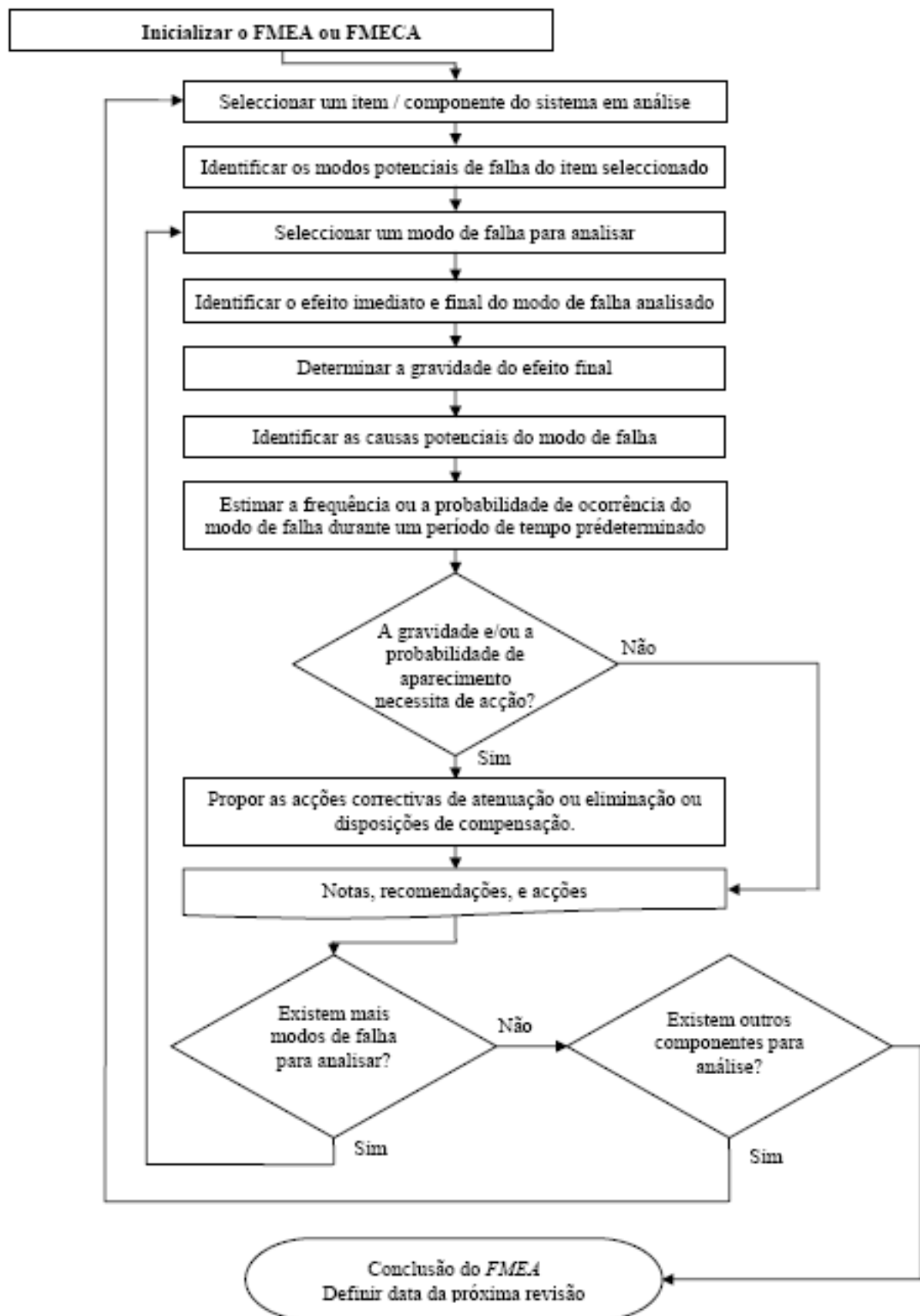


Figura 4.11 – Fluxograma da análise FME(C)A (Silva et al (2006))

Diversos estudos têm sido feitos em torno deste método e da sua aplicação na construção. Como tal, têm sido publicados os resultados de algumas dessas investigações que mostram a aplicabilidade deste método ao sector da construção.

Os exemplos que se seguem mostram os primeiros estudos de aplicabilidade do FMEA como apoio à avaliação da durabilidade dos materiais e componentes de construção.

Lair *et al* (1999) e (2001), citados por Hovde e Moser (2004), utilizam duas abordagens para prever a vida útil. Por um lado, aplicam o *Failure Modes and Effects Analyses* (FMEA). Este método permite a identificação dos modos de falha, ou seja, o incumprimento de uma das funções para as quais uma parte do edifício foi projectada. Por outro lado, reúnem informações sobre a vida útil de todas as fontes disponíveis (opinião de especialistas, estudos estatísticos, modelagem, envelhecimento artificial e natural, etc.), avaliam a sua qualidade e, por meio de um processo de fusão de dados (*data fusion*), obtêm uma probabilidade de falha, juntamente com os valores optimistas e pessimistas dessa probabilidade (limites superior e inferior). Estas duas abordagens dão um intervalo de vida útil, como mostrado na figura 4.12. No entanto, não dão uma visão directa da vida útil, a manutenção necessária ou a probabilidade de falha prematura.

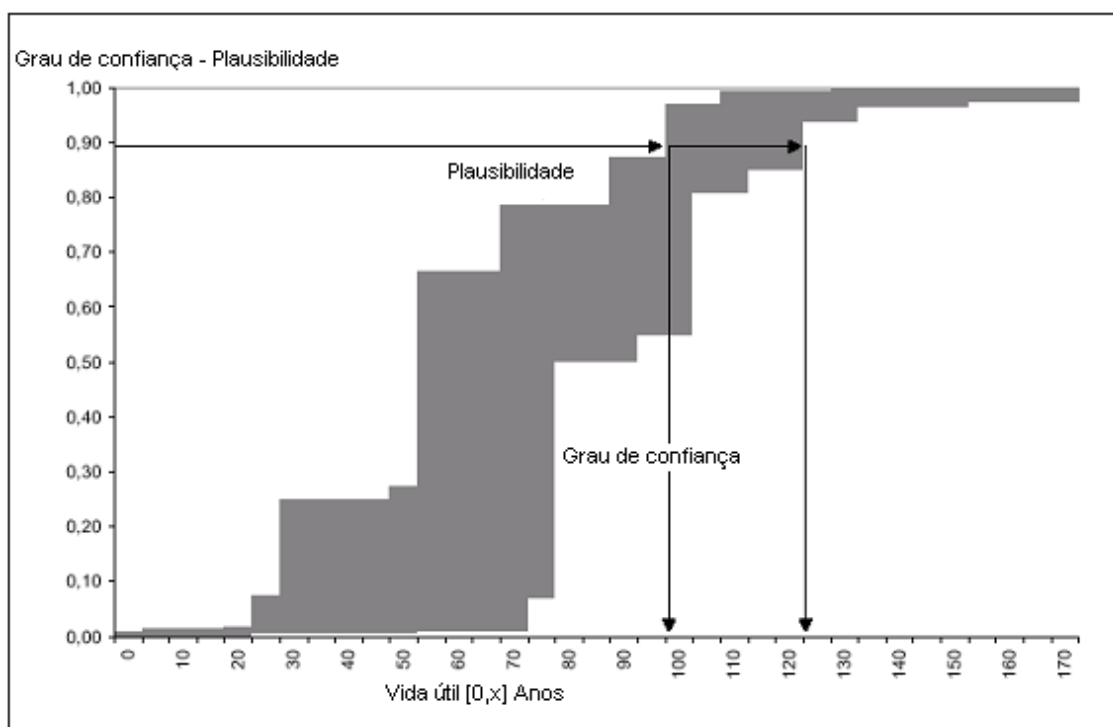


Figura 4.12 - Intervalo de vida útil definido pelas duas abordagens utilizadas por Lair *et al* (adaptado de Hovde e Moser (2004))

Os mesmos autores estudam ainda uma abordagem metodológica para a avaliação de durabilidade, cujos passos principais são:

- Investigação de dados de durabilidade disponíveis e da sua organização numa estrutura de gráfico, seguida pela avaliação do grau de confiança e plausibilidade da distribuição da vida útil.
- *Failure Mode and Effects Analysis*, incluindo uma análise estrutural e funcional, a fim de encontrar todas as potenciais falhas.

O método proposto é uma abordagem multi-modelo e multi-escala: multi-modelo, de modo a ajustar o modelo com o conhecimento possuído e com o objectivo pretendido (modelagem do tempo de vida real de construção, mas não um modelo demasiado complexo e não utilizável); multi-escala por ter em conta as ligações entre as três escalas geométricas, materiais / produtos / construção. Finalmente dá:

- Uma distribuição de vida útil nominal, para os processos normais de desgaste, com correspondentes graus de confiança e plausibilidade;
- Detalhes do projecto e criação de problemas, em fenómenos excepcionais de desgaste, o que poderia levar a uma vida útil mais curta.

Estes e Frangopol (1999)), citados por Hovde e Moser (2004), criaram um modelo para as pontes utilizando os modos de falha. Este estudo propõe uma abordagem de fiabilidade do sistema para otimizar a estratégia de reparação do tempo de vida para pontes rodoviárias. A abordagem é demonstrada através de uma ponte já existente no Estado do Colorado. A ponte é modelada utilizando os modos de falha e é computadorizada a fiabilidade do sistema global da ponte utilizando os modelos de deterioração dependentes do tempo e os “live load models”. As conclusões revelam que a abordagem proposta demonstra potencial real para aplicações práticas, precisa de actualizações frequentes através da inspecção e exige um esforço considerável de investigação para desenvolver a introdução de dados precisos.

Talon *et al* (2006) apresentam um relatório do estado da arte em matéria de investigação e aplicação do FMEA na construção, com o objectivo de descrever o modo como este método se pode integrar e ser aplicado no domínio da construção. Este documento ressalta a utilidade evidente dos métodos FMEA e FMECA e ajuda a fomentar e incentivar futuros desenvolvimentos e novas aplicações desses métodos.

Alguns dos exemplos que se seguem encontram-se compilados nesse relatório.

Carlsson *et al* (2002) descrevem uma metodologia geral para avaliação da durabilidade e vida útil através de ensaios de envelhecimento acelerados. É usado o FMEA como ponto de partida para o planeamento dos ensaios de envelhecimento acelerado. O método inclui várias etapas importantes: a) análise de risco inicial de potenciais modos de falha, com uma lista de verificação de falhas e as suas relações com as propriedades dos materiais, processos de degradação e os factores de acção ambiental; b) ensaio/análise de triagem para previsão de vida útil, incluindo ensaio de triagem, análise das alterações materiais resultantes do envelhecimento e caracterização do microclima; c) previsão de vida útil a partir dos resultados de ensaios de envelhecimento acelerado com modelos matemáticos, ensaios de envelhecimento e avaliação da razoabilidade e validação (ver figura 4.13).

A aplicabilidade da metodologia proposta é demonstrada através da utilização de resultados prévios de um estudo de caso sobre os ensaios de envelhecimento acelerado de superfícies de absorção solar selectivas para produção de água quente para uso doméstico. O trabalho apresentado faz parte do Task 27 “Performance of Solar Façade Components” do IEA *Solar Heating and Cooling Programme*.

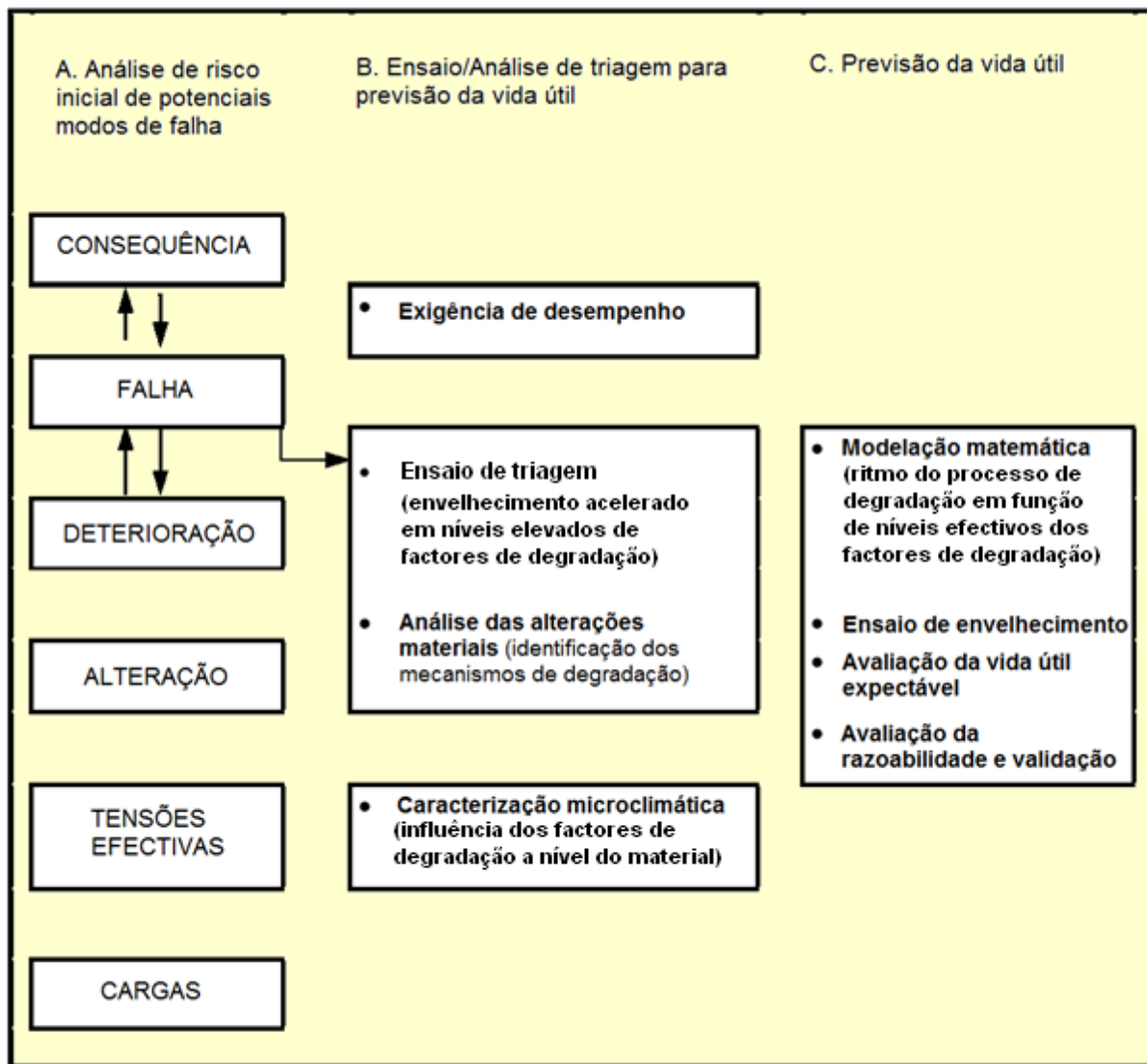


Figura 4.13 - Análise dos Modos de Falha para o planeamento de ensaios de envelhecimento acelerado para previsão da vida útil (adaptado de Carlsson *et al* (2002))

O FMEA tem em consideração as características de desempenho de apenas uma função específica do produto de construção. Por esta razão, Talon *et al* (2005) propõem um método de quantificação temporal de cenários de degradação que permite avaliar os perfis multi-desempenho de produtos de construção durante a sua fase de exploração e, consequentemente, determinar a sua vida útil. Pretende-se que este método seja aplicável a todos os produtos de construção.

Em primeiro lugar, a análise do sistema fornece um modelo funcional do produto de construção. Então, o FMEA permite determinar e capitalizar todo seu potencial de cenários de degradação.

O segundo passo é a quantificação da degradação cinética, ou seja, a pesquisa do período de degradação e a duração dos cenários, aproveitando-se todas as informações disponíveis sobre as curvas do estado de degradação.

Em seguida, selecciona-se e unifica-se uma parte desta informação de várias fontes, para cada fenómeno de degradação do produto de construção estudado. Depois disso, determina-se a duração do cenário de degradação, a partir da duração do fenómeno de degradação.

Em terceiro lugar, avalia-se o desempenho funcional do produto de construção. Começa-se com os cenários de degradação relacionados com a função de uso considerada. A correlação entre os estados de degradação e os níveis de desempenho permite avaliar os perfis multi-desempenho de um produto de construção durante a fase de exploração.

A quantificação temporal e avaliação do perfil de multi-desempenho fornecem a vida útil dos produtos de construção. Por um lado, corresponde ao cenário mais rápido de degradação, por outro lado, corresponde ao tempo até o primeiro limite de desempenho ser atingido.

Na figura 4.14 esquematiza-se, de uma forma mais completa, o processo de formalização da informação dos estados de degradação e, na figura 4.15, visualiza-se a avaliação de um cenário de degradação.

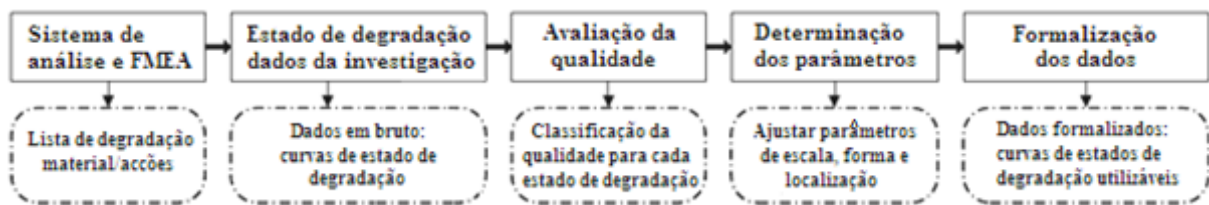
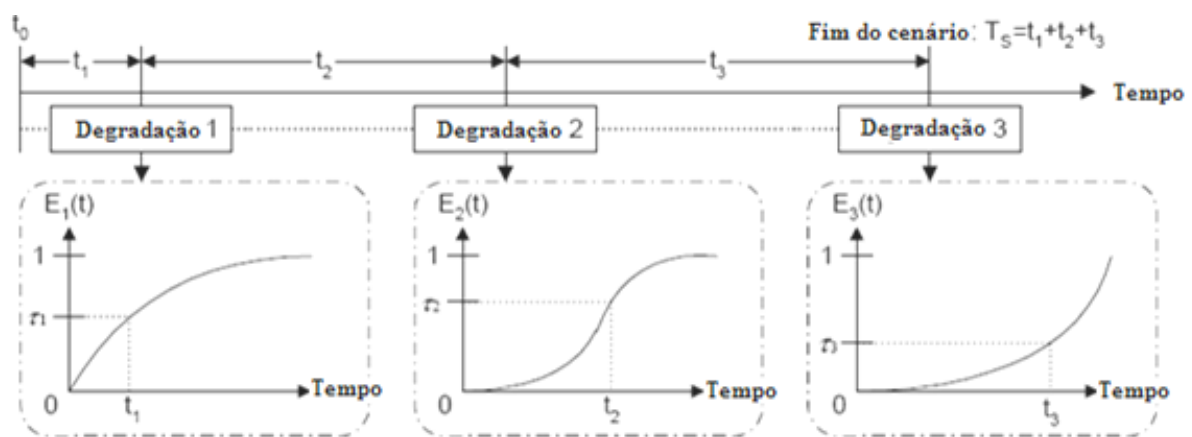


Figura 4.14 – Formalização da informação dos estados de degradação (adaptado de Talon *et al* (2005))



$E_n(t)$ – nível de desempenho (de “0” a “1” com “0” desempenho máximo)

Figura 4.15 – Avaliação de um cenário de degradação (adaptado de Talon *et al* (2005))

Talon *et al* (2008a) propõem uma melhoria da metodologia para avaliar a vida útil de componentes de construção, baseada no conhecimento da evolução dos seus perfis de multi-desempenho (representação de níveis de desempenho das suas funções necessárias e combinações das suas funções necessárias). A metodologia é agora composta por quatro etapas, exemplificadas na figura 4.16, acrescentando uma importante análise quantitativa da criticidade:

1. Análise qualitativa que analisa de forma exaustiva os cenários de possível degradação de um componente de construção;

2. Análise quantitativa aplicada temporalmente, que avalia a vida útil e a probabilidade de ocorrência dos cenários, com base em abordagens de unificação e agregação;
3. Análise quantitativa da criticidade, que ordena por graus de criticidade os cenários, esta fase permite reduzir a aplicação da quarta fase à maioria dos cenários críticos;
4. Análise quantitativa do desempenho que permite obter perfis multi-desempenho de componentes de construção com base no conhecimento da relação entre os estados de degradação dos fenómenos e os níveis de desempenho das funções exigidas.

