



TÉCNICO
LISBOA



ACADEMIA MILITAR
MILITARY ACADEMY

Modelos computacionais aplicados à previsão da vida útil de ETICS

João Manuel Leal Tavares

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Militar

Orientadores: Professor Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Doutora Ana Filipa Ferreira da Silva Cigarro Matos

Júri

Presidente: Professor Albano Luís Rebelo da Silva Neves e Sousa

Orientador: Doutora Ana Filipa Ferreira da Silva Cigarro Matos

Vogais: Professor Joaquim Luiz Ramos Dias

Tenente-Coronel de Engenharia Artur Jorge Espada Caracho

Dezembro de 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, ao Professor Jorge de Brito, meu orientador científico, por todo o envolvimento nesta orientação, pela disponibilidade constante e pelo contributo importante para a realização da dissertação. Agradeço, de igual modo, à Doutora Ana Silva, minha co-orientadora, por todo o acompanhamento, pela partilha de conhecimentos e pela atenção dada ao longo do desenvolvimento de todo o trabalho. Foi um privilégio poder trabalhar e contar com a ajuda de ambos, em todos os momentos. Todo o conhecimento transmitido e todo o rigor exigido por ambos terão utilidade no futuro e serão encarados como princípios, ao longo de toda a minha vida.

Agradeço também à Academia Militar, a instituição que proporcionou a minha formação, não só a nível profissional mas sobretudo a nível pessoal. Em particular, agradeço a todos os meus camaradas mais próximos, dos cursos de Engenharia Militar, Transmissões e Material. As ligações que estabelecemos, há alguns atrás, que se tornaram mais fortes com o passar do tempo e com a superação de todas as dificuldades, serão mantidas na minha memória com especial estima e consideração.

Agradeço ainda a todos aqueles que, apesar de não ter mencionado, contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização da dissertação ou em qualquer outro momento do meu percurso académico.

Por último, agradeço e dedico este trabalho à minha família. Aos meus pais e à minha tia agradeço a educação que me proporcionaram em todos os momentos da minha vida, os sacrifícios que por mim fizeram ao longo dos anos e todo o apoio, entendimento e compreensão que sempre demonstraram, que me permitiram superar todos os desafios com os quais me deparei e me tornar na pessoa que hoje sou. Às minha irmãs agradeço todos os bons momentos que partilhamos ao longo dos anos e todo o apoio e amizade, sem dúvida de elevada importância e que me ajudaram a ultrapassar as adversidades.

Resumo

A presente dissertação segue uma linha de investigação desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, do Instituto Superior Técnico, relativa ao estudo da durabilidade de elementos construtivos utilizados como revestimento de edifícios. O seu objetivo é a aplicação de métodos de caráter estatístico e computacional na previsão da vida útil de sistemas ETICS.

A metodologia utilizada para a previsão da vida útil dos sistemas baseia-se na recolha de dados através de inspeções visuais, realizadas a um conjunto de edifícios com ETICS aplicados na sua envolvente. O tratamento da informação recolhida nesta fase e a posterior aplicação dos vários métodos permitem a identificação das tendências de degradação dos sistemas ETICS e a modelação da sua evolução com o tempo, que possibilita a determinação de um valor médio para a sua vida útil.

Os modelos computacionais são construídos com base em redes neuronais artificiais e em lógica difusa. Apesar de serem métodos recentes, sem ampla aplicação em estudos deste âmbito, os resultados obtidos demonstram coerência com a degradação observada na realidade e com outros estudos do âmbito da durabilidade destes sistemas de revestimento. Assim, é evidenciada a aplicabilidade dos métodos ao propósito da investigação.

Esta dissertação pretende contribuir para a área da previsão da vida útil de revestimentos ETICS mas não só, através do fornecimento de ferramentas também aplicáveis a outros elementos construtivos. Com a sua utilização, a conceção e manutenção dos edifícios torna-se mais racional e ao mesmo tempo é conferida uma maior sustentabilidade ao setor da construção.

Palavras-chave

ETICS, vida útil, degradação, redes neuronais artificiais, lógica difusa.

Abstract

This dissertation follows a line of research developed at the Department of Civil Engineering, Architecture and Georresources, of Instituto Superior Técnico, related to the study of the durability of construction elements applied as claddings in buildings. The main objective of this study is the application of statistic and computational methods in the service life prediction of ETICS.