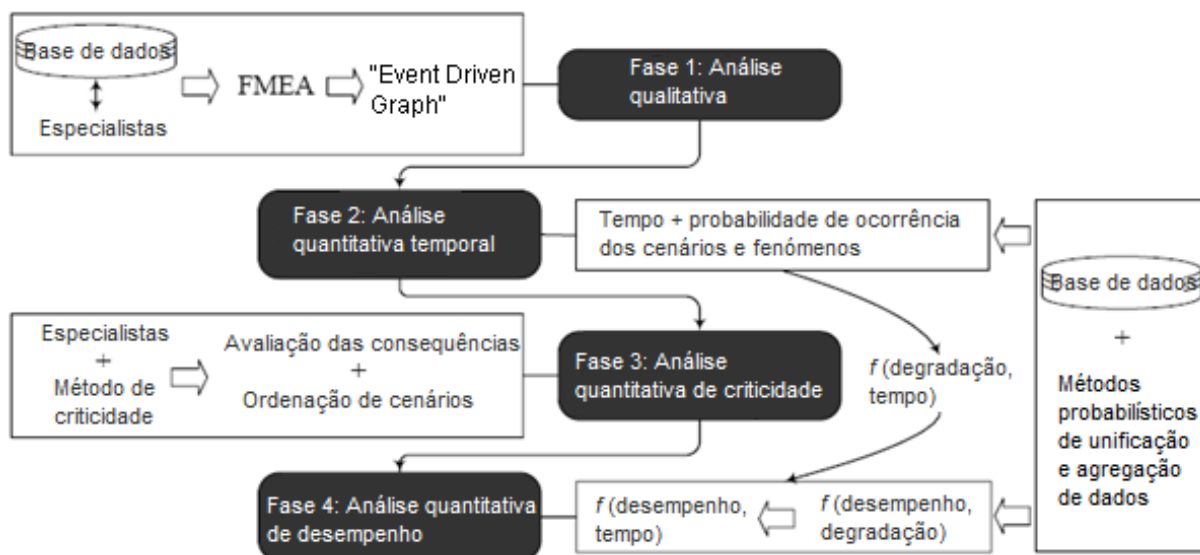


Figura 4.16 - Metodologia de avaliação do perfil de multi-desempenho de todos os componentes de construção em serviço (adaptado de Talon *et al* (2008a))

Foi aplicada esta metodologia ao caso de uma parede de tijolos cobertos por um isolamento complexo, mostrando que a sua aplicação está operacional. As perspectivas essenciais deste estudo são: aplicar esta metodologia a outros estudos de caso a fim de desenvolver uma base de conhecimento que permita a caracterização de todos os componentes do edifício em todos os tipos de ambiente e conduzir a uma análise de sensibilidade da metodologia proposta (Talon *et al* (2008)).

Os exemplos apresentados na literatura sugerem que o método é facilmente adaptável a vários sistemas de construção e demonstra a possibilidade da sua aplicação a todos os sistemas de construção existentes.

Este método apresenta como principal vantagem a sistematização e o carácter metódico de análise dos vários subsistemas, respectivos estados de funcionamento, modos de falha e sequência de efeitos, o que permite uma reflexão fundamentada sobre os meios de detecção, prevenção e de diminuição dos respectivos efeitos.

No entanto, o seu carácter exaustivo constitui a sua principal limitação, pela morosidade e consequentes custos de aplicação. Deve-se ainda ter em conta que o método não está adaptado para ter em conta as falhas dependentes ou resultantes de uma sucessão de acontecimentos. Nestes casos, é necessário utilizar outros métodos e técnicas, tais como a análise de Markov ou a análise através da árvore de falhas (Silva *et al* (2006)).

Hans e Chevalier (2005) desenvolveram uma ferramenta que permite obter informações sobre a vida útil à escala do produto do edifício usando a escala do material, baseada no *Failure Modes and Effect*

Analysis. Usando primeiro a análise estrutural e funcional e depois o FMEA, obtêm-se todos os potenciais cenários de falhas do produto em utilização, inserido no seu ambiente. O “Failure event graph” é mostrado na figura 4.17 para uma melhor exploração dos resultados. Através da utilização deste gráfico pode-se definir para cada cenário, várias fases de degradação que implicam um material sob uma única solicitação.

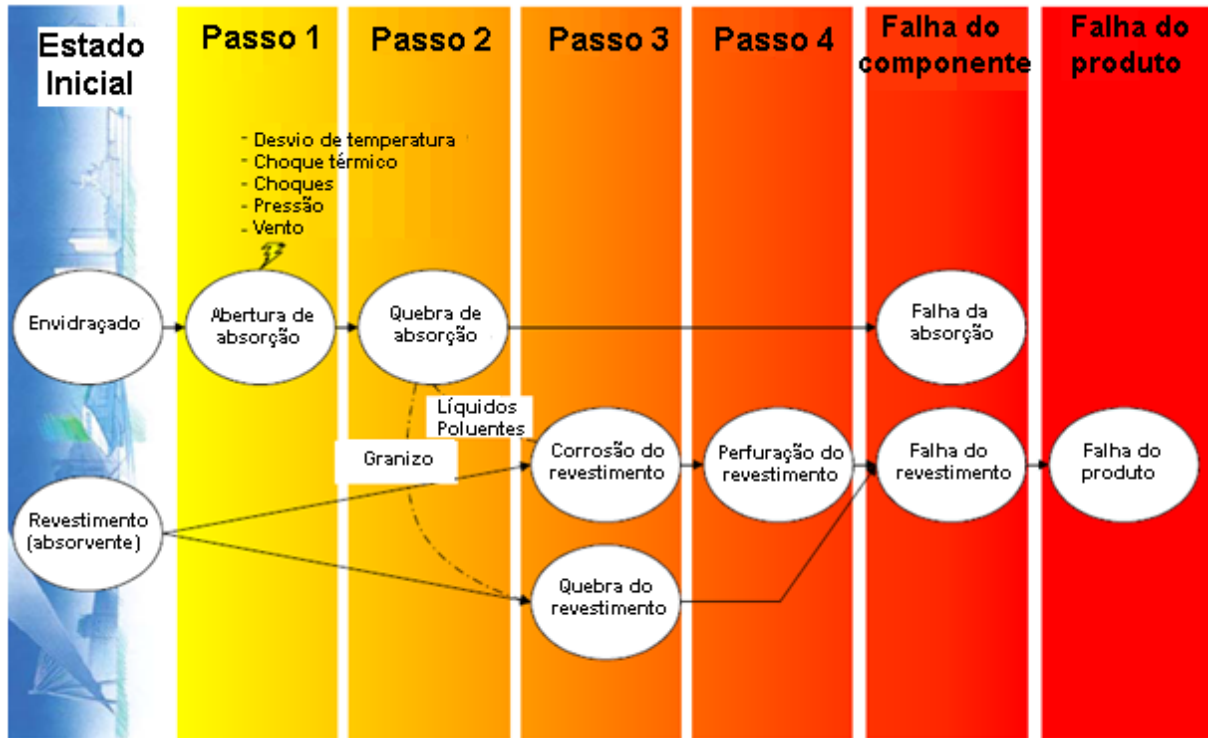


Figura 4.17- “Failure event graph” usado para apresentar o resultado do FMEA para dois componentes (envidraçado e revestimento) de um painel solar (adaptado de Hans e Chevalier (2005))

A determinação da cinética de cada uma destas degradações permite calcular o tempo de vida de cada cenário. Considerando a vida útil de cada cenário, é possível obter a vida útil do produto.

A figura 4.18 ilustra como obter um valor de vida útil para um produto, num estudo de caso específico, à escala do produto (Método Factorial, ISO 15686) e à escala do material (utilização do FMEA).

Esta metodologia pode ser uma sugestão para avaliar a vida útil, caso o Método Factorial não se aplique por falta de dados de VUR ou por desconhecimento dos factores.

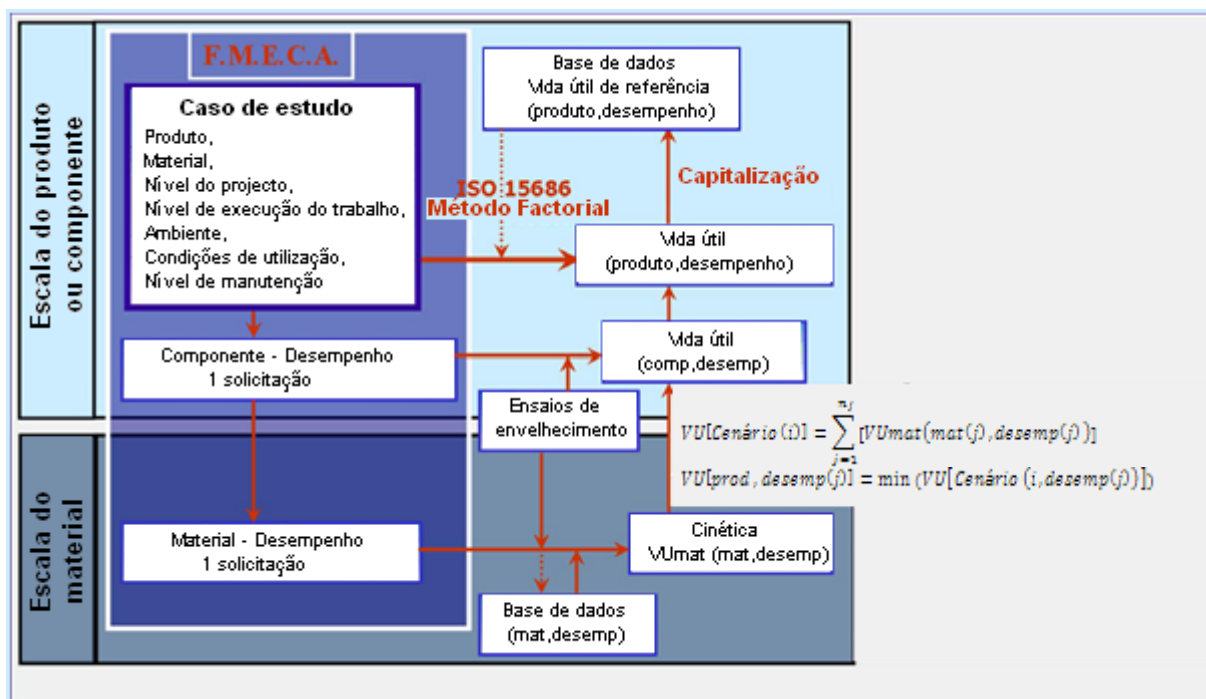


Figura 4.18 - Metodologia de estimativa de vida útil à escala do produto e do material (adaptado de Hans e Chevalier (2005))

Os autores sugerem ainda o conceito de *Intrinsic Reference Service Life* (IRSL). A ideia é usar artificialmente as mesmas “referências intrínsecas em condições de utilização” para todos os valores IRSL. Isto é aplicável, se formos capazes de quantificar o impacto dos factores na vida útil. Quando recolhemos a VUR correspondente à referência em condições de utilização, estamos a calcular um IRSL, correspondente à seguinte equação 4.2, onde A_R , B_R , C_R , D_R , E_R , F_R e G_R são os factores correspondentes à aplicação do Método Factorial de acordo com estes pressupostos:

$$IRSL = \frac{VUR}{A_R \times B_R \times C_R \times D_R \times E_R \times F_R \times G_R} \quad (4.2)$$

Supondo que os factores podem ser quantificados, cada valor de VUR recolhido é capaz de fornecer um valor IRSL.

O interesse em usar o valor IRSL é a eficiência da ferramenta *data fusion*, em todos os IRSL calculados, para obter um CIRSL único em cada produto (*Consolidated Intrinsic Reference Service Life*).

Os conceitos de IRSL e CIRSL são compatíveis com os dados de VUR recomendados pela ISO 15686-8.

O CIRSL pode ser reutilizado para qualquer estudo de caso sobre esse produto e fornece o cálculo da vida útil estimada sem usar um factor de correcção subjectivo.

No entanto, esta metodologia teórica deve ser validada através da aplicação prática.

As ferramentas desenvolvidas (base de dados de VUR, *data fusion*, análise baseada no FMEA e ferramentas associadas) são complementares e fornecem um ganho científico real para a avaliação da vida útil através da utilização do Método Factorial.

Talon *et al* (2006) definem algumas melhorias adicionais para a aplicação do FMEA:

- Utilização de bases de dados para capitalizar o conhecimento e experiência sobre os fenómenos de degradação (dados de entrada do método) e os modos de falha identificados (resultados do método);
- Definição clara das relações entre as escalas (construção, produto, material);
- Introdução de uma descrição mais precisa dos fenómenos de degradação;
- Elaboração de um software, a fim de simplificar e automatizar o processo.

4.4.2.3. Performance Limit Method (PLM)

O *Durability of Building Components Group*, do Politécnico de Milão, desenvolveu um método específico para a previsão da vida útil com base na correlação entre as necessidades dos utilizadores e a deterioração medida das características de desempenho de elementos de construção: *Performance Limit Method* (PLM).

Este método pretende avaliar a durabilidade dos componentes do edifício, através da simulação do seu desempenho ao longo do tempo, até que se atinja o seu limite físico ou de desempenho. Neste método, o fenómeno de degradação é avaliado através de uma cadeia de relação agentes → acções → efeitos → degradação.

Uma vez definida esta relação de degradação para cada componente de uma construção, esta cadeia vai ser essencial para o projectista verificar todos os agentes relevantes e as acções que podem propiciar a degradação e a diminuição do desempenho e adoptar correcções e medidas de protecção para a prevenção do aparecimento de anomalias.

O próximo passo deste modelo é a simulação desta cadeia de evolução juntamente com os requisitos de funcionalidade e de desempenho definidos. Esta fase é geralmente apoiada por dados de ensaios laboratoriais de envelhecimento. Finalizado isto, procede-se à avaliação e determinação da vida útil. Na figura 4.19, está representada de forma esquemática a metodologia adoptada neste modelo.

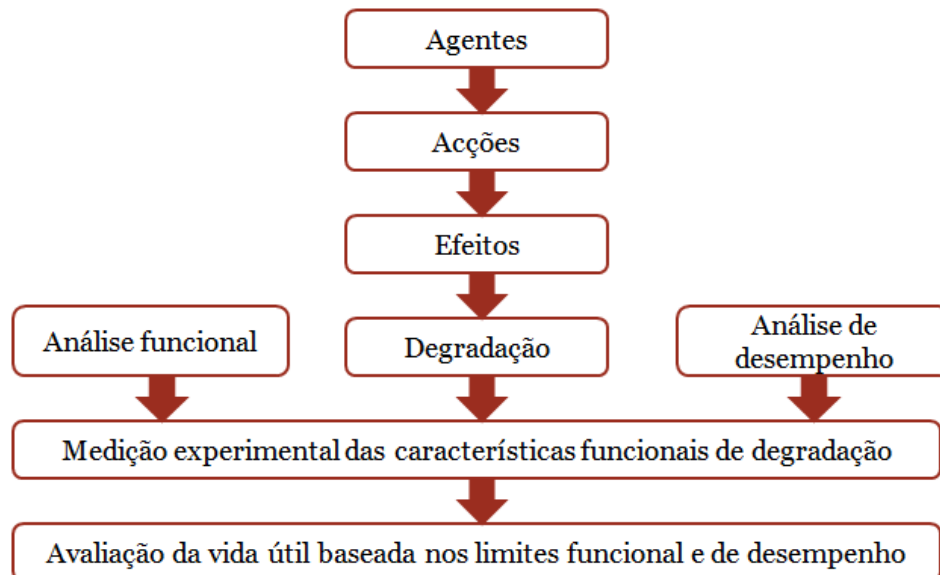


Figura 4.19 - Esquema de análise para avaliação da durabilidade dos componentes de construção (adaptado de Daniotti e Lupica Spagnolo (2008a))

O *Performance Limit Method* consiste então em cinco momentos fundamentais:

- Definição de metas de desempenho;
- Individualização de requisitos e especificações de desempenho que o componente deve cumprir;
- Tradução dessas especificações de desempenho em características técnicas e funcionais;
- Individualização dos valores mínimos de desempenho para a vida útil;
- Avaliação da vida útil.

O estudo lida especificamente com a definição de ferramentas e métodos para controlar a qualidade interior com uma abordagem baseada no desempenho, que analisa a ligação existente entre as necessidades do utilizador e os requisitos tecnológicos. A distribuição de acções de desempenho para os elementos funcionais-tecnológicos é definida através de modelos computacionais que relacionam as condições interiores previstas com as especificações de desempenho tecnológico. A fase de projecto tecnológico tem de ser suportada por métodos de cálculo e por ensaios laboratoriais ou *in situ*. O comportamento da duração dos componentes de construção é simulado usando modelos ambientais dependentes do tempo, graças à correlação entre a deterioração das características de desempenho (medida através de programas de laboratório) e as condições estabelecidas pelos requisitos dos utilizadores.

Os dados de entrada para a modelação são baseados na deterioração das características funcionais medidas através de ensaios de envelhecimento. O método foi aplicado experimentalmente para revestimentos de tinta à base de acrílico e resinas de vinil e mostrou que pode ser uma ajuda válida quando é necessário avaliar a vida útil relacionada com uma deterioração precisa do desempenho (Daniotti e Lupica Spagnolo (2008a)).

À semelhança do método FMEA, este método proporciona uma descrição da evolução da degradação incluindo os seus agentes e mecanismos de uma forma mais simplificada do que os métodos probabilísticos, necessitando de um menor volume de informação e simplificando o processo (Sousa (2008)).

4.4.2.4. Outros conceitos

Gaspar e Brito (2005) apresentam e discutem um modelo de degradação de rebocos correntes. Este modelo define a velocidade da deterioração dos rebocos, em função das condições ambientais, e fornece dados que permitem determinar intervalos de variação para cada um dos índices a considerar no cálculo da vida útil de rebocos exteriores.

Os autores consideram uma classificação visual para a avaliação da deterioração de rebocos correntes, estabelecendo uma tabela de análise constituída por cinco patamares de degradação, desde “0” (sem degradação visível) a “4” (nível de degradação generalizada), tabela 4.5. Nesta tabela, incluem-se todas as manifestações patológicas relevantes para a caracterização dos rebocos e a respectiva extensão de deterioração. O nível 3 de degradação é definido como o estado limite de degradação dos rebocos.

Tabela 4.5 – Classificação visual para avaliação do estado de degradação dos rebocos (Gaspar e Brito (2005))

Nível de degradação	Caracterização das anomalias	Área afectada (%)
Nível 0	- Sem degradação detectável visualmente	< 5
Nível 1- bom	- Manchas superficiais	5-10
	- Eventual presença de fendas capilares	
	- Fendilhação incipiente (visível apenas com lupa)	
Nível 2 – degradação ligeira	- <i>Graffiti</i>	11-30
	- Presença localizada de fungos	
	- Possíveis infiltrações ou sinais incipientes de eflorescências	
Nível 3 – degradação mediana	- Manchas incipientes de humidade	31-50
	- Fendilhação localizada (visível a olho nu)	
	- Cantos ou esquinas danificados	
	- Infiltrações localizadas	
	- Eflorescências	
Nível 4 – degradação generalizada	- Estragos superficiais (na cor ou na textura)	> 50
	- Fendilhação generalizada	
	- Destacamento ou desagregação da superfície	
	- Infiltrações e estragos superficiais generalizados	
	- Elementos metálicos partidos ou corroídos	
	- Perda de aderência entre camadas	
	- Destacamento de placas	

Através do tipo e agressividade do agente de degradação é possível traduzir a deterioração do material de acordo com curvas de degradação. A curva teórica de degradação dos rebocos apresenta um desenvolvimento em ‘S’, podendo ser distinguidas três fases distintas de acordo com a acção dos agentes de degradação ao longo do tempo: iniciação (patologias precoces), maturação e fase terminal.

A determinação da curva de degradação associada aos rebocos aplicados em 150 casos estudados fez-se através de métodos de regressão, a partir de uma nuvem de pontos dispersos, para uma expressão do tipo polinomial do terceiro grau.

Através do conhecimento da curva média de degradação dos rebocos, pode-se estimar a vida útil média deste material, determinando os valores das abcissas em função do valor máximo de degradação admitido.

Do ponto de vista conceptual, a previsão da vida útil de qualquer um dos pontos registados pode ser feita, fazendo passar por cada um deles, uma curva de degradação da família da curva média de degradação de rebocos.

Dada a ausência de soluções na bibliografia sobre o tema, foram testados diversos métodos e discutida a sua viabilidade.

4.4.2.5. Exemplos de aplicação dos Métodos de Engenharia

Moser e Edvardsen (2002) publicaram um artigo intitulado “Engineering Design Methods for Service Life Prediction” demonstrando a aplicação dos métodos de engenharia para três exemplos diferentes. O texto que se segue é baseado na informação disponível nesse documento.

O primeiro exemplo usa os sete factores da norma ISO 15686-1 (2000), com o pressuposto de que as informações para definir as respectivas distribuições estão prontamente disponíveis.

O segundo exemplo é usado apenas quando a informação é limitada. A equação tem que ser modificada e as respectivas distribuições são criadas indirectamente.

O terceiro exemplo é baseado numa equação completamente diferente, que é estabelecida usando o senso comum de engenharia. É normalizada utilizando um resultado médio, calculado com base numa equação baseada numa função de erro.