The methodology adopted for the service life prediction of is based on field data, collected through visual inspections of a set of buildings with this cladding solution in their envelope. The treatment of the information collected during this stage and the subsequent application of the methods allow identifying the degradation trends of the ETICS systems and modelling their evolution over time, which enables the determination of an estimated value for the service life of this solution.

The computational models are based on artificial neural networks and fuzzy logic systems. Despite being recent methods without a wide application in studies of this scope, the results obtained reveal coherence with the degradation observed and with other studies related with the durability of ETICS. Therefore, the methods applied in this study are useful for the proposed purpose.

This dissertation intends to contribute to the knowledge of service life prediction of ETICS systems and to the development of computational tools for service life prediction that are applicable to other construction elements. With the application of these methods, the design and maintenance of buildings become more rational and, at the same time, the construction sector becomes more sustainable.

Key-words

ETICS, service life, degradation, artificial neural networks, fuzzy logic.

Índice geral

1. Introdução	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Interesse e justificação da dissertação	2
1.3. Objetivos e âmbito da dissertação	3
1.4. Terminologia associada ao conceito de vida útil	4
1.5. Terminologia associada ao conceito de previsão de vida útil	6
1.5.1. Conceito de previsão de vida útil e enquadramento normativo	6
1.5.2. Métodos para a previsão da vida útil	7
1.6. Organização da dissertação	8
2. Revestimentos ETICS	9
2.1. Introdução	9
2.2. Considerações sobre os sistemas de isolamento de paredes exteriores	9
2.3. Caracterização dos sistemas	10
2.4. Condições de aplicação	11
2.5. Anomalias	13
2.5.1. Anomalias relacionadas com manchas/alterações cromáticas	13
2.5.2. Anomalias em juntas	15
2.5.3. Anomalias por perda de continuidade/integridade	15
2.5.4. Anomalias por perda de aderência	16
2.6. Causas prováveis das anomalias	17
2.6.1. Fatores associados a ações ambientais	17
2.6.2. Fatores relacionados com as características dos edifícios	18
2.7. Conclusão	18
3. Trabalho de campo	19
3.1. Introdução	19
3.2. Objetivos	19
3.3. Metodologia de investigação	20
3.3.1. Ficha de inspeção e diagnóstico	20
3.3.2. Classificação das anomalias e quantificação dos níveis de degradação	21
3.3.2.1. Anomalias de perda de integridade	22

3.3.2.2.	Anomalias do tipo manchas ou alterações estéticas	23
3.3.2.3.	Anomalias de perda de aderência	23
3.3.2.1.	Anomalias nas juntas.....	24
3.4.	Análise da investigação de Marques et al. (2018)	25
3.4.1.	Caraterização da amostra de Marques et al. (2018).....	25
3.4.2.	Caraterização das anomalias detetadas na amostra de Marques et al. (2018)	31
3.4.3.	Análise dos resultados obtidos por Marques et al. (2018)	32
3.5.	Análise da amostra global	32
3.5.1.	Seleção da nova amostra.....	32
3.5.2.	Caraterização da totalidade da amostra	33
3.5.3.	Caraterização das anomalias detetadas na nova amostra	36
3.5.4.	Casos excluídos	39
3.6.	Conclusão.....	40
4.	Modelos de degradação.....	41
4.1.	Introdução.....	41
4.2.	Metodologia da estimação da vida útil	41
4.2.1.	Modelo de Gaspar (2009).....	41
4.2.2.	Relação entre severidade e nível de degradação	43
4.3.	Curvas de degradação	44
4.3.1.	Curva de degradação global	44
4.3.2.	Influência dos fatores de degradação condicionantes	45
4.4.	Análise dos resultados	49
4.5.	Conclusão.....	50
5.	Métodos computacionais	51
5.1.	Introdução.....	51
5.2.	Identificação das variáveis explicativas - modelos de regressão múltipla linear	52
5.2.1.	Considerações gerais.....	52
5.2.2.	Metodologia de construção dos modelos.....	52
5.2.3.	Aplicação à previsão da vida útil de revestimentos ETICS.....	57
5.3.	Redes neuronais artificiais	58
5.3.1.	Considerações gerais.....	58

5.3.2.	Metodologia de construção dos modelos	60
5.3.3.	Aplicação à previsão de vida útil de revestimentos ETICS.....	64
5.4.	Sistemas de lógica difusa.....	65
5.4.1	Considerações gerais.....	65
5.4.2.	Metodologia de modelação difusa.....	66
5.4.3.	Construção dos modelos.....	69
5.4.4.	Aplicação à previsão da vida útil de revestimentos ETICS.....	72
5.4.	Análise comparativa dos modelos.....	73
5.5.	Conclusões.....	76
6.	Conclusões	77
6.1.	Considerações finais	77
6.2.	Propostas de melhoria e de desenvolvimentos futuros	79
	Bibliografia	81
	Websites consultados.....	87
	Anexos.....	A
	Anexo 1 - Ficha de inspeção e diagnóstico.....	C
	Anexo 2 - Caracterização da zona e das construções analisadas	E
	Anexo 3 - Relação entre os valores de vida útil estimados pelo modelo de RML com 5 variáveis....	G
	Anexo 4 - Relação entre os valores de vida útil estimados pelo modelo com RNAs, com 5 variáveis.....	H
	Anexo 5 - Valores de vida útil em função das variáveis explicativas admitidas em cada modelo proposto	I

Índice de figuras

2. Revestimentos ETICS	9
Figura 2.1 - Sistema ETICS tradicional, com EPS	12
Figura 2.2 - Sistema ETICS tradicional, com MW	12
Figura 2.3 - Exemplos ilustrativos de anomalias do tipo manchas/alterações cromáticas	14
Figura 2.4 - Exemplos ilustrativos de anomalias em juntas	15
Figura 2.5 - Exemplos ilustrativos de anomalias de perda de continuidade/integridade	16
Figura 2.6 - Exemplos ilustrativos de anomalias de perda de aderência	17
3. Trabalho de campo	19
Figura 3.1 - Exemplo ilustrativo da correção de perspetiva das fotografias com recurso ao software GIMP®	21
Figura 3.2 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) por idades (número de fachadas e percentagem)	26
Figura 3.3 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da orientação	27
Figura 3.4 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da proximidade ao mar	27
Figura 3.5 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da exposição à humidade	28
Figura 3.6 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da ação da chuva-vento	28
Figura 3.7 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da exposição aos poluentes ...	29
Figura 3.8 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função do tipo de revestimento	29
Figura 3.9 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da textura do acabamento ...	30
Figura 3.10 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da cor do revestimento	30
Figura 3.11 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) pelo tipo de remate inferior	30
Figura 3.12 - Frequência de ocorrência das anomalias, por grupos, na amostra analisada por Marques et al. (2018), em termos absolutos e em percentagem do número total de fachadas	31
Figura 3.13 - Frequência de ocorrência das anomalias, por tipos, na amostra analisada por Marques et al. (2018), em termos absolutos do número total de fachadas	32
Figura 3.14 - Curva de degradação global obtida com a amostra analisada por Marques et al. (2018)	32
Figura 3.15 - Distribuição da nova amostra em função do tipo de utilização (número absoluto e percentagem)	34
Figura 3.16 - Distribuição da nova amostra em função do n.º de pisos elevados (número absoluto e percentagem)	34
Figura 3.17 - Distribuição da nova amostra em função da configuração volumétrica (número absoluto e percentagem)	34

Figura 3.18 - Distribuição da amostra global em função da idade dos revestimentos (número absoluto e percentagem)	34
Figura 3.19 - Distribuição da amostra global em função da orientação dos revestimentos	35
Figura 3.20 - Distribuição da amostra global em função da proximidade ao mar.....	35
Figura 3.21 - Distribuição da amostra global em função da exposição à humidade	35
Figura 3.22 - Distribuição da amostra global em função da exposição à ação chuva-vento.....	35
Figura 3.23 - Distribuição da amostra global em função da exposição aos poluentes.....	35
Figura 3.24 - Distribuição da amostra global em função do tipo de revestimento	36
Figura 3.25 - Distribuição da amostra global em função da textura do acabamento	36
Figura 3.26 - Distribuição da amostra global em função da cor do revestimento.....	36
Figura 3.27 - Distribuição da amostra global em função do tipo de remate inferior	36
Figura 3.28 - Frequência de casos da amostra total que apresentam anomalias de cada um dos grupos de anomalias	37
Figura 3.29 - Frequência de revestimentos da amostra total que apresentam anomalias de cada um dos tipos de anomalias.....	38
Figura 3.30 - Frequência de anomalias na amostra total por severidade de degradação	38
Figura 3.31 - Percentagem de cada grupo de anomalias verificada na amostra total, por nível de severidade de degradação	38
Figura 3.32 - Frequência de anomalias distribuídas por severidade e verificadas na amostra total, por grupos de anomalias	38
Figura 3.33 - Exemplos de anomalias das fachadas excluídas da amostra, na Escola Secundária Aurélia de Sousa.....	39
Figura 3.34 - Aspeto geral da fachada excluída da amostra, na Rua Aristides Sousa Mendes, em Vila do Conde	40
Figura 3.35 - Aspeto degradado das fachadas excluídas da amostra, no Empreendimento Alto da Mira, na Amadora.....	40
4. Modelos de degradação.....	41
Figura 4.1 - Curva de degradação global.....	45
Figura 4.2 - Curva de degradação média global	45
Figura 4.3 - Curva de degradação em função da orientação das fachadas	46
Figura 4.4 - Curva de degradação em função da proximidade ao mar das fachadas	47
Figura 4.5 - Curva de degradação em função da exposição à humidade das fachadas.....	47
Figura 4.6 - Curva de degradação em função da ação chuva-vento sobre as fachadas	47