Exemplo 1: Método de engenharia com base na equação do Método Factorial

Este exemplo demonstra o procedimento básico com a seguinte equação:

$$VUE = VUR \times f_A \times f_B \times f_C \times f_D \times f_E \times f_F \times f_G \quad (4.3)$$

Os factores são:

- f_A : qualidade do material ou componente
- f_B : nível de qualidade do projecto
- f_C : nível de qualidade da execução do trabalho
- f_D : características do ambiente interior
- f_E : características do ambiente exterior
- f_F : características do uso
- f_G : nível de manutenção

Todos os factores são aplicados como indicado, usando quatro distribuições diferentes, a fim de demonstrar a facilidade de aplicação deste Método Factorial ampliado. O exemplo baseia-se no caso de estudo trabalhado para janelas de madeira macia, dado na norma ISO/CD 15686-1 (1997), mas os factores são indexados como na edição de 2000 da norma.

A base do exemplo numérico é um edifício com um comprimento de 50 m, uma largura de 25 metros e uma altura de 30 m. Os lados maiores estão virados para sul e norte, respectivamente. As janelas das quatro fachadas do edifício são tratadas separadamente. As condições relevantes assumidas por todos os factores e as fachadas são apresentadas na tabela 4.6. A partir desta tabela, os factores para os três percentis de 5%, 50% e 95% são definidos de acordo com o método Delphi, com base nos factores e respectiva descrição dada na ISO 15686-1 (2000).

Tabela 4.6 - Valores estimados dos factores para os percentis (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

Factor	Fachada	Condições relevantes	Factores para os percentis 5%/50%/95%
f _A	Todas	Variações gerais dos componentes	1,2 / 1,5 / 1,8
f _B	Todas	Bom, valor idêntico	1,2
f _C	Todas	Variação geral, mas reparação de qualidade insuficiente	1,0 / 1,2 / 1,5
f _D	S	Risco ocasional de condensação	0,9 / 1,0 / 1,2
	W	Risco médio de condensação	0,8 / 0,9 / 1,1
	N	Risco elevado de condensação	0,7 / 0,8 / 0,95
	E	Risco médio de condensação	0,8 / 0,9 / 1,1
f _E	S	Ciclo ocasional seco/húmido	0,8 / 1,0 / 1,3
	W	Ciclo regular seco/húmido	0,6 / 0,8 / 1,0
	N	Protegido da chuva	1,0 / 1,2 / 1,5
	E	Ciclo ocasional seco/húmido	0,8 / 1,0 / 1,3
f _F	S	Acesso ocasional por crianças	0,8 / 1,0 / 1,2
	W	Acesso regular por crianças	0,6 / 0,8 / 1,0
	N	Acesso oc./reg. por crianças	0,7 / 0,9 / 1,1
	E	Acesso ocasional por crianças	0,8 / 1,0 / 1,2
f _G	Todas	Pintado por questões de zelo	0,9 / 1,0 / 1,1

Os valores para os percentis dados na tabela 4.6 são aproximados por funções de densidade dadas na tabela 4.7, para facilidade de processamento. As funções escolhidas representam as geralmente utilizadas: determinística, normal, lognormal e Gumbel (valor extremo). O programa utilizado para o processamento de dados foi o VaP 1.6. As variáveis “m” e “s” são o primeiro e segundo momentos das respectivas distribuições.

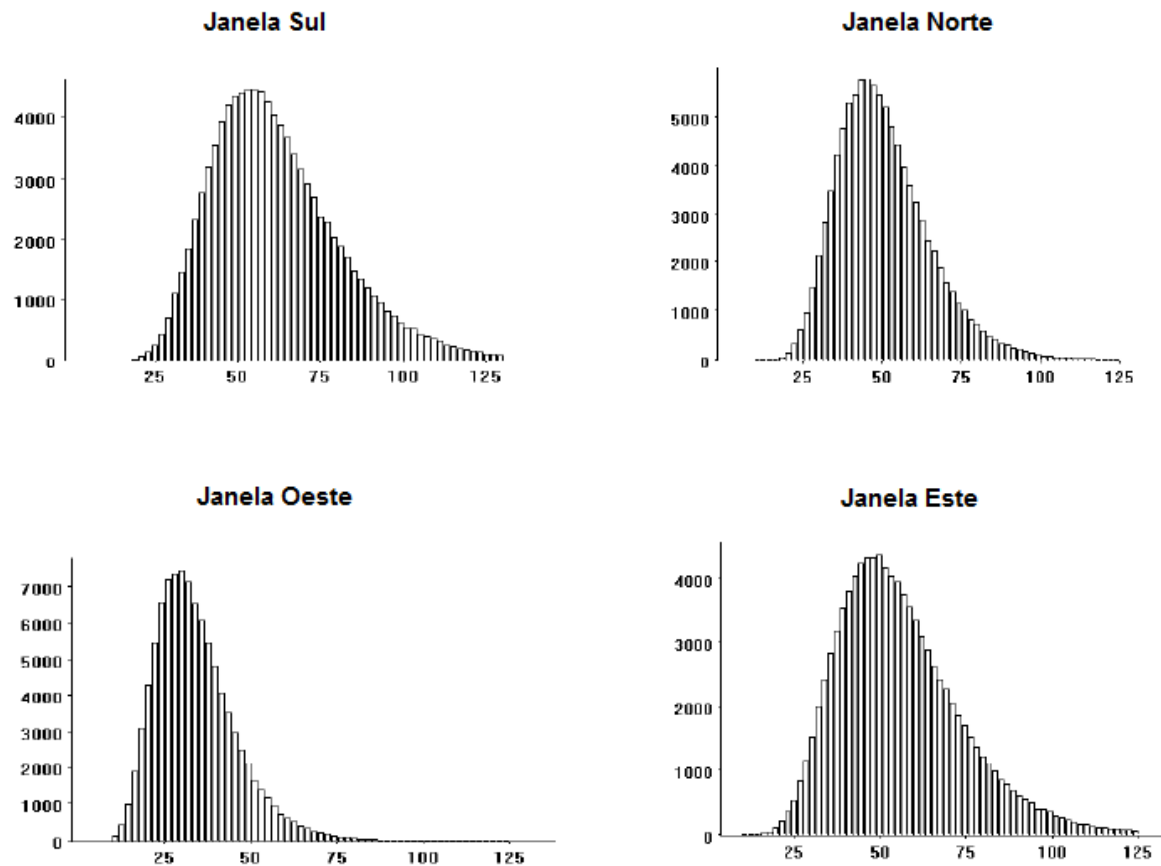
Tabela 4.7- Distribuição da vida útil estimada dos componentes (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

Factor	Tipo de distribuição	Orientação			
		Sul m / s	Oeste m / s	Norte m / s	Este m / s
VUR	Determinística	25 anos	25 anos	25 anos	25 anos
f _A	Normal	1,5 / 0,185	1,5 / 0,185	1,5 / 0,185	1,5 / 0,185
f _B	Determinística	1,20	1,20	1,20	1,20
f _C	Gumbel	1,25 / 0,10	1,25 / 0,10	1,25 / 0,10	1,25 / 0,10
f _D	Lognormal	1,05 / 0,10	0,95 / 0,10	0,80 / 0,10	0,95 / 0,10
f _E	Lognormal	1,05 / 0,20	0,80 / 0,20	1,25 / 0,20	1,05 / 0,20
f _F	Normal	1,0 / 0,12	0,80 / 0,12	0,90 / 0,12	1,0 / 0,12
f _G	Normal	1,0 / 0,06	1,0 / 0,06	1,0 / 0,06	1,0 / 0,06
VUE (anos)	Lognormal	62,0 / 20,4	34,2 / 11,8	50,6 / 14,8	56,1 / 18,6

Os resultados do valor da VUE foram calculados por métodos directos usando o VaP 1.6 e são apresentados na última linha da tabela 4.7. Os resultados médios das duas iterações da simulação de Monte Carlo correspondem ao resultado calculado matematicamente, por uma diferença máxima no valor médio de 0,1 anos. Estas simulações produziram resultados detalhados, mostrados graficamente para cada fachada na figura 4.20. Dividindo as densidades relativas mostradas no eixo vertical pelo número de iterações, neste caso por 100.000, obtém-se a densidade absoluta.

Os resultados para a vida útil estimada das quatro fachadas mostrados na figura 4.20 são diferentes em relação a vários aspectos. Em primeiro lugar, nota-se as diferentes larguras das distribuições, de acordo com os valores (segundos momentos) na figura 4.20. A fachada sul tem a distribuição mais larga e a fachada oeste a mais estreita. Alguns destes efeitos são relativos: devido ao valor médio mais elevado, a mesma largura relativa é maior em anos.

A fachada oeste apresenta uma vida útil mais curta, como esperado para uma localidade temperada do norte, principalmente devido ao clima exterior desfavorável e às condições de utilização. O efeito do aumento do risco de condensação, assumido para o clima interior da fachada norte, é compensado pelo clima mais favorável no exterior. A principal diferença advém das condições de utilização. Ambos os efeitos combinados produzem cerca de 15% a menos de vida útil estimada.



Nota: Densidades resultam de 10^5 iterações da simulação de Monte Carlo

Figura 4.20 - Distribuições de vida útil estimada para todas as orientações (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

Para o planeamento dos recursos de manutenção, as funções para a vida útil das partes semelhantes de uma construção podem ser sobrepostas. Em geral, isso tem que ser feito para todas as partes consideradas de um edifício. Para a sobreposição, os custos têm de ser atribuídos aos diferentes grupos de partes do edifício.

Neste exemplo, a superposição de todas as áreas da janela a ser substituída é executada apenas, de modo a ser capaz de mostrar resultados típicos (assume-se para este efeito, que as janelas cobrem 40% da área das fachadas respectivas.).

A superposição produz uma função assimétrica tendo um aumento acentuado até um pico de exigência de substituição de $48 \text{ m}^2/\text{ano}$ após 37 anos (ver figura 4.21). Em seguida, a exigência diminui num declive suave até $10 \text{ m}^2/\text{ano}$ após 70 anos.

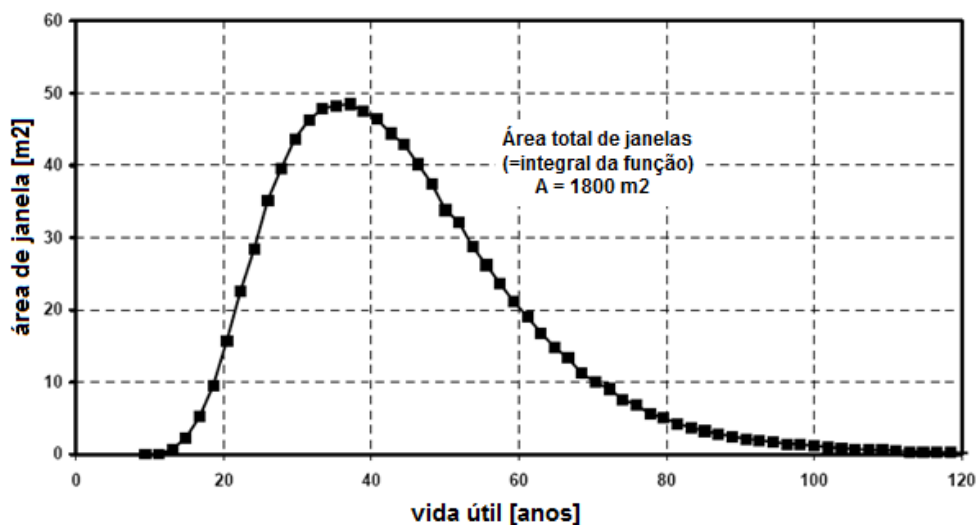


Figura 4.21 - Exigência financeira (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

Numa próxima etapa, as mesmas funções de vida útil podem ser novamente aplicadas para as janelas substituídas e os resultados das várias substituições são somados, conduzindo a uma função de substituição constante.

Em geral, a exigência financeira para partes semelhantes tende a fundir-se em função de um pico. A sobreposição das funções de todas as partes diferentes de um edifício é mais provável resultar em vários picos, ou mesmo numa exigência relativamente constante durante o tempo de vida do edifício considerado, a partir de uma certa idade do edifício.

Exemplo 2: Método de engenharia com base na modificação da equação do método e dados escassos

Este exemplo lida com a vida útil de ardósias de fibrocimento utilizadas como revestimento de parede. Os dados de entrada são bastante escassos, longe de serem completos e não directamente adequados para aplicação no cálculo de vida útil. A base deste cálculo é o Método Factorial, como estabelecido na ISO 15686-1 (2000), modificado para se adequar ao caso. O exemplo mostra que a interpretação dos dados disponíveis limitados pode, no entanto, levar a uma previsão de vida útil coerente e satisfatória.

Os dados disponíveis foram obtidos a partir da experiência do fabricante e são os seguintes:

- A qualidade de produção das ardósias pode ser derivada da resistência à flexão, que se presume ser o valor característico da resistência mecânica. O valor médio “m” encontra-se 20% acima da força necessária e o desvio padrão normalizado é muito pequeno: $v = m/s = 0,015$.
- O nível de qualidade do projecto é baixo, verificando-se que, de todos os projectos, cerca de 10% a 15% são considerados inadequados.
- A qualidade de execução do trabalho está num nível bastante elevado e apenas cerca de 5% são considerados inadequados.
- O ambiente exterior, sob condições normais, resulta na modificação da vida útil indicada na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Vida útil e factores equivalentes para diferentes exposições (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

Exposição	Este	Norte	Oeste	Sul
Diferença na vida útil	± 0 anos	- 2 a -3 anos	-7 a -10 anos	- 5 a -7 anos
Factor equivalente	1,0	0,95	0,85	0,90

Os factores equivalentes acima indicados foram estimados sabendo que a vida útil esperada situa-se algures entre 50 e 60 anos. Foram ainda considerados os seguintes pressupostos:

- As condições de utilização, correspondentes ao factor F, não devem ser consideradas, pois apenas a destruição mecânica directa pode ser uma consequência do uso. Estes casos não têm, no entanto, significado estatístico.
- O nível de manutenção, correspondente ao factor G, não tem de ser considerado, pois basicamente nenhuma manutenção é necessária. As placas são instaladas e não recebem qualquer ou apenas o mínimo de manutenção, ao longo de toda a sua vida útil.

Para o cálculo da vida útil, a seguinte equação é então definida de acordo com o Método Factorial e com os pressupostos acima mencionados:

$$VUE = VUR \times f_A \times f_B \times f_C \times f_E \quad (4.4)$$

A partir dos dados de entrada acima, os seguintes factores médios e desvios padrão, ou primeiro e segundo momentos respectivamente, são derivados da:

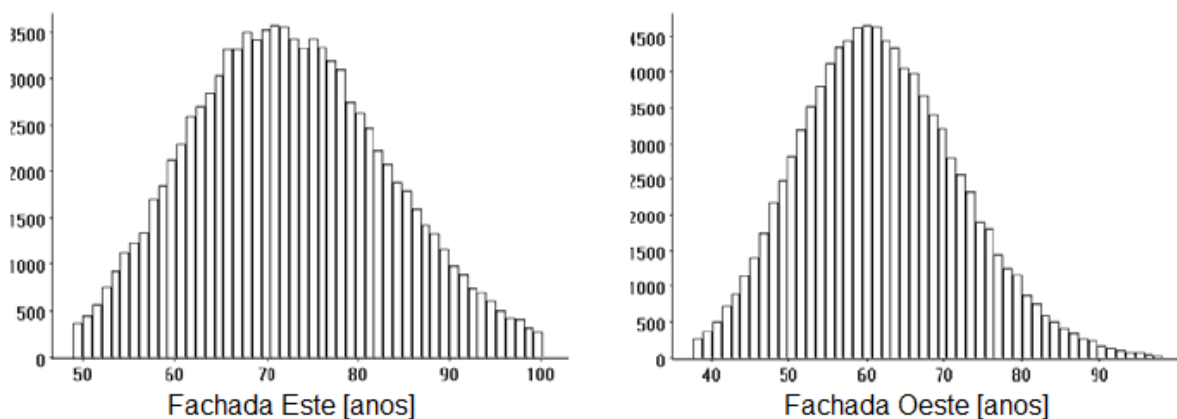
- Distribuição de densidade do factor para a qualidade dos materiais ou componentes que é, em função da resistência mecânica, definida como um valor médio de $f_A = 1,2$. O desvio padrão é, em função do desvio padrão normalizado de produção, definido como $s_A = 0,02$.
- Distribuição de densidade do factor para o nível de qualidade do projecto que é definida como um valor médio de $f_B = 1,1$, com desvio padrão de $s_B = 0,12$, resultando em cerca de 13% dos casos inferiores a 1,0, ou seja, apresentando uma qualidade insuficiente.
- Distribuição de densidade do factor para o nível de qualidade de execução do trabalho, que a partir da experiência assimétrica e de uma distribuição lognormal, é definido por um valor médio (primeiro momento) do $f_C = 1,1$ e um segundo momento de $s_C = 0,06$, resultando em cerca de 5% dos casos inferiores a 1,0, ou seja, insuficiente.
- Distribuição de densidade dos factores para as características do ambiente exterior que é definida para os valores médios de f_E na tabela 4.8 acima. O desvio padrão é, por razões de simplificação, definido como um $s_E = 0,1$ estimado para as quatro exposições.

O cálculo utilizando o programa de cálculo VaP, produz os resultados para a vida útil estimada (VUE), como mostra a tabela 4.9, baseando-se numa VUR de 50 anos (valor determinístico, para efeitos deste exemplo). Partindo do pressuposto, que a degradação para cerca de uma em cada seis das ardósias requer a substituição de todo o revestimento respectivo (ou seja, vida útil estimada para um percentil de cerca de 16% das ardósias degradadas). A vida útil das quatro fachadas é mostrada na tabela seguinte, variando de 61 a 51 anos.

Tabela 4.9 - Vida útil e factores equivalentes para diferentes exposições (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

Exposição	Este	Norte	Oeste	Sul
VUE: valor médio (anos)	72,6	69,0	61,7	65,3
m : desvio padrão (anos)	11,5	11,2	10,5	10,9
VUE - m (16% das ardósias danificadas)	61	58	51	54

As distribuições para a vida útil de duas fachadas são mostradas na figura seguinte:



Nota: Densidades resultam de 10^5 iterações da simulação de Monte Carlo

Figura 4.22 - Distribuições da vida útil estimada para as fachadas Este e Oeste (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

As diferenças na vida útil a partir da experiência podem ser encontradas nos resultados da previsão. Para efeitos de planeamento do investimento, o percentil 16% (ou qualquer outro percentil considerado razoável) parece ser uma boa indicação para o momento de substituição.

Este exemplo demonstra que mesmo baseados em dados de entrada relativamente escassos, é possível uma previsão de vida útil muito sensível.

Exemplo 3: Método de engenharia com base na simplificação do método probabilístico

Este exemplo demonstra que a previsão de vida útil através de uma fórmula relativamente simples, diferente da ISO 15686 (2000), pode ser feita da mesma maneira, novamente através da introdução de densidades para os factores envolvidos.

Este exemplo lida com a penetração de cloreto no betão. É baseado num estudo que utiliza a abordagem probabilística, com base em funções de erro. No estudo, os autores comparam os resultados de cálculos determinísticos e probabilísticos de vida útil de estruturas de betão armado em dois climas (+10°C e +30°C). É determinado o recobrimento necessário para uma vida útil de 50 anos. A penetração de um teor de cloreto de 0,1% da massa de betão armado é assumida como o fim da vida útil.

Em termos de um método de engenharia, é utilizado o procedimento seguinte:

1. O valor médio da profundidade de penetração de cloreto é calculado como $x = 34$ mm, utilizando a equação de difusão para um tempo de 50 anos:

$$c(x, t) = c_s - (c_s - c_0)(1 - \operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right]) \quad (4.5)$$

Onde,

c - teor de cloretos, c_s – teor de cloretos na face externa e c_0 – teor de cloretos inicial no betão. A frente de penetração é definida pelo valor crítico $c = c_{crit} = 0,1\%$ da massa de betão.

2. A equação de difusão simplificada é criada para a profundidade x de penetração de cloreto. Por isso, todas as constantes da equação de difusão são arredondadas para cima numa única constante K :

$$x \approx K(c_s - c_{crit} - c_0)\sqrt{D} \quad (4.6)$$

3. A constante K é calculada resolvendo a equação para o valor médio x . Usando o valor médio de 34 mm, resulta num $K = 38 \cdot 10^3 [s^{0.5}/wt.\%]$.