Figura 4.7 - Curva de degradação em função da exposição aos agentes poluentes das fachadas	47
Figura 4.8 - Curva de degradação em função do tipo de revestimento das fachadas	48
Figura 4.9 - Curva de degradação em função da textura do acabamento das fachada.....	48
Figura 4.10 - Curva de degradação em função da cor das fachadas	49
Figura 4.11 - Curva de degradação em função do tipo de remate inferior das fachada	49
5. Métodos computacionais	51
Figura 5.1 - Relação entre os valores observados e previstos pelo modelo de RML com três variáveis (à esquerda) e com cinco variáveis (à direita)	56
Figura 5.2 - Histograma da vida útil estimada pelo modelo de RML com três variáveis	57
Figura 5.3 - Histograma da vida útil estimada pelo modelo de RML com cinco variáveis.....	57
Figura 5.4 - Vidas úteis estimadas pelo modelo de RML de três variáveis	58
Figura 5.5 - Representação simplificada de um neurónio biológico	59
Figura 5.6 - Representação simplificada de um neurónio artificial.....	59
Figura 5.7 - PMC adotado na RNA com três variáveis	62
Figura 5.8 - PMC adotado na RNA com cinco variáveis.....	62
Figura 5.9 - Relação entre os valores observados e previstos pela RNA com três (à esquerda) e com cinco (à direita) variáveis.....	64
Figura 5.10 - Histograma da vida útil estimada pela RNA de três variáveis	64
Figura 5.11 - Histograma da vida útil estimada pela RNA de cinco variáveis	64
Figura 5.12 - Vidas úteis estimadas em função dos fatores considerados na RNA de três variáveis..	65
Figura 5.13 - Funções de pertinência das variáveis incluídas no primeiro modelo difuso	70
Figura 5.14 - Funções de pertinência das variáveis incluídas no segundo modelo de lógica difusa.....	72
Figura 5.15 - Relação entre os valores observados e previstos pelo modelo de lógica difusa com três (à esquerda) e com quatro (à direita) variáveis.....	72
Figura 5.16 - Histograma de VUE pelo primeiro modelo (com três variáveis).....	73
Figura 5.17 - Histograma da VUE pelo segundo modelo (com quatro variáveis).....	73
Figura 5.18 - Vidas úteis estimadas a partir do primeiro modelo de lógica difusa.....	74
Figura 5.19 - Vidas úteis estimadas a partir do segundo modelo de lógica difusa.....	74
Figura 5.20 - Valores de vida útil média estimados por cada modelo e respetivos intervalos de 95% de confiança, com a representação do intervalo de valores com uma probabilidade superior a 95% e a 5% de serem excedidos (admitindo a distribuição normal dos dados)	75