Tabela 4.10 - Valores utilizados para os cálculos de difusão (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

Variável		Distribuição	Valor médio	Desvio padrão
Teor de cloreto na face externa	c_s	Lognormal	1,0 [wt-%]	0,3 [wt-%]
Teor de cloreto crítico	c_{crit}	Normal	0,1 [wt-%]	0,025 [wt-%]
Teor de cloreto inicial	c_0	Normal	0,01 [wt-%]	0,002 [wt-%]
Coeficiente de difusão do cloreto (10°C)	D_1	Normal	$1,0 \cdot 10^{-12} [m^2/s]$	$0,1 \cdot 10^{-12} [m^2/s]$
Coeficiente de difusão do cloreto (30°C)	D_2	Normal	$4,0 \cdot 10^{-12} [m^2/s]$	$0,4 \cdot 10^{-12} [m^2/s]$

A equação agora, usando as distribuições, é:

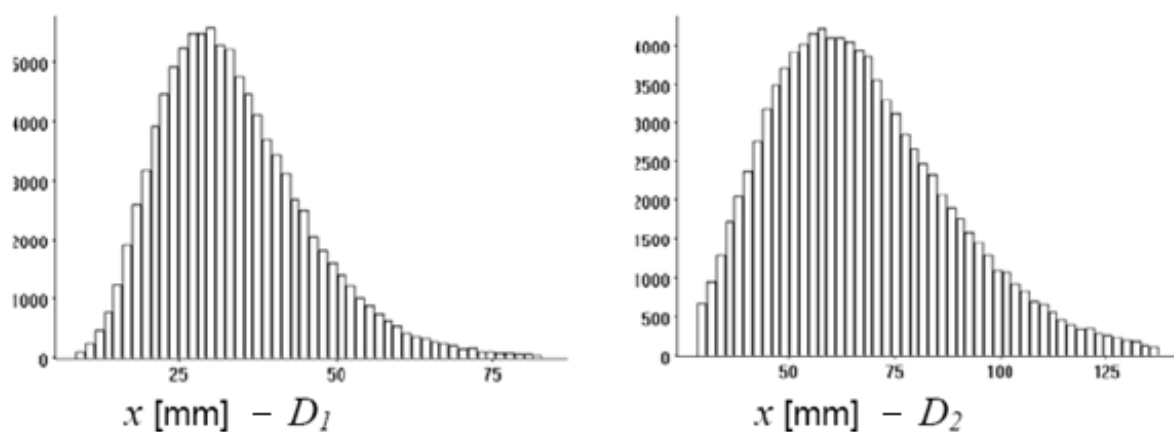
$$x = 38 \cdot 10^3 (c_s - c_{crit} - c_0) \sqrt{D} [\sqrt{s}/\%massa] \quad (4.7)$$

Resolvendo esta equação e usando as mesmas distribuições de densidade utilizadas na solução probabilística detalhada (tabela 4.10), obtêm-se resultados como os que se observam na figura 4.23. A ligeira assimetria da distribuição de densidade resultante é negligenciada por desvios de padrão.

A probabilidade de ultrapassar o teor crítico c_{crit} é definida para 10% em Edvardsen e Mohr (2000). Assumindo uma distribuição normal, o valor do percentil de 90% é obtido adicionando o desvio padrão $\lambda = 1,28$ à média: $x_{90} = \bar{x} + \lambda s$. Estes resultados são também mostrados na figura 4.23 e são comparados com os valores exactos do estudo original. Os valores médios são idênticos, bem como o desvio padrão da constante de difusão D_1 . Para a constante de difusão D_2 , o valor do percentil desta previsão ultrapassa o valor exacto em cerca de 5%.

Esta precisão é considerada para satisfazer as necessidades do cliente, tendo em conta que todos os valores de entrada, apesar de serem configurados como distribuições, ainda não são completamente exactos.

Constante de difusão	Valor médio	Desvio padrão	Valor do percentil de 90%	
			Método de engenharia	Edvardsen and Mohr (2000)
D_1	34 mm	12 mm	49 mm	49 mm
D_2	68 mm	23 mm	97 mm	91 mm



Nota: Densidades resultam de 10^5 iterações da simulação de Monte Carlo

Figura 4.23 - Distribuições de densidade para a profundidade de penetração de cloreto (adaptado de Moser e Edvardsen (2002))

5

MÉTODO FACTORIAL MELHORADO

5.1. FRAGILIDADES DO MÉTODO FACTORIAL DA ISO 15686

O Método Factorial, embora bastante utilizado, apresenta algumas limitações, como o facto de assumir um ritmo de degradação constante para os materiais, o que não se verifica na realidade, de não ter em conta a sinergia existente entre os vários factores e, ainda, de atribuir igual cotação aos diferentes factores modificadores, podendo uns ter uma influência mais significativa sobre a durabilidade de determinado produto do que outros. Estes inconvenientes podem ser ultrapassados com a produção de bases de dados que contribuam para a optimização do método.

Gaspar (2002), citado por Lopes (2009), refere que o Método Factorial é criticado por diversos autores por não ser um método sensível à incerteza associada à variabilidade dos fenómenos que ocorrem nos processos de degradação. De facto, pela aplicação deste método, obtém-se apenas um valor absoluto (expresso em anos) que representa o limite expectável da vida útil do elemento analisado, mas não informa da possível dispersão de resultados, não tem em conta a sinergia existente entre os diversos factores, nem o nível de risco associado ao resultado obtido. Tal decorre de diversos factores, entre os quais se destacam:

- Utilização dos factores modificadores como variáveis absolutas, o que pressupõe uma certa constância no ritmo de degradação, contrária ao que se verifica na realidade;
- Utilização apenas de operações de multiplicação como forma de relacionar os factores;
- A não hierarquização das variáveis, como distinção das que mais poderão afectar a vida útil do elemento e da sua velocidade de actuação;
- Por fim, note-se que, no estado actual do conhecimento, a determinação dos factores é feita sobretudo de forma empírica, o que pode introduzir pequenas variações ao nível da sua quantificação que se traduzem em grandes diferenças de resultado final (decorrentes da multiplicação de factores), não expressa na apresentação de resultados.

À semelhança de outros métodos para a estimativa da vida útil, alguns destes aspectos só poderão ser colmatados com a produção de grandes bases de dados que validem os resultados obtidos.

Nicolella e De Pascale (2005) afirmam que a vantagem do Método Factorial é que analisa tudo o que é susceptível de contribuir para variações na vida útil seja analisado e ao mesmo tempo na importância relativa com que considera essas variações.

Por outro lado, esta condição representa uma desvantagem, porque todos os elementos na fórmula têm o mesmo peso sobre a degradação do elemento de construção considerado.

Quando a degradação é afectada por uma combinação de factores, mesmo uma variação pequena dos factores a partir do caso de referência leva a uma variação substancial da estimativa de vida útil.

Além disso, a situação em que muitos factores são diferentes de “um” é muito frequente, porque eles representam o desvio de muitos aspectos diferentes, a partir das condições assumidas, que por vezes têm uma influência muito distinta sobre a degradação do mesmo elemento de construção. Factores como o nível de manutenção, a qualidade da execução do trabalho ou o nível do projecto são difíceis de gerir e de transformar num valor numérico equivalente.

Também é importante notar que muitos agentes relevantes, como agentes climáticos ou atmosféricos, são agrupados num único factor global (ambiente externo), mas a sua influência (por exemplo, vento, radiação solar, chuva, temperatura, poluição, etc.) é muitas vezes tão diferente e heterogénea que não permite esse tipo de aproximação.

Outro ponto importante é a atribuição dos valores numéricos aos factores. Esta operação é muito subjectiva e arbitrária - na verdade, na mesma situação, dois projectistas diferentes, sem indicações específicas ou valores limite ou um intervalo definido de variação dos valores, podem dar resultados muito diferentes.

Uma observação semelhante diz respeito à determinação do VUR. Na verdade, o método propõe muitas soluções e muitas maneiras de determinação, que mostram importância e fiabilidade diferentes e não são homogéneos. O projectista pode definir o valor de referência, que é o elemento mais importante da fórmula, com base em dados fornecidos por várias informações disponíveis.

Assim, é possível afirmar que o Método Factorial não fornece uma garantia de uma vida útil, apenas apresenta uma estimativa com base em informações disponíveis, a fiabilidade depende portanto, da precisão dos dados de entrada.

Da literatura sobre o Método Factorial, sugerem-se algumas pistas de desenvolvimento no sentido de permitir incorporar a variabilidade da realidade, das quais se destacam as seguintes alterações:

- Aumento do número de factores na equação base, distinguindo as particularidades dos casos estudados;
- Distinção hierárquica entre factores;
- Identificação de novas formas de combinação de factores (novas operações, na equação base e subequações por factor);
- Introdução dos níveis de risco ou incerteza relacionados com os factores;
- Introdução de factores dependentes de observações de campo;
- Criação de bases de dados fiáveis de vidas úteis de referência.

5.2. REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA ARTE

Há um crescente interesse no Método Factorial e na necessidade de instrumentos práticos para a previsão da vida útil.

As soluções práticas de previsão de vida útil têm que ser baseadas num bom conhecimento em campo, mas também numa boa estratégia de trabalho, para garantir que os cenários de projectos diferentes possam ser comparados de forma padronizada e estruturada. O Método Factorial é uma ferramenta promissora para essa avaliação e comparação, mas ainda há muito trabalho a fazer para estabelecer os dados de entrada necessários para a vida útil de referência e para os valores dos factores e para introduzir o Método Factorial na fase de projecto.

De modo a combater todas as falhas associadas à simples aplicação do Método Factorial, vários estudos têm sido feitos e diversos autores têm publicado o resultado de alguns desses estudos.

Hovde (2005) expõe alguns exemplos gerais de como escolher valores apropriados para cada um dos factores do Método Factorial. No seu estudo são apresentadas algumas tabelas que ilustram uma série de valores e em que circunstâncias diferentes podem ser escolhidos. As tabelas mostram as condições gerais para a selecção dos valores dos factores, bem como a base para uma selecção mais específica dos valores do factor A (qualidade do material ou componente) e E (características do ambiente exterior).

Estas foram desenvolvidas com base no conhecimento existente e podem ser aperfeiçoadas no futuro fundamentando-se em novas experiências. Cada valor pode estar relacionado com as condições específicas de cada um dos factores. Se o utilizador do Método Factorial tem informações mais específicas para um ou mais dos factores, será possível seleccionar um valor do factor de interpolação entre os dois valores mais próximos dados. A aplicação de tais valores, previamente definidos para cada um dos factores também será uma boa base para avaliação da importância de cada factor e um apoio importante para a compreensão da aplicabilidade, limitações e utilização prática do Método Factorial.

No entanto, o sistema de selecção dos valores dos factores é muito geral. Pode ser um primeiro sistema bruto para a aplicação em todos os tipos de materiais e componentes dos edifícios, mas a aplicação prática do sistema pode revelar que será necessário melhorá-lo para atender a diferentes tipos de materiais ou componentes e esses valores têm de ser verificados e ajustados.

Grande parte da discussão e crítica do Método Factorial tem sido relacionada com o facto de ser necessário seleccionar um valor específico para cada um dos factores, e a multiplicação de todos os factores tornar o valor da vida útil estimada (VUE) muito sensível a pequenas variações do valor de cada factor.

Os estudos do Método Factorial têm provado que é necessário dispor de procedimentos simples para a selecção dos factores. Um aspecto importante é, então, a relação com a vida de projecto. Um edifício pode ter uma vida útil de 60, 100, 150 ou até mesmo um número ilimitado de anos, e não ser possível prever as condições futuras de tais edifícios em detalhe. Para a estimativa de vida útil de um material ou componente com uma vida de projecto relativamente curta, é importante ser capaz de obter um valor o mais correcto possível sobre o número real de anos. Para uma maior vida de projecto, no entanto, haverá sempre uma série de incertezas, e não é necessário estimar o tempo de vida para o próximo ano ou até 5 a 10 anos. Portanto, alguns valores gerais para a selecção de cada um dos factores devem ser desenvolvidos e serão uma escolha prática dos valores aplicáveis.

Re Cecconi e Iacono (2005) apresentam resultados de uma pesquisa desenvolvida no Politécnico de Milão que teve como objectivo dar uma abordagem técnica rigorosa para o desenvolvimento do Método Factorial, de modo a evitar a excessiva subjectividade durante a fase de atribuição dos valores correctos para cada factor. Nesse estudo é sugerida uma nova abordagem para avaliar o valor do factor A (qualidade do material ou componente) que é aplicada a um estudo de caso de telhas de cerâmica, para explicar melhor as diferentes etapas que constituem o desenvolvimento do procedimento.

A ideia é dividir cada factor em subfactores e criar grelhas de avaliação úteis para os utilizadores avaliarem o valor de cada subfactor. Desta forma a avaliação de um valor implica um processo dividido em duas etapas distintas: construção e utilização de grelhas. A primeira etapa, caracterizada pela alta subjectividade, pode ser feita para diferentes classes de componentes (materiais) por peritos

ou mesmo pelos fabricantes. A segunda etapa pode ser feita pelo próprio utilizador, mesmo que não tenha muita experiência na previsão de vida útil.

Os autores fazem ainda uma análise de sensibilidade sobre as grelhas para destacar qual dos subfactores influencia mais o resultado final e realizam uma análise de risco (utilizando a Técnica de Monte Carlo) para avaliar os riscos relacionados a erros na construção das grelhas.

Vejamos então, um pouco mais pormenorizadamente, o procedimento feito segundo esta abordagem.

A primeira fase da pesquisa foi finalizada definindo as ferramentas para a avaliação do factor A (qualidade do material ou componente), resultado de uma análise detalhada de todas as partes que constituem o elemento de construção.

O procedimento desenvolvido passa pela análise funcional dos elementos técnicos e componentes de trabalho, a individualização dos factores capazes de influenciar a sua vida útil e a comparação com componentes semelhantes, cujo desempenho é conhecido, com o objectivo de fornecer uma avaliação mais objectiva.

As etapas que constituem o procedimento para estimar a vida útil dos componentes de construção, utilizando a proposta do método de avaliação para o factor A, são as seguintes:

- Organização racional da informação preliminar;
- Análise dos agentes-acções-efeitos;
- Individualização dos subfactores;
- Procura de padrões com métodos para medir as características;
- Criação de grelhas de avaliação para o componente de referência;
- Atribuição de pesos aos subfactores;
- Atribuição de valores para o componente de projecto;
- Cálculo do factor A.

Estas etapas são descritas resumidamente em seguida.

Organização racional da informação preliminar - Primeiro, o trabalho de construção tem que ser separado com um sistema de classificação de árvore, em sistemas e subsistemas, para individualizar a qualquer momento (e em forma unívoca e racional), todos os elementos constitutivos do próprio edifício.

Análise dos agentes-acções-efeitos - A análise consiste na individualização de todos os agentes de degradação possíveis, a que o componente irá provavelmente ser submetido durante a sua vida útil, em seguida, na identificação das acções relacionadas que esses agentes irão desenvolver e, finalmente, na definição de todas as falhas possíveis e plausíveis.

Nesta fase, deve ser prestada atenção para identificar todos os agentes que mais afectam a vida útil do componente de construção, não negligenciando os agentes caracterizados por baixa intensidade, mas com um carácter cíclico e/ou duração que podem tornar os seus efeitos críticos ao longo do tempo.

Individualização dos subfactores - Uma ou mais características (que mais influenciam a vida útil do componente em condições de referência) estão associadas a cada efeito. Estas características, se mensuráveis na fase de projecto com métodos padronizados, levam à definição de um subfactor.

Procura de padrões com métodos para medir as características - Neste ponto, é necessário para cada subfactor um sistema de avaliação. Este método deve ser sempre válido para componentes do mesmo tipo e deverá, eventualmente, ser baseado no desempenho. Melhores resultados serão

alcançados se o método fornecer uma escala de avaliação (através de “classes de desempenho”), e não apenas as especificações de desempenho mínimo.

Criação de grelhas de avaliação para o componente de referência - Esta etapa é a mais complicada do procedimento proposto e, por isso, deve ser feita por especialistas; desejavelmente, os próprios fabricantes devem fornecer grelhas de avaliação dentro da documentação técnica do produto. As grelhas de avaliação são apenas funções, recebendo como dados de entrada as classes de desempenho encontradas nas normas e retornando valores específicos.

Todas as grelhas de avaliação são caracterizadas pelo facto de:

- O valor zero é associado à classe de desempenho em condições de referência;
- Todas elas contêm funções monótonas (crescente ou decrescente), com grau igual ou superior a um;
- O conjunto de valores vai (convencionalmente) de um mínimo de “-5” a um máximo de “+5”.

A figura 5.1 mostra um exemplo de grelha de avaliação. Podem ser observados três pontos fixos (“-5” e “+5” para as classes de desempenho extremas e “0” para a classe de referência) e a falta de linearidade da função.

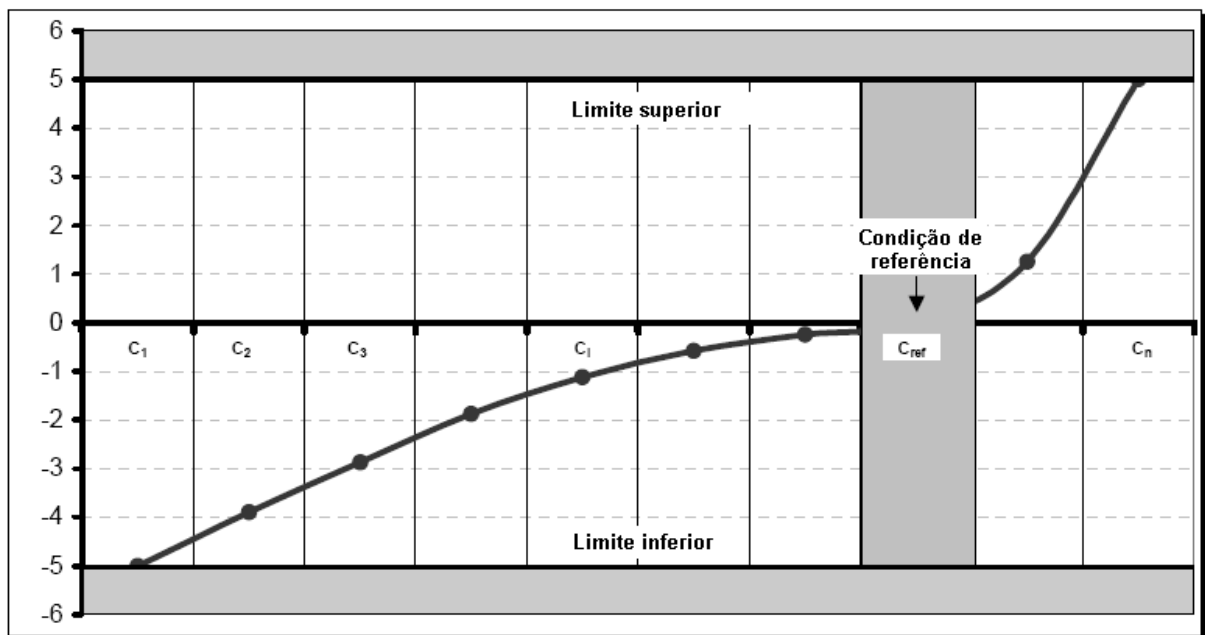


Figura 5.1 - Exemplo de grelha de avaliação: classes de desempenho e valores relacionados (Re Cecconi e Iacono (2005))

Atribuição de pesos aos subfactores - Uma vez definidos os “n” subfactores baseados nas considerações acima, é possível avaliar a importância relativa de cada característica em relação às outras. As comparações entre o desempenho, nesta etapa, representam escolhas de projecto precisas; a prioridade de um subfactor por outro lado é determinada a cada momento pelo projectista.

Este método envolve a compilação de uma matriz, chamada “one-to-one comparison matrix” (ver figura 5.2), com o objectivo de comparar a importância de cada subfactor em relação ao número total de subfactores.

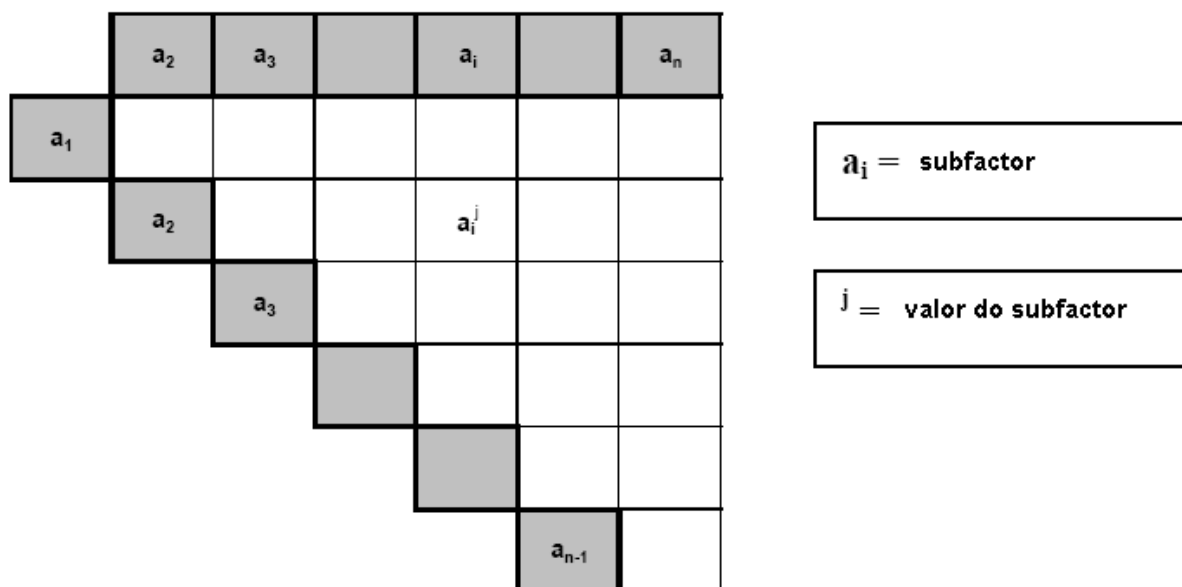


Figura 5.2 – “one-to-one comparison matrix” (Re Cecconi e Iacono (2005))

As comparações entre os subfactors a_n e a_m podem envolver cinco resultados possíveis:

- a_n^3 Alta prioridade de a_n sobre a_m ;
- a_n^2 Prioridade de a_n sobre a_m ;
- $a_n^1 a_m^1$ Equivalência entre a_n sobre a_m ;
- a_m^2 Prioridade de a_m sobre a_n ;
- a_m^3 Alta prioridade de a_m sobre a_n .

Somando os valores obtidos para cada subfactor, pode ser definida uma classificação provisória de importância. Esta será mais tarde normalizada numa escala de 1-10.

Atribuição de valores para o componente de projecto - Neste ponto é necessário reconsiderar os mesmos padrões utilizados para criar as escalas de avaliação, com o objectivo de avaliar o componente de projecto. Para isso, todas as especificações de desempenho do componente são atribuídas a uma classe entre as escalas de avaliação criadas anteriormente, obtendo o valor relacionado ao subfactor específico.

Para cada subfactor três casos são possíveis:

- $V > 0$: O componente de projecto proporciona um desempenho melhor do que o do componente de referência;
- $V = 0$: O componente de projecto proporciona um desempenho semelhante ao do componente de referência;
- $V < 0$: O componente de projecto proporciona um desempenho pior do que o do componente de referência.

Cálculo do factor A – É então possível obter o factor A, através de uma média ponderada dos vários valores V_i obtidos a partir da avaliação de desempenho e usando os pesos W_i deduzidos anteriormente.

A fórmula é a seguinte:

$$\textbf{Factor A} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (5.1)$$

Onde,

V = valor; W = peso; n = número de subfactores

Após o cálculo do factor A, é necessária uma última conversão, deslocando a saída de 0 (condição de referência actual) para 1 (condição clássica de referência para o Método Factorial).

O método de conversão é baseado na suposição de que a atribuição de valores para os factores pode ser razoavelmente variável entre um mínimo de 0,8 até um máximo de 1,2, convertendo a escala de -5 a 5 em 0,8 a 1,2. É então possível obter, finalmente, o factor A de acordo com o Método Factorial.

Azzalin *et al* (2005) referem a utilização de um software, denominado *BenchMat* que gere bases de dados diferentes e desenvolve, para cada material e soluções tecnológicas, vários níveis de controlo, aos quais é possível conectar uma escala de valores a serem utilizados na aplicação do Método Factorial.

Os componentes do *software* contemplam:

- Critérios de gestão para a aquisição dos dados técnicos fornecidos pelos produtores, de modo a igualar as características e desempenho dos produtos e ser possível avaliar e comparar os resultados de tal avaliação;
- *Ranking* dos produtos, materiais, fabrico de formas e componentes de acordo com as suas características físicas e mecânicas;
- Procedimento de avaliação dos materiais simples e compostos, de acordo com os níveis de desempenho acumulado, definindo os índices de mérito relacionados com as vinte características “relevantes” com que cada desempenho é comparado: cinco características mecânicas, cinco características físicas, cinco características técnicas e cinco características tecnológicas;
- Realização de um registo do caso de soluções técnicas que são frequentes nas unidades tecnológicas investigadas (paredes e telhados planos);
- Conversão das avaliações em pesos para serem associadas ao factor A. A operacionalidade de todo o programa baseia-se no menu principal, que é utilizado para gerir tarefas diferentes e para criar diagramas comparativos entre os diferentes materiais e/ou componentes.

A experimentação relacionada com a adequação do Método Factorial, numa fase inicial, diz respeito apenas ao factor A. Depois disso, investigações específicas destinaram-se a constituir um corpo de conhecimentos para os outros factores, para ser utilizado dentro do processo de estimativa da vida útil, a saber:

Factor B (Nível de qualidade do projecto) – Os procedimentos de avaliação padronizados que foram utilizados por muitos anos, foram introduzidos na rotina de acordo com três categorias de requisitos: controlo, segurança e protecção. Foram produzidas programações sintéticas que dão a definição, descrição, critérios de avaliação e as referências normativas. A avaliação é expressa baseando-se nos resultados das várias avaliações.

Factor C (Nível de qualidade de execução) - A definição do intervalo de valores sobre este factor segue a avaliação da presença/ausência de certificações dentro de um sistema de qualidade. As variáveis consideradas são: a qualificação do processo e os operadores, atingindo realmente o desempenho estabelecido na fase de projecto.

Factor D (Ambiente interior) - Está a ser estudada a possibilidade de determinar os métodos, meios e instrumentos para verificar, de uma forma metódica, se e até que ponto os níveis qualitativos considerados ideais correspondem ao desempenho real fornecido. O objectivo é realizar *check-lists* do projecto que expresse uma sequência de desempenhos mínimos que a construção deve ter. Os factores microclimáticos identificados são: controle da ventilação, da humidade relativa, da temperatura.

Factor E (Ambiente exterior) - A acção dos agentes agressivos acontece sempre de uma maneira combinada diferente, pois a deterioração não depende de uma única acção, mas de uma sinergia de acções agressivas. A partir do conhecimento sobre o assunto, a avaliação é efectuada com base na avaliação da sensibilidade dos materiais e componentes, quer para vários factores de perturbação ou de agentes agressivos, quer com base na presença/ausência de um factor de inconveniência em determinado contexto específico da intervenção. O método de avaliação *BenchMat* sugerido define, com excepção de casos muito específicos, a aplicação do valor “1” a este factor como o cenário de contexto, que já foi avaliado com o procedimento utilizado para o Factor A.

Factor F (Características do uso) – Definir o intervalo de valores relativos a este factor depende de uma análise cuidadosa das implicações relacionadas com a condição de utilização e com a flexibilidade.

Factor G (Nível de manutenção) - A localização do intervalo de valores deste factor depende do planeamento definitivo das operações de manutenção, dos níveis qualitativos, das avaliações de viabilidade, das compatibilidades técnicas das operações estimadas e do aparecimento de condições inesperadas em relação à manutenção planeada da construção.

Nicolella e De Pascale (2005) analisam de forma crítica o Método Factorial e apresentam um método semelhante ao Método Factorial, denominado Método NIC, desenvolvido pelo professor Nicolella no Departamento de Engenharia de Construção da Universidade de Nápoles Federico II, para a avaliação dos comportamentos em serviço de elementos de construção.

São analisados os traços comuns e, principalmente, as diferenças entre os dois métodos.

A ênfase é posta na comparação entre os valores de referência de ambos os métodos, vida útil de referência e *mid-normal value* (média estatística dos dados extraídos do estudo de algumas amostras de edifícios) e na avaliação experimental do *mid-normal value*, quando é adoptado o Método NIC.

Em relação aos factores modificadores, destaca-se o facto de que no Método NIC, em oposição ao Método Factorial, os agentes de influência considerados referem-se a uma deterioração natural com o tempo dos componentes. Além disso, os agentes de influência são redefinidos e variam entre si e os factores têm diferentes graus de relevância, na fórmula do método, de acordo com a sua influência real na deterioração do mesmo componente.

O Método NIC assenta no pressuposto de que a vida útil de um componente de construção pode ser estimada em cada contexto ambiental, determinando a peculiaridade do caso como um desvio de um *mid-normal value* (ou valor de referência), obtido numa base experimental.

O método oferece a possibilidade de expressar o desempenho do componente considerado nas condições específicas do estudo de caso, no que diz respeito às condições de assumir-se como um caso comum, sendo tomado como valor de referência.

A fórmula no qual o método é baseado, que representa analiticamente esta condição, é a seguinte:

$$D_{pp} = D_{mn} \times \prod F_i \quad (5.2)$$

Onde:

Dpp é o valor da “duração mais provável”, correspondendo à fiabilidade do componente de construção considerado na condição assumida de utilização;

Dmn é o “*mid-normal value*” da duração, ou seja, a fiabilidade do componente de construção considerado em condições especiais, assumido como “*mid-normal*”;

Fi são os factores modificadores que, numa fase preliminar, estão associados a cada grupo de agentes que influenciam a vida útil do componente de construção considerado.

Ou seja, o valor Dmn de um componente de construção específico é a média estatística dos dados extraídos do estudo de algumas amostras de edifícios. Estes edifícios são seleccionados segundo critérios específicos e associados na base de condições semelhantes, assumidas como condições “*mid-normal*”.

Os critérios adoptados de escolha são os seguintes:

- qualidade e quantidade das informações disponíveis;
- possibilidade de realizar actividades de monitorização;
- características das operações de manutenção anteriores;
- homogeneidade dos agentes de influência.

Uma vez definido o *mid-normal value*, o ponto crucial do método é a determinação dos factores modificadores (Fi), derivados de agentes de influência.

No que respeita à avaliação dos factores modificadores, é importante considerar os agentes que influenciam a fiabilidade e definir para esses agentes as respectivas condições de variação, a fim de avaliar a duração mais provável de cada componente do edifício.

Um aspecto muito importante é que o agente de degradação considerado, que afecta a vida útil, é apenas uma referência a um envelhecimento natural com o tempo e não a um envelhecimento patológico. Assim, os factores modificadores do Método NIC são definidos apenas para os agentes climáticos e ambientais e para problemas de configuração e tecnologia específica do elemento de construção em causa, ver tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Conjunto de agentes de influência (adaptado de Nicolella e De Pascale (2005))

Agentes climáticos	Agentes ambientais	Agentes de configuração	Agentes tecnológicos
Temperatura	Exposição	Características da fachada:	
ΔT diário	Frente marítima		
Vento	Poluição	Rugosidade e cor	Presença de elementos protegidos
Chuva	Envolvido por construções	Forma	Pontos críticos
Neve		Extensão	
Humidade	Vibrações	Implantação	

Para estes agentes, não se define um único valor global, é dado um valor e um peso relativo; este peso pode mudar com a natureza dos elementos de construção em causa.

Factores como o nível de manutenção, a qualidade da execução do trabalho ou condições de utilização são difíceis de gerir e transformar num valor numérico equivalente. Os seus efeitos sobre um elemento de construção conduzem a um envelhecimento patológico que é difícil de estimar e definir. Considera-se apenas alguns agentes importantes e a sua escolha, com pesos relativos, que variam de acordo com a natureza do elemento de construção em causa.

Outro aspecto importante é a determinação das condições mencionadas de variação para os agentes que afectam a vida útil.

Após a definição das condições de variação para todos os agentes considerados por elemento escolhido, o passo seguinte é a identificação dos factores modificadores, que traduzem em números o desvio de comportamento do caso em estudo a partir duma referência. Os factores modificadores representam a diferença entre a condição relevante para o caso *mid-normal* e as condições do caso em estudo.

Em resumo, as diferenças mais importantes entre o Método Factorial e o Método NIC são as seguintes:

- a natureza do valor de referência (VUR e Dmn);
- a escolha dos agentes causadores de degradação;
- o peso dos diferentes agentes de degradação no que se refere à influência sobre a vida útil;
- a origem e as formas de determinação do valor numérico dos factores modificadores.

Na tabela seguinte são comparadas as principais diferenças existentes entre estes dois métodos.

Tabela 5.2 – Principais diferenças entre o Método Factorial e o Método NIC (adaptado de Nicolella e De Pascale (2005))

	Método Factorial	Método NIC
VUR / Dmn	Dados provenientes de informação disponível (por parte dos produtores, fabricantes, projectistas), experiência anterior ou de observação de construção semelhante, pesquisas técnicas ou códigos de construção	Média dos dados recolhidos em campo em condições similares e homogéneas
Agentes causadores de deterioração: natureza	Todos os agentes que afectam a vida útil e os mesmos agentes para todos os componentes e materiais	Apenas os agentes que produzem um envelhecimento natural com o tempo
Agentes causadores de deterioração: peso	O mesmo peso para todos os agentes	Cada agente tem um diferente peso para diferentes componentes de construção
Factores modificadores	Valor numérico escolhido pelos projectistas	Valores prefixados de acordo com a metodologia de previsão de vida útil (empírico e/ou experimental)

6

ABORDAGEM ESTOCÁSTICA PARA O MÉTODO FACTORIAL. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

6.1 PRINCÍPIO “STEP-BY-STEP”

Aarseth e Hovde (1999) propuseram um método semi-determinístico, designado pelos autores por “step-by-step”, utilizando o Método Factorial mas acrescentando um parâmetro de incerteza aos seus factores.

O contexto conceptual na descrição original do princípio “step-by-step” é o planeamento do projecto. O princípio “step-by-step” baseia-se no “Successivprincippet”, que foi desenvolvido por Lichtenberg (1990) na Dinamarca no início dos anos 70. O princípio “step-by-step” foi desenvolvido numa universidade da Noruega como uma ferramenta para melhorar a qualidade da base para decisões no planeamento do projecto sob incerteza. Tal como acontece com a estimativa de vida útil, um problema básico de planeamento de projecto, numa fase precoce, é a falta de informações relevantes.

Este procedimento oferece um suporte ao processo de documentação de base para decisões em conformidade com a filosofia moderna de gestão da qualidade. O objectivo da implementação de uma abordagem sistemática para o planeamento sob incerteza é normalmente melhorar o benefício económico do projecto. Isto é conseguido através da melhoria da base para tomada de decisões e melhoria do controlo e gestão do projecto, centrando-se sobre a situação em que as decisões são tomadas. A utilização prática do princípio “step-by-step” demonstrou que esse plano é realista e relevante.

No princípio “step-by-step” é identificada e estimada a incerteza para cada elemento durante o cálculo. Assim, este princípio identifica os elementos mais incertos. Esses elementos podem, então, se possível, ser divididos em subelementos e/ou mais informações obtidas, a fim de reduzir a incerteza.

Este princípio fornece uma abordagem mais sistemática para o processo de estimativa e torna possível um tratamento estocástico dos factores. Ao contrário do Método Factorial proposto na ISO, as estimativas são expressas em anos, em vez de números próximos de 1. Estas alterações ajudam a ver as consequências dos valores adoptados durante o processo de estimativa. Depois de um cálculo estatístico, a vida útil estimada é expressa em três números: o valor mais/menos esperado e o desvio-padrão.

De modo a obter uma boa representação estatística das estimativas triplas, é usada uma função de densidade de Erlang (Aarseth e Hovde (1999), Hovde e Moser (2004)).

6.2 PRINCIPAIS ETAPAS NO PRINCÍPIO “STEP-BY-STEP”

As principais etapas no princípio “step-by-step” são descritas por Klakegg (1994), citado por Aarseth e Hovde (1999), como mostrado na figura 6.1.

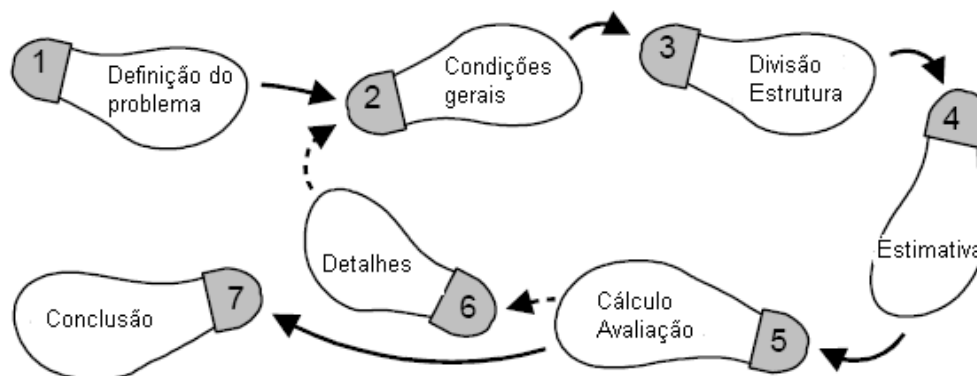


Figura 6.1 - Fases do processo de iteração no princípio “step-by-step” (adaptado de Aarseth e Hovde (1999))

6.2.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Antes do processo de planeamento poder começar, deve ser definido o projecto e a abordagem para o problema. Isso é importante para garantir um trabalho de projecto eficiente, sem perturbar as discussões sobre questões irrelevantes. Para ajudar e esclarecer a fase de definição, um mapa da situação pode ser desenhado. Esse mapa deve destacar os elementos essenciais do projecto, tais como: a clareza do objectivo, a aceitação do objectivo, a organização, as condições de mercado, a inovação, a complexidade, o tamanho, a duração. Quando se estima a vida útil, outros elementos poderão ser mais relevantes. Esta poderia ser uma lista de factores que afectam a vida útil.

6.2.2 CONDIÇÕES GERAIS

Este é um ponto muito importante no princípio “step-by-step”. Todos os factores externos e internos susceptíveis de influenciar o próprio projecto, bem como a execução do projecto, devem ser destacados. Isso deve ser feito normalmente em duas etapas distintas:

1. *Brainstorm*: identificar todas as condições de relevância;
2. Seleccionar e avaliar/considerar as condições específicas importantes.

No Método Factorial proposto na ISO, os factores destinam-se a cobrir todas as condições que afectam a vida útil, incluindo “condições gerais” e os efeitos de sinergia.

As “condições gerais” e as sinergias podem ser numerosas e difíceis de explicar, de forma razoável e correcta. O efeito total das contribuições assumidas para cada factor também pode ser bastante arbitrário e difícil de prever.

6.2.3 DIVISÃO, ESTRUTURA

O projecto deve ser dividido em partes separadas, independentes, apropriadas para o projecto individual. No primeiro passo do ciclo “step-by-step”, a divisão pode ser um pouco grosseira. Nos

passos seguintes (se necessário) uma ou mais partes/grupos podem ser divididos em subgrupos, até que a divisão seja satisfatória (isto explica porque é usada a expressão “step-by-step”).

6.2.4 ESTIMATIVA TRIPLA

A qualidade das estimativas de custos/tempo de consumo, etc., é um passo crucial no princípio “step-by-step”. Três valores devem ser estimados e, de preferência, na seguinte ordem:

1. A estimativa mínima (o percentil 1%);
2. A estimativa máxima (o percentil 99%);
3. A estimativa (mais) esperada, não necessariamente o valor estatístico esperado (ver figura 6.2).

Ao focar as estimativas extremas em primeiro lugar, elas serão conservadoras e mais realistas. Demasiada importância na estimativa esperada pode gerar estimativas muito estreitas e definitivas. Extensos valores exteriores irão garantir:

- Uma ampla gama de valores estimados que irão conter o “valor real”, mesmo se este for bastante diferente da estimativa mais esperada;
- Risco baixo de incerteza escondida.

As estimativas de boa qualidade podem ser alcançadas através de uma avaliação de todos os dados de entrada. Um grupo de pessoas (grupo de pesquisa) faz estimativas individuais. Após uma discussão, os três valores são fixos para cada factor a estimar. Este processo de grupo vai dar elementos individuais de pessimismo ou optimismo. Opiniões do grupo de pesquisa podem ser utilizadas para melhores estimativas do valor mais esperado.

Bourke e Davies (1996), citados por Aarseth e Hovde (1999), afirmam que para uso prático do Método Factorial, a precisão e a variedade dos factores devem ser consideradas, por exemplo, por um painel de peritos para materiais individuais.

6.2.5 CÁLCULO

A típica estimativa tripla formará uma função de densidade probabilidade como mostra a figura 6.2.



Figura 6.2 – Função de densidade “Erlang” (adaptado de Aarseth e Hovde (1999))

A função de densidade “Erlang”, com $k = 10$ é aplicada no princípio “step-by-step”, que é assumida para dar uma representação estatística razoavelmente boa das estimativas triplas. O valor esperado estatisticamente, f , e o desvio-padrão, s , podem ser calculados a partir da seguinte equação:

$$f = \frac{l+2,95 \cdot m+h}{4,95} \quad ; \quad s = \frac{h-l}{4,6} \quad (6.1)$$

Onde

l = estimativa mínima (baixa)

m = estimativa esperada (média)

h = estimativa máxima (alta)

Quando o plano/projecto é dividido em partes adequadas e são feitas estimativas triplas para cada parte, todo o plano deve ser cuidadosamente calculado. Foi desenvolvido um *software* especial para esta finalidade.

6.2.6 DETALHES E ITERAÇÃO

Normalmente será necessário fazer uma ou mais iterações se o plano for muito grosseiro. Alguns dos elementos podem ter de ser divididos em pequenos subelementos que são mais claramente definidos. Isto pode permitir uma melhor estimativa tripla.

6.2.7 CONCLUSÃO E TRABALHO COMPLEMENTAR

Se a análise anterior é realizada de forma sistemática e bem documentada, informações muito importantes para as actividades futuras serão recolhidas. Esta é a informação para o planeamento de manutenção, gestão da qualidade do projecto e execução do trabalho.

Dois aspectos importantes do princípio “step-by-step” podem ser úteis para o processo de estimativa de vida útil:

1. Os factores são tratados como variáveis estocásticas. A incerteza de cada factor é avaliada.
2. Todas as condições que influenciam a vida útil podem ser identificadas e quantificadas de forma mais sistemática.

6.3 MUDANÇAS EM RELAÇÃO AO MÉTODO FACTORIAL DA ISO

O tratamento estatístico no princípio “step-by-step” é baseado numa estrutura onde cada elemento de custo ou factor pode ser assumido independente. No método factorial da ISO há, normalmente, fortes interacções entre os factores. A forma como esses efeitos são tidos em conta no método factorial dá resultados que são difíceis de prever.

Um dos principais problemas do Método Factorial diz respeito à utilização dos factores, porém:

- É difícil encontrar ou calcular um número preciso razoável para os factores de modificação;
- É difícil avaliar as consequências de cada factor em vida útil/anos e devem ser feitos cálculos de conversão;
- O efeito de multiplicar os factores é difícil de prever.

Os dois últimos pontos tentam ser resolvidos com a aplicação do princípio “step-by-step”, expressando a estimativa em anos e somando as estimativas para cada factor, em vez de multiplicá-los, o que é muito mais perceptível.

Se as estimativas são expressas directamente em anos, será mais fácil ver o seu efeito. As estimativas devem ser feitas em relação ao VUR, nomeadamente o número de anos que as condições dadas foram consideradas para reduzir e/ou prolongar a vida útil. Finalmente, as estimativas de “l”, “m”, e “h” podem ser somadas de modo a encontrar a VUE e a incerteza total (ver tabela 6.1). Após esta mudança, os factores devem ser designados elementos. A fim de evitar misturar os dois métodos, o método modificado será chamado o método dos elementos.

6.4 EXEMPLOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO

6.4.1 EXEMPLO 1

Aarseth e Hovde (1999) utilizam o exemplo mostrado na norma ISO/CD 15686-1 de estimativa da vida útil de uma janela de madeira macia, para mostrar a aplicação deste princípio. As condições importantes que influenciam cada factor modificador estão listadas numa matriz. A sua contribuição para a vida útil é dividida em: baixa, média e boa, correspondendo aos valores padrão para os factores modificadores de 0,8; 1,0 e 1,2, respectivamente. No exemplo, a VUR é de 25 anos, e os sete factores modificadores são 1,2; 1,2; 1,2; 1; 1,2; 1 e 1,2.

6.4.1.1 Cálculo da VUE de acordo com o Método Factorial ISO

$VUE = 25 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,2 \times 1 \times 1 \times 1,2 = 62,2$ anos. No exemplo ISO, o resultado é arredondado para 60 anos.

6.4.1.2 Cálculo da VUE de acordo com o princípio “step-by-step”; o método dos elementos

Os factores do exemplo da ISO são transformados em anos em relação à VUR de 25 anos. O “m” estimado corresponde aos factores no exemplo acima, e obtém-se multiplicando os factores (entre 1,0-1,2) pela VUR e, em seguida, subtraindo a VUR $((25 \times 1,2) - 25 = 5$ e $(25 \times 1,0) - 25 = 0$).

O “l” estimado é obtido subtraindo $(0,2 \times 25 = 5$ anos) a partir do “m” estimado. O “h” estimado é obtido através da adição de 5 anos ao “m” estimado. Uma adição mais moderada, por exemplo, 2,5 anos seria mais realista. No entanto, optando por um intervalo simétrico de ± 5 anos, os exemplos serão mais comparáveis.

Apesar de se utilizar a densidade de “Erlang” na aplicação do princípio “step-by-step”, na prática os autores adoptam valores simétricos de “l” e “h”. Para maior simplicidade, nos exemplos de aplicação que se seguem, a abordagem será a mesma.

Tabela 6.1 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step” (adaptado de Aarseth e Hovde (1999))

			Estimativas		
Factores			l	m	h
A	Material ou componente	1,2	0	5	10
B	Projecto	1,2	0	5	10
C	Execução	1,2	0	5	10
D	Ambiente Interior	1	-5	0	5
E	Ambiente exterior	1,2	0	5	10
F	Características do uso	1	-5	0	5
G	Nível de Manutenção	1,2	0	5	10
soma l,m,h =			-10	25	60
VUR =			25 anos		

			Cálculo estatístico	
Factores			$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente		5	2,17
B	Projecto		5	2,17
C	Execução		5	2,17
D	Ambiente Interior		0	2,17
E	Ambiente exterior		5	2,17
F	Características do uso		0	2,17
G	Nível de Manutenção		5	2,17
soma f =			25	
raiz(somaquad) =				5,8
VUR + soma f =			50	
			VUE = 50 anos	
			+/- 6 anos	

A tabela 6.1 mostra as estimativas feitas e como é calculada a VUE para o caso de estudo. A VUE é 50 anos $\pm$ 6 anos ($\pm$ 1 desvio-padrão ou $\pm$ 12%).

Para todos os exemplos que se seguem será usada a mesma analogia e o mesmo valor de incerteza de 20%, no entanto este valor poderia ser ajustado consoante a situação e diferir de factor para factor, o que seria mais realista e adaptado às condições de referência. Para tal, seriam necessárias análises mais rigorosas e o estudo presente visa apenas demonstrar a aplicabilidade deste método.

6.4.2 EXEMPLO 2

Lopes (2009) aplica o Método Factorial para estimar a vida útil de um revestimento cerâmico aderente aplicado num projecto em várias situações distintas. De modo a salientar a influência de um factor apenas sobre o resultado da vida útil estimada, optou por apresentar um projecto com várias condições equivalentes.

Tendo em conta que a estimativa do tempo de vida útil das construções, integrada na fase de projecto, actualmente apenas se verifica nos projectos de edifícios para os quais se pretende uma elevada qualidade global, optou-se por considerar, nestes casos em estudo, o índice mais favorável para os três factores do grupo qualidade. Assim, será aplicado ao índice da qualidade do projecto (factor B) e ao nível de qualidade da execução (factor C) o valor 1,2. Quanto ao índice da qualidade do produto (factor A), reflectirá nesse índice a qualidade dos ladrilhos adoptados em projecto.

Relativamente à vida de projecto do edifício, considerou-se uma duração de 60 anos visto ser o mínimo recomendável para o tipo de edifícios avaliados.

O projecto X localiza-se em Espinho e o projecto Y localiza-se em Loulé e encontra-se nas mesmas circunstâncias do anterior, com as mesmas características dos produtos utilizados.

A situação S1 difere da situação S2, na cerâmica aplicada na fachada, sendo a da segunda situação de qualidade inferior.

Nas tabelas 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 encontram-se os índices dos factores modificadores aplicáveis no Método Factorial para cada projecto nas diferentes situações.

Tabela 6.2 – Projecto X: índices aplicáveis aos factores modificadores para a situação S1 (Lopes (2009))

Factor modificador	Condições para situação 1	Índice aplicável	Índice médio respectivo
Factor A1	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,2	1,15
Factor A2	$E \leq 0,5\%$	1,2	
Factor A3	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,2	
Factor A4	Cimento-cola tipo C2S	1,0	1,2
Factor B1	Projecto de assentamento de cerâmica detalhado	1,2	
Factor B2	Suporte com acabamento cuidado	1,2	
Factor C1	Mão-de-obra especializada e experiente	1,2	1,2
Factor C2	Técnico residente e fiscalização regular	1,2	
Factor C3	Bom tempo e temperaturas amenas Protecção da fachada a revestir com toldos para evitar a exposição a luz directa do sol	1,2	
Factor D	Não aplicável	1,0	1,0
Factor E1	Orientação Sul (S)	0,8	1,03
Factor E2	Sistema exposto ao sol	1,0	
Factor E3	Coeficiente de absorção radiação solar = 0,5	1,0	
Factor E4	Radiação entre 145 Kcal/cm ² e 150 Kcal/cm ²	1,0	
Factor E5	$E \leq 0,5\%$	1,2	
Factor E6	Nº dias de geada inferior a 25	1,2	1,0
Factor F	Local com uso público ou privado	1,0	
Factor G1	Manutenção preventiva a cada 5 anos	1,2	
Factor G2	Edifícios com mais de 2 pisos	0,8	

Tabela 6.3 – Projecto X: índices aplicáveis aos factores modificadores para a situação S2 (Lopes (2009))

Factor modificador	Condições para situação 2	Índice aplicável	Índice médio respectivo
Factor A1	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,2	1,1
Factor A2	$0,5\% < E \leq 3\%$	1,0	
Factor A3	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,2	
Factor A4	Cimento-cola tipo C2S	1,0	
Factor B1	Projecto de assentamento de cerâmica detalhado	1,2	1,2
Factor B2	Suporte com acabamento cuidado	1,2	
Factor C1	Mão-de-obra especializada e experiente	1,2	1,2
Factor C2	Técnico residente e fiscalização regular	1,2	
	Bom tempo e temperaturas amenas		
Factor C3	Protecção da fachada a revestir com toldos para evitar a exposição a luz directa do sol	1,2	
Factor D	Não aplicável	1,0	1,0
Factor E1	Orientação Sul (S)	0,8	1,0
Factor E2	Sistema exposto ao sol	1,0	
Factor E3	Coeficiente de absorção radiação solar = 0,5	1,0	
Factor E4	Radiação entre 145 Kcal/cm ² e 150 Kcal/cm ²	1,0	
Factor E5	$0,5\% < E \leq 3\%$	1,0	
Factor E6	Nº dias de geada inferior a 25	1,2	
Factor F	Local com uso público ou privado	1,0	1,0
Factor G1	Manutenção preventiva a cada 5 anos	1,2	1,0
Factor G2	Edifícios com mais de 2 pisos	0,8	

Tabela 6.4 – Projecto Y: índices aplicáveis aos factores modificadores para a situação S1 (Lopes (2009))

Factor modificador	Condições para situação 1	Índice aplicável	Índice médio respectivo
Factor A1	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,2	1,15
Factor A2	$E \leq 0,5\%$	1,2	
Factor A3	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,2	
Factor A4	Cimento-cola tipo C2S	1,0	1,2
Factor B1	Projecto de assentamento de cerâmica detalhado	1,2	
Factor B2	Suporte com acabamento cuidado	1,2	
Factor C1	Mão-de-obra especializada e experiente	1,2	1,2
Factor C2	Técnico residente e fiscalização regular	1,2	
Factor C3	Bom tempo e temperaturas amenas Protecção da fachada a revestir com toldos para evitar a exposição a luz directa do sol	1,2	
Factor D	Não aplicável	1,0	1,0
Factor E1	Orientação Sul (S)	0,8	1,0
Factor E2	Sistema exposto ao sol	1,0	
Factor E3	Coeficiente de absorção radiação solar = 0,5	1,0	
Factor E4	IRS superior a 150 Kcal/cm^2	0,8	
Factor E5	$E \leq 0,5\%$	1,2	
Factor E6	Nº dias de geada inferior a 25	1,2	1,0
Factor F	Local com uso público ou privado	1,0	
Factor G1	Manutenção preventiva a cada 5 anos	1,2	
Factor G2	Edifícios com mais de 2 pisos	0,8	

Tabela 6.5 – Projecto Y: índices aplicáveis aos factores modificadores para a situação S2 (Lopes (2009))

Factor modificador	Condições para situação 2	Índice aplicável	Índice médio respectivo
Factor A1	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,2	1,1
Factor A2	0,5% < E ≤3%	1,0	
Factor A3	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,2	
Factor A4	Cimento-cola tipo C2S	1,0	
Factor B1	Projecto de assentamento de cerâmica detalhado	1,2	1,2
Factor B2	Suporte com acabamento cuidado	1,2	
Factor C1	Mão-de-obra especializada e experiente	1,2	1,2
Factor C2	Técnico residente e fiscalização regular	1,2	
Factor C3	Bom tempo e temperaturas amenas	1,2	
	Protecção da fachada a revestir com toldos para evitar a exposição a luz directa do sol		
Factor D	Não aplicável	1,0	1,0
Factor E1	Orientação Sul (S)	0,8	0,97
Factor E2	Sistema exposto ao sol	1,0	
Factor E3	Coeficiente de absorção radiação solar = 0,5	1,0	
Factor E4	IRS superior a 150 Kcal/cm ²	0,8	
Factor E5	0,5% < E ≤3%	1,0	
Factor E6	Nº dias de geada inferior a 25	1,2	
Factor F	Local com uso público ou privado	1,0	1,0
Factor G1	Manutenção preventiva a cada 5 anos	1,2	1,0
Factor G2	Edifícios com mais de 2 pisos	0,8	

6.4.2.1 Cálculo da VUE de acordo com o Método Factorial ISO

As vidas úteis estimadas para cada projecto, nas diferentes situações, com as características e condições definidas nas tabelas anteriores, são as seguintes:

Tabela 6.6 – Cálculo da vida útil estimada para as várias situações de projecto X

Projecto X	VUR do RCA (anos)	VUE (em anos) = $VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$
S1	35	$35 \times 1,15 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,03 \times 1,0 \times 1,0 = 60$ anos
S2	35	$35 \times 1,1 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0 = 55,4$ anos
Projecto Y	VUR do RCA (anos)	VUE (em anos) = $VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$
S1	35	$35 \times 1,15 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0 = 58$ anos
S2	35	$35 \times 1,1 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 0,97 \times 1,0 \times 1,0 = 54$ anos

6.4.2.2 Cálculo da VUE de acordo com o princípio “step-by-step”; o método dos elementos

Tabela 6.7 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto X, situação S1

			Estimativas		
Factores			l	m	h
A	Material ou componente	1,15	-1,75	5,25	12,25
B	Projecto	1,2	0	7	14
C	Execução	1,2	0	7	14
D	Ambiente Interior	1	-7	0	7
E	Ambiente exterior	1,03	-5,95	1,05	8,05
F	Características do uso	1	-7	0	7
G	Nível de Manutenção	1	-7	0	7
soma l,m,h =			-28,7	20,3	69,3
VUR =			35 anos		

Factores		Cálculo estatístico	
		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	5,25	3,04
B	Projecto	7	3,04
C	Execução	7	3,04
D	Ambiente Interior	0	3,04
E	Ambiente exterior	1,05	3,04
F	Características do uso	0	3,04
G	Nível de Manutenção	0	3,04
soma f =		20,3	
raiz(somaquad) =			8,1
VUR + soma f =		55,3	
		VUE = 55 anos	
		"+/-" 8 anos	

Tabela 6.8 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto X, situação S2

Factores			Estimativas		
			l	m	h
A	Material ou componente	1,1	-3,5	3,5	10,5
B	Projecto	1,2	0	7	14
C	Execução	1,2	0	7	14
D	Ambiente Interior	1	-7	0	7
E	Ambiente exterior	1	-7	0	7
F	Características do uso	1	-7	0	7
G	Nível de Manutenção	1	-7	0	7
soma l,m,h =			-31,5	17,5	66,5
VUR =			35 anos		

Factores		Cálculo estatístico	
		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	3,5	3,04
B	Projecto	7	3,04
C	Execução	7	3,04
D	Ambiente Interior	0	3,04
E	Ambiente exterior	0	3,04
F	Características do uso	0	3,04
G	Nível de Manutenção	0	3,04
soma f =		17,5	
raiz(somaquad) =			8,1
VUR + soma f =		52,5	
		VUE = 53 anos	
		"+/-" 8 anos	

Tabela 6.9 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto Y, situação S1

Factores			Estimativas		
			l	m	h
A	Material ou componente	1,15	-1,75	5,25	12,25
B	Projecto	1,2	0	7	14
C	Execução	1,2	0	7	14
D	Ambiente Interior	1	-7	0	7
E	Ambiente exterior	1	-7	0	7
F	Características do uso	1	-7	0	7
G	Nível de Manutenção	1	-7	0	7
soma l,m,h =			-29,75	19,25	68,25
VUR =			35 anos		

Factores		Cálculo estatístico	
		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	5,25	3,04
B	Projecto	7	3,04
C	Execução	7	3,04
D	Ambiente Interior	0	3,04
E	Ambiente exterior	0	3,04
F	Características do uso	0	3,04
G	Nível de Manutenção	0	3,04
soma f =		19,25	
raiz(somaquad) =			8,1
VUR + soma f =		54,25	
		VUE = 54 anos	
		"+/-" 8 anos	

Tabela 6.10 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto Y, situação S2

Factores			Estimativas		
			l	m	h
A	Material ou componente	1,1	-3,5	3,5	10,5
B	Projecto	1,2	0	7	14
C	Execução	1,2	0	7	14
D	Ambiente Interior	1	-7	0	7
E	Ambiente exterior	0,97	-8,05	-1,05	5,95
F	Características do uso	1	-7	0	7
G	Nível de Manutenção	1	-7	0	7
soma l,m,h =			-32,55	16,45	65,45
VUR =			35 anos		

		Cálculo estatístico	
Factores		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	3,5	3,04
B	Projecto	7	3,04
C	Execução	7	3,04
D	Ambiente Interior	0	3,04
E	Ambiente exterior	-1,05	3,04
F	Características do uso	0	3,04
G	Nível de Manutenção	0	3,04
soma f =		16,45	
raiz(somaquad) =			8,1
VUR + soma f =		51,45	
		VUE = 51 anos	
		"+/-" 8 anos	

6.4.2.3 Considerações finais

Se considerar que a vida de projecto do edifício definida nos casos em estudo é de 60 anos e que o revestimento de fachada é passível de substituição, que apesar de dispendiosa pode ser comportável, de acordo com a tabela 2.3, a vida útil estimada destes produtos deverá ser no mínimo de 40 anos.

Deste modo, tanto na simples aplicação do Método Factorial ISO, como com a posterior aplicação do princípio “step-by-step”, as situações S1 e S2 cumprem este pressuposto, ultrapassando-o, quer no projecto localizado em Espinho, quer em Loulé.

No entanto, a aplicação do princípio “step-by-step” tem associado um parâmetro de incerteza ao valor final da vida útil estimada, dando um intervalo de valores. Assim, é possível verificar, para estes casos de estudo, que mesmo com uma margem limite de erro, a vida útil estimada satisfaz a duração mínima esperada, fazendo um diagnóstico mais seguro.

Com a aplicação do princípio “step-by-step” é mais provável abranger o valor correcto da vida útil do elemento e definir uma data mais prudente e com maior segurança para a sua substituição.

No entanto, apesar desta ferramenta ter mais potencialidades de rigor, este depende fortemente dos valores de entrada.

De salientar que os exemplos de aplicação aqui presentes não tiveram em conta esse rigor, pois seria necessária a aplicação de *softwares* sofisticados ou bases de dados mais fiáveis e o objectivo é apenas demonstrar a sua aplicação.

6.4.3 EXEMPLO 3

Raposo (2009) aplica o Método Factorial para estimar a vida útil de uma membrana de betume polímero APP auto-protegida com granulado mineral em três zonas distintas do país.

Esta aplicação do Método Factorial pretende analisar a influência do factor associado às características do ambiente exterior, uma vez que todos os outros factores podem ocorrer aleatoriamente, qualquer que seja a localização do edifício. Assim, todos os factores, com excepção do factor E, mantêm-se constantes nos três casos.

Consideram-se três edifícios localizados nas cidades do Porto, Bragança e Lisboa, com estrutura semelhante, assim como as suas coberturas.

A vida útil de referência (VUR) da membrana, baseada em informações dos fabricantes e em Documentos de Aplicação do LNEC, é de 10 anos.

Apresentam-se nas tabelas 6.40, 6.41 e 6.42 os factores que influenciam a estimativa da vida útil da membrana em questão, bem como os índices aplicáveis a cada factor.

Tabela 6.11 – Índices aplicáveis aos factores modificadores para a cidade do Porto (Raposo (2009))

Factor modificador	Condições para a cidade do Porto	Índice aplicável	Índice médio respectivo
Factor A1	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,0	1,0
Factor A2	Isolamento térmico com a classificação ISOLE recomendada para o tipo de cobertura	1,0	
Factor A4	Membrana armada com feltro de poliéster de, pelo menos, 150 g/m ²	1,0	
Factor B1	Soluções adequadas e pormenorização geral	1,0	
Factor B4	Inexistência de caminhos de circulação	0,8	0,95
Factor B5	Largura das juntas igual à recomendada para a membrana	1,0	
Factor B7	Juntas de dilatação ao nível da superfície da cobertura e com interrupção da camada de protecção rígida e/ou da membrana	1,0	
Factor C1	Mão-de-obra qualificada	1,0	0,95
Factor C2	Fiscalização inexistente	0,9	
Factor D	Não aplicável	1,0	1,0
Factor E3	Membrana localizada na zona V1, com as superior a 0,7	1,0	0,95
Factor E4	Edifícios localizados na zona P2	1,0	
Factor E5	Pressão dinâmica do vento: $1000 < w \leq 1300$ Pa	1,0	
Factor E6	Cobertura com estrutura resistente em betão armado, sem protecção pesada	1,0	
Factor E7	Cobertura com platibandas de altura superior a 1 m	1,0	
Factor E8	Atmosfera E7	0,8	
Factor F	Não aplicável	1,0	1,0
Factor G1	Realização de todas as operações de manutenção com periodicidade entre um e dois anos	1,0	1,0

Tabela 6.12 – Índices aplicáveis aos factores modificadores para a cidade de Bragança (Raposo (2009))

Factor modificador	Condições para a cidade de Bragança	Índice aplicável	Índice médio respectivo
Factor A1	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,0	1,0
Factor A2	Isolamento térmico com a classificação ISOLE recomendada para o tipo de cobertura	1,0	
Factor A4	Membrana armada com feltro de poliéster de, pelo menos, 150 g/m ²	1,0	
Factor B1	Soluções adequadas e pormenorização geral	1,0	0,95
Factor B4	Inexistência de caminhos de circulação	0,8	
Factor B5	Largura das juntas igual à recomendada para a membrana	1,0	
Factor B7	Juntas de dilatação ao nível da superfície da cobertura e com interrupção da camada de protecção rígida e/ou da membrana	1,0	0,95
Factor C1	Mão-de-obra qualificada	1,0	
Factor C2	Fiscalização inexistente	0,9	
Factor D	Não aplicável	1,0	1,0
Factor E3	Membrana localizada na zona V2, com as superior a 0,7	0,8	0,99
Factor E4	Edifícios localizados na zona P2	1,0	
Factor E5	Pressão dinâmica do vento: $w > 1300$ Pa	0,9	
Factor E6	Cobertura com estrutura resistente em betão armado, sem protecção pesada	1,0	
Factor E7	Cobertura com platibandas de altura entre 0,5 e 1 m	1,0	
Factor E8	Atmosfera E1	1,2	1,0
Factor F	Não aplicável	1,0	
Factor G1	Realização de todas as operações de manutenção com periodicidade entre um e dois anos	1,0	1,0

Tabela 6.13 – Índices aplicáveis aos factores modificadores para a cidade de Lisboa (Raposo (2009))

Factor modificador	Condições para a cidade de Lisboa	Índice aplicável	Índice médio respectivo
Factor A1	Com declaração de conformidade CE e com Certificado de Qualidade	1,0	1,0
Factor A2	Isolamento térmico com a classificação ISOLE recomendada para o tipo de cobertura	1,0	
Factor A4	Membrana armada com feltro de poliéster de, pelo menos, 150 g/m ²	1,0	
Factor B1	Soluções adequadas e pormenorização geral	1,0	
Factor B4	Inexistência de caminhos de circulação	0,8	0,95
Factor B5	Largura das juntas igual à recomendada para a membrana	1,0	
Factor B7	Juntas de dilatação ao nível da superfície da cobertura e com interrupção da camada de protecção rígida e/ou da membrana	1,0	
Factor C1	Mão-de-obra qualificada	1,0	0,95
Factor C2	Fiscalização inexistente	0,9	
Factor D	Não aplicável	1,0	1,0
Factor E3	Membrana localizada na zona V2, com as superior a 0,7	0,8	0,9
Factor E4	Edifícios localizados na zona P2	1,0	
Factor E5	Pressão dinâmica do vento: $1000 < w \leq 1300$ Pa	1,0	
Factor E6	Cobertura com estrutura resistente em betão armado, sem protecção pesada	1,0	
Factor E7	Cobertura com platibandas de altura superior a 1 m	1,0	
Factor E8	Atmosfera E7	0,8	
Factor F	Não aplicável	1,0	1,0
Factor G1	Realização de todas as operações de manutenção com periodicidade entre um e dois anos	1,0	1,0

6.4.3.1 Cálculo da VUE de acordo com o Método Factorial ISO

Tabela 6.14 – Cálculo da vida útil estimada para a cidade do Porto

Cidade	VUR (anos)	VUE (em anos) = $VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$
Porto	10	$10 \times 1,00 \times 0,95 \times 0,95 \times 0,95 \times 1,00 = 8,6$ anos
Bragança	10	$10 \times 1,00 \times 0,95 \times 0,95 \times 0,99 \times 1,00 = 8,9$ anos
Lisboa	10	$10 \times 1,00 \times 0,95 \times 0,95 \times 0,90 \times 1,00 = 8,1$ anos

6.4.3.2 Cálculo da VUE de acordo com o princípio “step-by-step”; o método dos elementos

Tabela 6.15 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para a cidade do Porto

			Estimativas		
Factores			l	m	h
A	Material ou componente	1	-2	0	2
B	Projecto	0,95	-2,5	-0,5	1,5
C	Execução	0,95	-2,5	-0,5	1,5
D	Ambiente Interior	1	-2	0	2
E	Ambiente exterior	0,95	-2,5	-0,5	1,5
F	Características do uso	1	-2	0	2
G	Nível de Manutenção	1	-2	0	2
soma l,m,h =			-15,5	-1,5	12,5
VUR =			10 anos		

Factores		Cálculo estatístico	
		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	0	0,87
B	Projecto	-0,5	0,87
C	Execução	-0,5	0,87
D	Ambiente Interior	0	0,87
E	Ambiente exterior	-0,5	0,87
F	Características do uso	0	0,87
G	Nível de Manutenção	0	0,87
soma f =		-1,5	
raiz(somaquad) =			2,3
VUR + soma f =		8,5	
		VUE = 9 anos	
		"+/-" 2 anos	

Tabela 6.16 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para a cidade de Bragança

Factores			Estimativas		
			l	m	h
A	Material ou componente	1	-2	0	2
B	Projecto	0,95	-2,5	-0,5	1,5
C	Execução	0,95	-2,5	-0,5	1,5
D	Ambiente Interior	1	-2	0	2
E	Ambiente exterior	0,99	-2,1	-0,1	1,9
F	Características do uso	1	-2	0	2
G	Nível de Manutenção	1	-2	0	2
soma l,m,h =			-15,1	-1,1	12,9
VUR =			10 anos		

Factores		Cálculo estatístico	
		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	0	0,87
B	Projecto	-0,5	0,87
C	Execução	-0,5	0,87
D	Ambiente Interior	0	0,87
E	Ambiente exterior	-0,1	0,87
F	Características do uso	0	0,87
G	Nível de Manutenção	0	0,87
soma f =		-1,1	
raiz(somaquad) =			2,3
VUR + soma f =		8,9	
		VUE = 9 anos	
		"+/-" 2 anos	

Tabela 6.17 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para a cidade de Lisboa

Factores			Estimativas		
			l	m	h
A	Material ou componente	1	-2	0	2
B	Projecto	0,95	-2,5	-0,5	1,5
C	Execução	0,95	-2,5	-0,5	1,5
D	Ambiente Interior	1	-2	0	2
E	Ambiente exterior	0,9	-3	-1	1
F	Características do uso	1	-2	0	2
G	Nível de Manutenção	1	-2	0	2
soma l,m,h =			-16	-2	12
VUR =			10 anos		

		Cálculo estatístico	
Factores		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	0	0,87
B	Projecto	-0,5	0,87
C	Execução	-0,5	0,87
D	Ambiente Interior	0	0,87
E	Ambiente exterior	-1	0,87
F	Características do uso	0	0,87
G	Nível de Manutenção	0	0,87
soma f =		-2	
raiz(somaquad) =			2,3
VUR + soma f =		8	
		VUE = 8 anos	
		"+/-" 2 anos	

6.4.3.3 Considerações finais

A duração expectável para este tipo de produtos é de 10 anos. Como tal, para os três casos analisados, utilizando o Método Factorial, estes não satisfazem o limite mínimo estabelecido.

No entanto, é necessário salientar que o autor considera à partida condições particularmente desfavoráveis, com nenhum valor dos factores superior a 1.

Aplicando o princípio “step-by-step”, apenas o limite máximo cumpre o tempo de vida exigido, no entanto, com uma margem de segurança muito baixa. Como tal, será necessário rever os valores dos factores utilizados e caso se demonstre serem adequados, se não forem feitas alterações em fase de projecto que satisfaçam a vida útil exigida, o material não deverá ser aplicado na cobertura em nenhuma das cidades, devendo optar-se por outra solução.

De salientar, que tal como para o exemplo 2, a estimativa da incerteza é feita de um modo grosseiro, sendo necessários mais estudos para obter parâmetros de incerteza ajustados a cada situação.

6.4.4 EXEMPLO 4

Matos (2007) aplica o Método Factorial para estimar a vida útil de dois produtos aplicados em dois projectos distintos. De modo a salientar a influência de um factor apenas sobre o resultado da vida útil estimada de um produto, opta-se por apresentar dois projectos com todas as condições equivalentes excepto a sua localização. O projecto A encontra-se na zona da Foz, no Porto e o projecto B está localizado em Grândola. Assim, as diferentes localizações irão alterar apenas as características do ambiente exterior e consequentemente o índice aplicável ao factor E.

Os produtos escolhidos para este estudo, além de aplicáveis como revestimentos em fachada ventilada, têm disponível a informação técnica necessária à utilização do Método Factorial.

O tempo de vida útil de referência para os produtos a avaliar está baseado em dados fornecidos pelos fabricantes, estando as condições relativas às suas previsões de acordo com ensaios de durabilidade normalizados nos países de origem.

Tendo em conta que a estimativa do tempo de vida útil das construções, integrada na fase de projecto, actualmente apenas se verifica nos projectos de edifícios para os quais se pretende uma elevada qualidade global, opta-se por considerar nestes casos em estudo o índice mais favorável para os três factores do grupo qualidade. Assim, será aplicado o índice 1,2 nos factores relativos à qualidade do produto de construção (factor A), ao nível de qualidade do projecto (factor B) e ao nível de qualidade da execução (factor C).

Relativamente à vida de projecto do edifício, opta-se por considerar uma duração de 60 anos, visto ser o mínimo recomendável para o tipo de edifícios que serão avaliados.

Tabela 6.18 – Projecto A: índices aplicáveis aos factores modificadores para os produtos 1 e 2 (Matos (2007))

Factor modificador	Produto 1	Índice	Produto 2	Índice
Factor A	Produto certificado pela norma 9001, pelo que também satisfaz os Requisitos Essenciais da marcação CE	1,2	Produto Certificado pelo SKH e marcação CE	1,2
Factor B	Projecto de acordo com D.L. 555/99 e Portaria 1110/2001 incluindo no Projecto de Execução os desenhos à escala adequada ao trabalho a executar em obra, a definição de todos os produtos a aplicar, bem como, Caderno de Encargos e respectivas Especificações Técnicas	1,2	Projecto de acordo com D.L. 555/99 e Portaria 1110/2001 incluindo no Projecto de Execução os desenhos à escala adequada ao trabalho a executar em obra, a definição de todos os produtos a aplicar, bem como, Caderno de Encargos e respectivas Especificações Técnicas	1,2
Factor C	Mão-de-obra Qualificada e Fiscalização Regular	1,2	Mão-de-obra Qualificada e Fiscalização Regular	1,2
Factor D	Não aplicável	1,0	Não aplicável	1,0
Factor E	Zona Climática: I2, V1 Precipitação: P2 Atmosfera: E8	0,8	Zona Climática: I2, V1 Precipitação: P2 Atmosfera: E8	0,8
Factor F	Classe Q1 Possui a classificação mínima exigida para a zona a aplicar no Projecto A	1,0	Inexistência de classificação de adequação ao uso aplicável ao produto	0,8
Factor G	Classe de reparação: r2 Classe de manutenção: e3	1,0	Classe de reparação: r2 Classe de manutenção: e1	0,8

Tabela 6.19 – Projecto B: índices aplicáveis aos factores modificadores para os produtos 1 e 2 (Matos (2007))

Factor modificador	Produto 1	Índice	Produto 2	Índice
Factor A	Produto certificado pela norma 9001, pelo que também satisfaz os Requisitos Essenciais da marcação CE	1,2	Produto Certificado pelo SKH e marcação CE	1,2
Factor B	Projecto de acordo com D.L. 555/99 e Portaria 1110/2001 incluindo no Projecto de Execução os desenhos à escala adequada ao trabalho a executar em obra, a definição de todos os produtos a aplicar, bem como, Caderno de Encargos e respectivas Especificações Técnicas	1,2	Projecto de acordo com D.L. 555/99 e Portaria 1110/2001 incluindo no Projecto de Execução os desenhos à escala adequada ao trabalho a executar em obra, a definição de todos os produtos a aplicar, bem como, Caderno de Encargos e respectivas Especificações Técnicas	1,2
Factor C	Mão-de-obra Qualificada e Fiscalização Regular	1,2	Mão-de-obra Qualificada e Fiscalização Regular	1,2
Factor D	Não aplicável	1,0	Não aplicável	1,0
Factor E	Zona Climática: I1, V2 Precipitação: P1 Atmosfera: E2+E4	1,2	Zona Climática: I1, V2 Precipitação: P1 Atmosfera: E2+E4	1,2
Factor F	Classe Q1 Possui a classificação mínima exigida para a zona a aplicar no Projecto A	1,0	Inexistência de classificação de adequação ao uso aplicável ao produto	0,8
Factor G	Classe de reparação: r2 Classe de manutenção: e3	1,0	Classe de reparação: r2 Classe de manutenção: e1	0,8

6.4.4.1 Cálculo da VUE de acordo com o Método Factorial ISO

Tabela 6.20 – Cálculo da vida útil estimada para os vários produtos do projecto A

Projecto A	VUR (anos)	VUE (em anos) = $VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$
Produto 1	30	$30 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 0,8 \times 1,0 \times 1,0 = 41,5$
Produto 2	35	$35 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 0,8 \times 0,8 \times 0,8 = 31,0$

Tabela 6.21 – Cálculo da vida útil estimada para os vários produtos do projecto B

Projecto B	VUR (anos)	VUE (em anos) = $VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$
Produto 1	30	$30 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,0 = 62,2$
Produto 2	35	$35 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,2 \times 0,8 \times 0,8 = 46,4$

6.4.4.2 Cálculo da VUE de acordo com o princípio “step-by-step”; o método dos elementos

Tabela 6.22 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto A, produto 1

			Estimativas		
Factores			l	m	h
A	Material ou componente	1,2	0	6	12
B	Projecto	1,2	0	6	12
C	Execução	1,2	0	6	12
D	Ambiente Interior	1	-6	0	6
E	Ambiente exterior	0,8	-12	-6	0
F	Características do uso	1	-6	0	6
G	Nível de Manutenção	1	-6	0	6
soma l,m,h =			-30	12	54
VUR =			30 anos		

Factores		Cálculo estatístico	
		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	6	2,61
B	Projecto	6	2,61
C	Execução	6	2,61
D	Ambiente Interior	0	2,61
E	Ambiente exterior	-6	2,61
F	Características do uso	0	2,61
G	Nível de Manutenção	0	2,61
soma f =		12	
raiz(somaquad) =			6,9
VUR + soma f =		42	
		VUE = 42 anos	
		"+/-" 7 anos	

Tabela 6.23 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto A, produto 2

Factores			Estimativas		
			l	m	h
A	Material ou componente	1,2	0	7	14
B	Projecto	1,2	0	7	14
C	Execução	1,2	0	7	14
D	Ambiente Interior	1	-7	0	7
E	Ambiente exterior	0,8	-14	-7	0
F	Características do uso	0,8	-14	-7	0
G	Nível de Manutenção	0,8	-14	-7	0
soma l,m,h =			-49	0	49
VUR =			35 anos		

		Cálculo estatístico	
Factores		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	7	3,04
B	Projecto	7	3,04
C	Execução	7	3,04
D	Ambiente Interior	0	3,04
E	Ambiente exterior	-7	3,04
F	Características do uso	-7	3,04
G	Nível de Manutenção	-7	3,04
soma f =		0	
raiz(somaquad) =			8,1
VUR + soma f =		35	
		VUE = 35 anos	
		"+/-" 8 anos	

Tabela 6.24 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto B, produto 1

			Estimativas		
Factores			l	m	h
A	Material ou componente	1,2	0	6	12
B	Projecto	1,2	0	6	12
C	Execução	1,2	0	6	12
D	Ambiente Interior	1	-6	0	6
E	Ambiente exterior	1,2	0	6	12
F	Características do uso	1	-6	0	6
G	Nível de Manutenção	1	-6	0	6
soma l,m,h =			-18	24	66
VUR =			30 anos		

Factores		Cálculo estatístico	
		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	6	2,61
B	Projecto	6	2,61
C	Execução	6	2,61
D	Ambiente Interior	0	2,61
E	Ambiente exterior	6	2,61
F	Características do uso	0	2,61
G	Nível de Manutenção	0	2,61
soma f =		24	
raiz(somaquad) =			6,9
VUR + soma f =		54	
		VUE = 54 anos	
		"+/-" 7 anos	

Tabela 6.25 – Cálculo da VUE, utilizando o princípio “step-by-step”, para o projecto B, produto 2

Factores			Estimativas		
			l	m	h
A	Material ou componente	1,2	0	7	14
B	Projecto	1,2	0	7	14
C	Execução	1,2	0	7	14
D	Ambiente Interior	1	-7	0	7
E	Ambiente exterior	1,2	0	7	14
F	Características do uso	0,8	-14	-7	0
G	Nível de Manutenção	0,8	-14	-7	0
soma l,m,h =			-35	14	63
VUR =			35 anos		

Factores		Cálculo estatístico	
		$f=(l+2,95m+h)/4,95$	$s=(h-l)/4,6$
A	Material ou componente	7	3,04
B	Projecto	7	3,04
C	Execução	7	3,04
D	Ambiente Interior	0	3,04
E	Ambiente exterior	7	3,04
F	Características do uso	-7	3,04
G	Nível de Manutenção	-7	3,04
soma f =		14	
raiz(somaquad) =			8,1
VUR + soma f =		49	
		VUE = 49 anos	
		"+/-" 8 anos	

6.4.4.3 Considerações finais

Tendo em conta que a vida de projecto do edifício definida nas condições genéricas de ambos os casos em estudo é de 60 anos e que o revestimento de fachada é passível de substituição, que apesar de dispendiosa pode ser comportável, de acordo com a tabela 2.3, este produto deverá ser considerado como elemento substituível, pelo que a sua vida útil estimada deverá ser no mínimo de 40 anos.

Aplicando apenas o Método Factorial, o produto 1 do projecto A satisfaz o período mínimo de 40 anos, apesar de muito próximo desse valor. Pela aplicação do princípio “step-by-step”, considerando o valor mais desfavorável, este não cumpre o limite mínimo, pelo que se deverá ponderar muito bem a aplicação deste produto.

O produto 2 do projecto A não satisfaz o período mínimo de 40 anos no Método Factorial, havendo apenas uma mínima hipótese, através do princípio “step-by-step”, do seu valor máximo de vida útil estimada ser de 41 anos, não devendo, por isso, ser aplicado.

Já o produto 1 do projecto B satisfaz o período mínimo de 40 anos com uma margem para eventuais erros de previsão extremamente confortável, quer para a simples aplicação do Método Factorial, quer utilizando a incerteza dada pelo princípio “step-by-step”, mesmo no seu limite mínimo.

Assim, tendo em conta que o revestimento de fachada é passível de substituição comportável mas considerada dispendiosa, a utilização do produto 1 no projecto B será extremamente conveniente mesmo que a sua durabilidade seja inferior ao resultado obtido, visto retardar a sua substituição relativamente ao período mínimo referido e consequentemente minimizar os custos da propriedade ao longo do ciclo de vida do edifício.

O produto 2 do projecto B também satisfaz o período mínimo de 40 anos, pelo que, do ponto de vista da durabilidade, também é uma opção aceitável para o projecto B. O resultado de vida útil estimada, utilizando os dois métodos, apesar de não ser uma margem tão grande como para o produto 1, é

suficiente para salvaguardar possíveis erros de previsão, contabilizados no parâmetro de incerteza do princípio “step-by-step”.

Mais uma vez, partindo do pressuposto que os parâmetros utilizados são os adequados aos produtos de construção analisados, uma análise mais aprofundada e bem documentada seria necessária, servindo estes exemplos apenas para demonstrar a aplicação do método, já que o seu rigor está comprometido pela baixa precisão dos valores de entrada.

6.5 CONCLUSÕES

A aplicação simples do Método Factorial, por vezes, pode não dar uma estimativa de vida útil acertada, tendo um nível de incerteza considerável.

A aplicação do princípio “step-by-step” pode, então, combater algumas das limitações verificadas na simples aplicação do Método Factorial. De salientar a forte sinergia entre os factores, derivada da multiplicação dos factores e a utilização dos factores como variáveis absolutas, não considerando a incerteza no processo de degradação.

Os casos práticos apresentados pretenderam demonstrar a utilidade de aplicação do princípio “step-by-step”.

Esta ferramenta seria útil se fosse possível definir com bastante precisão parâmetros de incerteza adequados e ajustados a cada material ou elemento de construção, tendo em consideração o contexto em que se insere e usando bases de dados fiáveis.

Como tal, mais estudos devem ser feitos, de modo a obter parâmetros de incerteza associados e ajustados a cada elemento de construção e de modo a analisar a viabilidade da sua aplicação para obter uma boa estimativa de vida útil de materiais, sistemas ou componentes de construção.

A aplicação deste princípio, se melhor estudada e bem implementada, poderá contribuir para diminuir o risco de incerteza associado à atribuição do valor de vida útil para qualquer material ou componente de construção, definindo uma margem de erro ajustada a cada caso, permitindo, assim, aos agentes intervenientes no processo construtivo e proprietários tomar opções mais conscientes durante a fase de projecto, com uma maior segurança nas suas escolhas.

7

CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

São inúmeros os trabalhos desenvolvidos até ao momento, sobre metodologias de previsão de vida útil de materiais, sistemas ou componentes de construção. No entanto, os documentos publicados sobre esses estudos abordam essencialmente uma base teórica das metodologias, devendo ser mais prescritivos na sua aplicação prática.

As metodologias existentes demonstram potencial real para aplicações práticas. Contudo, exigem um esforço considerável de investigação na procura de melhorias e actualizações frequentes para a introdução de dados precisos.

A maioria das metodologias apenas está adequada para pesquisa ou utilização específica em projectos singulares e únicos, sendo necessária uma uniformização e desenvolvimento de uma metodologia de previsão de vida útil global e ajustável a qualquer componente, material ou sistema de construção, inserida em qualquer contexto.

Até à data o Método Factorial tem sido o método com maior aceitação pelos intervenientes no projecto de durabilidade, pela sua elevada operacionalidade e simplicidade de aplicação. Todavia, a simples aplicação do Método Factorial como estabelecido na norma ISO 15686-1 (2000) não é suficiente.

Este apresenta como principais desvantagens:

- Não ter em conta a incerteza;
- Factores com o mesmo peso e em alguns casos muito gerais;
- Factores usados como variáveis absolutas, o que pressupõe uma certa constância no ritmo de degradação, contrária ao que se verifica na realidade;
- Utilização apenas de operações de multiplicação, como forma de relacionar os factores;
- Dependência da precisão dos dados de entrada;
- Elevada subjectividade da aplicação dos valores aos factores e do valor da vida útil de referência.

Vários estudos têm sido desenvolvidos por diversos autores, com o intuito de melhorar a aplicação do Método Factorial, nomeadamente, a criação de grelhas com valores padrão e orientações para a selecção dos valores dos factores modificadores, subdivisão de factores em subfactores (principalmente para o factor E, respectivo às características do ambiente exterior), implementação de bases de dados acessíveis de vidas úteis de referência para diversos materiais, criação de *softwares* para gestão de bases de dados diferentes e atribuição de escalas de valores dos factores, para cada

material e soluções tecnológicas, bem como métodos alternativos baseados na equação base do Método Factorial.

Da aplicação do Método Factorial, obtém-se apenas um valor absoluto (expresso em anos) que representa o limite expectável da vida útil do elemento analisado, mas não informa da possível dispersão de resultados, não tem em conta a sinergia existente entre os diversos factores, nem o nível de risco associado ao resultado obtido.

O princípio “step-by-step”, através de uma abordagem estocástica do Método Factorial, identifica e estima a incerteza para cada elemento, tratando os factores como variáveis estocásticas, e reduz as fortes interações entre os factores modificadores, substituindo a sua multiplicação por operações de adição. No entanto, a sua análise teria de ser realizada de forma sistemática e bem documentada, dependendo o seu rigor fortemente dos valores de entrada. Mais estudos têm de ser feitos, de modo a obter parâmetros de incerteza associados e ajustados a cada elemento de construção.

Os métodos determinísticos abordam com demasiada simplicidade os fenómenos complexos de degradação, não tendo em conta qualquer incerteza, já os métodos probabilísticos são demasiado complexos. Como tal, a aplicação de métodos de engenharia demonstra grandes potencialidades e vantagens, nomeadamente, a consideração de formas probabilísticas nos processos de degradação, sem se tornarem excessivamente complexos.

Em oposição ao uso de simples factores numéricos no Método Factorial original, estes métodos incorporam o uso de funções de densidade de probabilidade para os factores, bem como para a vida útil de componentes individuais para chegar a uma estimativa global da vida útil de um sistema de construção. Estes são estabelecidos utilizando técnicas de engenharia fiáveis, aplicadas de forma sistemática e simples.

Dentro dos métodos de engenharia, distingue-se o *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), como um dos mais promissores.

O FMEA é utilizado para identificar e classificar os modos de falhas potenciais, para determinar as suas causas e efeitos e, assim, sugerir procedimentos de ensaio pertinentes para caracterizar a sua durabilidade. Os exemplos apresentados na literatura sugerem que o método é facilmente adaptável a vários sistemas de construção e demonstra a possibilidade da sua aplicação a todos os sistemas de construção existentes. Este método pode ainda ser complementado com uma importante análise de criticidade (FMECA), que permite avaliar um indicador de criticidade para todos os modos de falha identificados.

O *Performance Limit Method* (PLM), à semelhança do FMEA, proporciona uma descrição da evolução da degradação, incluindo os seus agentes e mecanismos de uma forma mais simplificada do que os métodos probabilísticos, necessitando de um menor volume de informação e simplificando o processo.

Ao usar metodologias simples e claramente compreensíveis, ocorrerão menos erros na sua aplicação e melhores serão os resultados. Assim, os métodos de engenharia podem ser aplicados pelo engenheiro simples, obtendo resultados tão bons como ao recorrer a sofisticados modelos probabilísticos. No entanto, a sua aplicação é relativamente recente e os seus efeitos e resultados na previsão de vida útil ainda não estão completamente explorados e devidamente conhecidos.

É fundamental continuar a desenvolver métodos de avaliação da durabilidade dos produtos de construção, como forma de melhoria da qualidade e sustentabilidade dos edifícios. Espera-se que as considerações feitas neste estudo possam contribuir para incrementar as investigações e estudos a desenvolver nesta área.

7.2. SUGESTÕES DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nos últimos anos, os conhecimentos sobre o desempenho de materiais de construção durante a sua vida útil aumentaram significativamente e os progressos quanto à definição de métodos de trabalho de uma previsão de estimativa de vida útil fiável têm sido notáveis. Apesar disso, há ainda muito a ser feito no sentido de melhorar os métodos existentes, reunindo toda a informação disponível e trabalhando os pontos mais críticos, de modo a obter um método global, de fácil aplicação e o mais preciso possível. Isso deverá representar o desafio e o compromisso das investigações feitas nos próximos tempos.

Tendo como base o trabalho desenvolvido, sugerem-se nesta secção algumas linhas para o desenvolvimento de estudos futuros, relativos às metodologias de previsão de vida útil de materiais, sistemas ou componentes da construção.

Assim, em relação ao Método Factorial, recomendam-se os seguintes desenvolvimentos:

- Determinação e recolha de dados para a vida útil de referência (VUR) e para os factores individuais, de modo a facilitar a sua quantificação;
- Fundamentar os valores utilizados para os factores modificadores, através, por exemplo, de análises estatísticas ou exemplos de casos similares, em condições idênticas;
- Identificação de novas formas de combinação dos factores, como por exemplo: médias ponderadas e subequações por factor;
- Aumentar o número de factores na equação base, distinguindo as particularidades dos casos estudados;
- Distinção hierárquica entre factores;
- Introdução de níveis de risco ou incerteza relacionados com os factores;
- Criação de bases de dados fiáveis de vidas úteis de referência;
- Exigir que os fabricantes forneçam dados sobre a vida útil de referência, na informação técnica dos seus produtos.

Quanto aos métodos de engenharia, é necessária uma abordagem prática para descrever os diferentes factores através do uso de distribuições estatísticas, pois até ao momento foram aplicados poucos exemplos. Espera-se que, para campos de aplicação distintos, sejam definidas equações padrão e factores, bem como, para cada clima, os respectivos dados de entrada.

Dentro dos métodos de engenharia, também o FMEA, apesar de já aplicado com sucesso a vários produtos de construção, precisa ainda de algumas melhorias adicionais, nomeadamente:

- Utilização de bases de dados para capitalizar o conhecimento e experiência sobre os fenómenos de degradação e os modos de falha identificados;
- Definição clara das relações entre construção, produto e material;
- Introdução de uma descrição mais precisa dos fenómenos de degradação;
- Elaboração de um *software*, a fim de simplificar e automatizar o processo.

Deve ainda ter-se em conta que o método não está adaptado para ter em conta as falhas dependentes ou resultantes de uma sucessão de acontecimentos. Nestes casos é necessário utilizar outros métodos e técnicas, tais como a análise de Markov ou a análise através da árvore de falhas.

Mais estudos são necessários para identificar os parâmetros que regem a vida útil das estruturas de todos os tipos de materiais, bem como a criação de relações matemáticas viáveis para a aplicação do método de projecto de engenharia.

Quanto às metodologias existentes, seria importante:

- Transpor a barreira existente entre a base teórica e o uso prático dos métodos em estudos de caso de materiais e componentes de construção específicos ou de edifícios específicos;
- A aplicação dos métodos na avaliação do ciclo de vida de materiais e componentes de construção e de métodos de avaliação ambiental para edifícios;
- A aplicação dos métodos integrados no projecto do ciclo de vida e no projecto para a durabilidade dos edifícios;
- Estabelecer equações para estimativa da vida útil modificadas ou feitas à medida, dependendo da situação, usando a equação do Método Factorial em casos padrão, verificando a plausibilidade dos resultados e se necessário fazendo ajustes e modificando a equação, parâmetros de entrada, distribuições, etc;
- O desenvolvimento de documentos de normalização prescritivos, adequados para a aplicação de metodologias de previsão de vida útil rigorosas e padronizadas;
- Sugerir uma proposta mais simples e que considere o trabalho já feito.

Quando isto ocorrer, a engenharia contribuirá muito mais significativamente para a melhoria da qualidade de vida, através da criação e do desenvolvimento de um ambiente mais sustentável.

BIBLIOGRAFIA

- Aarseth, L.I., Hovde, P.J. (1999). *A stochastic approach to the factor method for estimating service life*. 8th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 30 Maio–3 Junho, Vancouver, pp.1247-1256.
- Aikivuori, A.M. (1999). *Critical loss of performance - What fails before durability*. 8th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 30 Maio–3 Junho, Vancouver, pp.1369-1376.
- Andrade, J.J. (2005). *Critérios Probabilísticos para a Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado*. Revista Engenharia Civil, nº22, Janeiro, Universidade do Minho, pp.35-47.
- Athena Institute (2006). *Service life considerations in relation to green building rating systems an exploration study*, Athena Sustainable Materials Institute, Ontario.
- Azzalin, M., Nesi, A., Lannutti, C., Lauria, M., Nicosia, C. (2005). *Standards and Tools for the Guarantee of the Reliability of the Intermediate Product in Building*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT5-122.
- Balaras, C., Drousa, K., Dascalaki, E., Kontoyiannidis, S. (2005). *Service life of building elements & installations in European apartment buildings*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT5-113.
- BLP (2010): www.componentlife.com. Acedido em Maio.
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T. (2008). *Service Life (Model) for Bituminous Roofing*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T22.
- Brisch, C., Englund, F. (2005). *Service Life Prediction Methods - Outcome of TFPC questionnaire*. Cost E37 Workshop, 19-21 Junho, Oslo.
- Carlsson, B., Möller, K., Marechal, J.C., Köhl, M., Heck, M., Brunold, S., Jorgensen, G. (2002). *General Methodology Of Test Procedures For Assessment Of Durability And Service Life*. 9th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-21 Março, Brisbane, paper 212.
- Corvacho, M. (2000). *Durabilidade da construção: Metodologia do projecto para a durabilidade - Planeamento da vida útil de um edifício*. Textos de apoio à disciplina de Patologia da Construção no âmbito do Mestrado em Reabilitação do Património Edificado, Novembro, FEUP.
- CSTB – EVA perfs (2010): www.duree-de-vie-batiment.fr. Acedido em Maio.
- Daniotti, B., Lupica Spagnolo, S. (2007). *Service Life prediction for buildings' design to plan a sustainable building maintenance*. Portugal SB07 Sustainable construction, materials and practices, 12-14 Setembro, Lisboa, pp.515-521.
- Daniotti, B., Lupica Spagnolo, S. (2008a). *Service Life Prediction Tools for Buildings' Design and Management*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T72.
- Daniotti, B., Lupica Spagnolo, S. (2008b). *Service Life Estimation using Reference Service Life Databases and Enhanced Factor Method*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T41.

Daniotti, B., Lupica Spagnolo, S., Paolini, R. (2008). *Factor Method Application Using Factors' Grids*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T41.

Davies, H., Wyatt, D. (2005). *Appropriate use of the ISO 15686-1 factor method for durability and service life prediction*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT5-208.

Freitas, V., Corvacho, H., Sá, A., Quintela, M. (2008). *Discussing the Durability Assessment of Cement Mortars – a Contribution for a Prediction Model*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T11.

Frohnsdorff, G.J., Martin, J.W. (1996). Towards prediction of building service life: the standards imperative. In *Durability of Building Materials and Components 7 (Volume 2)*, pp.1417-1428, C. Sjöström, Londres.

Frohnsdorff, G.J., Sjöström, C., Soronis, G. (1999). *International standards for service life planning of buildings*. 8th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 30 Maio–3 Junho, Vancouver, pp.1537-1542.

Gaspar, P., Brito, J. (2005). *Modelo de degradação de rebocos*. Revista Engenharia Civil, n.º 24, Setembro, Universidade do Minho, p. 17-27.

Gomes, J., Ferreira, R. (2009). *Durabilidade dos Materiais: desempenho e projecto prescritivo*. Revista Materiais de Construção nº145, Setembro/Outubro, p.41-48.

Governo de Portugal (2010): www.portugal.gov.pt/pt/GC15/Governo/Ministerios/MOPTH/Notas/Pages/20040323_MOPTH_Com_RGEU.aspx. Acedido em Maio.

Haagenrud, S. E., NILU – Norwegian Institute for Air Research (2004). *Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and components – Part II: Factors Causing Degradation*. Joint CIB W080/RILEM TC 140.

Hans, J., Chorier, J., Chevalier, J., Lupica Spagnolo, S. (2008). *French National Service Life Information Platform*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T41.

Hans, J., Chevalier, J. (2005). *Sustainable tools and methods for estimating building materials and components service life*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT4-90.

Hendriks, N., Nunen, H., Erkelens, P. (2004). *Application of the improved factor method to the environmental impact assessment of buildings*. SB04 Regional Central and Eastern European Conference on Sustainable Building, 27-29 Outubro, Varsóvia.

Hovde, P.J. (1998). *Evaluation of the Factor Method to estimate the service life of building components*. CIB World Building Congress, 7-12 Junho, Gaevle.

Hovde, P.J. (2002). *The Factor Method For Service Life Prediction From Theoretical Evaluation To Practical Implementation*. 9th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-21 Março, Brisbane, paper 232.

Hovde, P.J., Moser, K. (2004). *Performance Based Methods for Service Life Prediction: State of the Art Report*. CIB Report: Publication 294.

Hovde, P. (2005). *The Factor Method – a simple tool to service life estimation*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT4-115.

Instituto Nacional de Estatística - INE (2010): www.ine.pt. Acedido em Maio.

International Council for Research and Innovation in Building and Construction - CIB (1999). *Agenda 21 on sustainable construction*. CIB Report: Publication 237, Roterdão.

International Standard ISO 15686-1 (2000). *Buildings and constructed assets - service life planning - Part 1: General Principles*, Geneve.

International Standard ISO 15686-2 (2001). *Buildings and constructed assets - service life planning - Part 2: Service life prediction procedures*, Geneve.

International Standard ISO/DIS 15686-8 (2004). *Buildings and constructed assets - service life planning - Part 8: Reference service life*, Geneve.

ISO (2010): www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=28702. Acedido em Maio.

Jernberg, P., Sjöström, C., Lacasse, M.A., Brandt, E., Siemes, T. (2004). *Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and components – Part I: Service Life and Durability Research*. Joint CIB W080/RILEM TC 140.

Jernberg, P., Kucera, V., Odeen, K., Lewry, A., Shwarz, H-J., Yates, T. (2004). *Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and components – Part III: Building materials and components – Characterisation of degradation*. Joint CIB W080/RILEM TC 140.

John, V. M., Sato, N. M. N., Agopyan, V., Sjöström, C. (2001). *Durabilidade e sustentabilidade: Desafios para a construção civil brasileira*. II Workshop sobre Durabilidade das Construções, Dezembro, São José dos Campos.

John, V., Sato, N. (2006). *Construção e Meio Ambiente*. Coletânea Habitare – vol.7, pp.20-57, Miguel Aloysio Sattler e Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Porto Alegre.

José Romano - arquitectos (2010): <http://joseromanoarquitectos.com.pt/servicos/planos.htm>. Acedido em Maio.

Lacasse, M.A., Sjöström, C. (2004). *Recent advances in methods for service life prediction of building materials and components – an overview*. CIB World Building Congress, 2 Maio, Toronto, pp.1-10.

Lacasse, M., Sjöström, C. (2005). *Advances in Methods for service life prediction of building materials and components – Final report – Activities of the CIB*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT6-223.

Lee, N., Bennett, J., Marston, N., Kear, G. (2008). *A Durability Assessment Tool for the New Zealand Building Code*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T45.

Lindvall, A. (1998). *Duracrete – Probabilistic performance based durability design of concrete structures*. 2nd International Symposium in Civil Engineering, 26-28 Agosto, Budapeste.

Lopes, C. (2009). *Durabilidade na construção - Estimativa da vida útil de revestimentos cerâmicos de fachadas*. Dissertação de Mestrado, FEUP.

Masters, L.W. (1986). *Prediction of service life of building materials and components*. Materials and Structures, Vol. 19, issue 6, pp. 417-422.

Matos, M. (2007). *Durabilidade como critério de projecto – O Método Factorial no contexto português*. Dissertação de Mestrado, FEUP.

Mayer, P.D., Bourke, K.P. (2005). *Durability rankings for building component service life prediction*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT4-118.

Mc Duling, J., Horak, E., Cloete, C. (2008a). *Service Life Prediction Beyond the Factor Method*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T42.

Mc Duling, J., Horak, E., Cloete, C. (2008b). *Evaluation of Environmental Degradation Factors for Service Life Prediction*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T32.

Moser, K., Edvardsen, C. (2002). *Engineering Design Methods for Service Life Prediction*. 9th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-21 Março, Brisbane, paper 222.

Nicolella, M., De Pascale, A. (2005). *Service life of building components. Analysis and proposals of definition of the modifying factors*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT4-180.

Quintela, M. (2006). *Durabilidade de revestimentos exteriores de parede em reboco monocamada*. Dissertação de Mestrado, FEUP.

Raposo, T. (2009). *Durabilidade da construção. Estimativa da vida útil de revestimentos de coberturas planas*. Dissertação de Mestrado, FEUP.

Re Cecconi, F., Iacono, P. (2005). *Enhancing the Factor Method – Suggestions to Avoid Subjectivity*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT4-172.

Ripper, T. (2003). *Desempenho das construções*. 2º Ciclo de Palestras em Engenharia Civil (UNIC.), 12 Novembro, Monte da Caparica.

Rodrigues, M. F. (2009). *Anomalias nos Edifícios vs Qualidade na Construção*. Workshop “O PVC na Drenagem Pluvial - Aplicação da Norma Europeia EN 1329”, 7 Julho, Lisboa.

Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssis, H., Moradi-Marani, F. (2009). *Durap Gulf, a probabilistic approach for durability design of rc structures in the Persian Gulf using*. 3rd International Conference on Concrete and Development, 27-29 Abril, Tehran, CD04-013.

Siemes, T., Edvardsen, C. (1999). *Duracrete: service life design for concrete structures*. 8th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 30 Maio-3 Junho, Vancouver, pp.1343-1356.

Silva, A. (2009). *Previsão da vida útil dos revestimentos de pedra natural de paredes*. Dissertação de Mestrado, IST.

Silva, S., Fonseca, M., Brito, J. (2006). *Metodologia FMEA e sua aplicação à construção de edifícios*. Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção (QIC), LNEC, 21-24 Novembro, Lisboa.

Sjöström, C., Jernberg, P., Frohnsdorff, G. (2001). *International standards for design life of constructed assets*. CIB World Building Congress, Abril, Wellington, paper number: 192.

- Sjöström, C., Jernberg, P., Caluwaerts, P., Kelly, S., Haagenrud, S., Chevalier, J.L. (2002). *Implementation of the European Construction Products Directive via the ISO 15686 Standards*. 9th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-21 Março, Brisbane, paper 010.
- Soronis, G., Sjöström, C., Frohnsdorff, G. (1999). *International standards for service life planning of buildings*. 8th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 30 Maio–3 Junho, Vancouver, pp.1537-1542.
- Sousa, R. (2008). *Previsão da vida útil dos revestimentos cerâmicos aderentes em fachada*. Dissertação de Mestrado, IST.
- Talon, A., Boissier, D., Chevalier, J. (2005). *Temporal quantification method of degradation scenarios based on FMEA*. 10th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 17-20 Abril, Lyon, TT4-139.
- Talon, A., Chevalier, J., Hans, J. (2006). *State of the art Report on Failure Modes Effects and Criticality Analysis Research for and Application to the Building Domain*. CIB Report: Publication 310, Roterdão.
- Talon, A., Boissier, D., Hans, J. (2008a). *A Multi-Performance Approach for Service Life Prediction*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T42.
- Talon, A., Boissier, D., Hans, J., Lacasse, M. A., Chorier, J. (2008b). *FMECA and Management of Building Components*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T72.
- Talon, A., Boissier, D., Hans, J. (2008c). *Evaluation of Environmental Degradation Factors for Service Life Prediction*. 11th International Conference on Durability of Building Material and Components (DBMC), 11-14 Maio, Istambul, T32.
- Usman, F., Resdiansyah (2008). *Service Life Prediction of Building Components*. International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT), 16-20 Junho, Kuala Lumpur, pp.287-296.