Índice de tabelas

2. Revestimentos ETICS	9
Tabela 2.1 - Sistemas de classificação de anomalias frequentes em ETICS.....	15
3. Trabalho de campo.....	19
Tabela 3.1 - Escala para de definição dos níveis de degradação das anomalias	22
Tabela 3.2 - Níveis de degradação para anomalias de perda de integridade	23
Tabela 3.3 - Níveis de degradação para anomalias do tipo manchas ou alterações estéticas	24
Tabela 3.4 - Níveis de degradação para anomalias de perda de aderência	25
Tabela 3.5 - Níveis de degradação para anomalias nas juntas	25
Tabela 3.6 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de orientação das fachadas	27
Tabela 3.7 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de proximidade ao mar das fachadas	27
Tabela 3.8 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de exposição à humidade das fachadas	28
Tabela 3.9 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de ação da chuva-vento das fachadas	28
Tabela 3.10 - Número mínimo de casos adicionais em termos de exposição aos poluentes face à idade dos revestimentos.....	29
Tabela 3.11 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de tipo de revestimento das fachadas	29
Tabela 3.12 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de tipo de textura das fachadas	30
Tabela 3.13 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de cor dos revestimentos das fachadas	30
Tabela 3.14 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de tipo de remate inferior das fachadas	31
Tabela 3.15 - Número mínimo total de casos de estudo adicionais necessários	31
4. Modelos de degradação.....	41
Tabela 4.1 - Exemplos ilustrativos dos níveis de degradação associados ao sistemas ETICS.....	43
Tabela 4.2 - Correspondência entre a severidade de degradação normalizada e a condição global dos revestimentos	43
5. Métodos computacionais	51
Tabela 5.1 - Quantificação adotada na análise de regressão, para as variáveis independentes	53

Tabela 5.2 - Sumário do modelo de RML com três variáveis	54
Tabela 5.3 - Sumário do modelo de RML com cinco variáveis	54
Tabela 5.4 - Tabela ANOVA do modelo de RML com três variáveis	54
Tabela 5.5 - Tabela ANOVA do modelo de RML com cinco variáveis	54
Tabela 5.6 - Coeficientes de regressão do modelo com três variáveis, obtidos pelo SPSS®	55
Tabela 5.7 - Coeficientes de regressão do modelo com cinco variáveis, obtidos pelo SPSS®	55
Tabela 5.8 - Parâmetros estatísticos utilizados na análise da validade dos modelos de RML	56
Tabela 5.9 - Quantificação das variáveis independentes utilizada nos modelos de RNAs	61
Tabela 5.10 - Coeficientes da RNA de três variáveis	63
Tabela 5.11 - Coeficientes da RNA de 5 variáveis	63
Tabela 5.12 - Parâmetros estatísticos utilizados na análise da validade dos modelos com RNAs	69
Tabela 5.13 - Centros dos clusters do modelo de lógica difusa com três variáveis	69
Tabela 5.14 - Centros dos clusters do modelo de lógica difusa com quatro variáveis	71
Tabela 5.15 - Parâmetros estatísticos utilizados na análise da validade dos modelos de lógica difusa	72

Lista de acrónimos

AIJ	<i>Architectural Institute of Japan</i>
APFAC	Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS
ARP	Algoritmo de retropropagação
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standard</i>
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
E	Este
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
EQM	Erro quadrático médio
EQMN	Erro quadrático médio normalizado
ETAG	<i>European Technical Approval Guideline</i>
ETICS	<i>External thermal insulation composite system</i>
FCM	<i>Fuzzy c-means</i>
GIMP	<i>GNU Image Manipulation Program</i>
ICB	<i>Insulation corkboard</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LD	Lógica difusa
MW	Mineral wool
N	Norte
NE	Nordeste
NO	Noroeste
O	Oeste
OSB	<i>Oriented strand board</i>
PMC	Perceção multicamada
RML	Regressão múltipla linear
RNA	Rede neuronal artificial
S	Sul
SE	Sudeste
SO	Sudoeste
SPSS	<i>Statistical Package for Social Sciences</i>
TS	<i>Takagi-Sugeno</i>
XPS	<i>Extruded polystyrene</i>

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

Atualmente, verifica-se uma preocupação crescente com a promoção da sustentabilidade econômica e ambiental nos diferentes setores da sociedade. As medidas tomadas nesse sentido revelam-se tão mais eficazes quanto mais holística e integradora for a abordagem utilizada (Gonzalez et al., 2015). O setor imobiliário constitui-se, ainda nos dias de hoje, como um dos segmentos que mais impacte tem no consumo energético e de materiais, o que se traduz diretamente em elevadas emissões de carbono e consumo de recursos durante todas as fases do ciclo de vida das construções (Durão et al., 2014). Com esta tomada de consciência, este setor tem-se revelado bastante atrativo no que concerne à procura e adoção de medidas preventivas e corretivas que estejam de acordo com os preceitos de sustentabilidade em voga, existentes inclusivamente a nível regulamentar (Adamczyk e Dylewski, 2017).

As fachadas dos edifícios têm uma influência elevada no seu desempenho global (Nadoushani et al., 2017). Para além de definirem a sua aparência, também atuam como camada de proteção às ações externas e funcionam como elemento de permuta entre os ambientes interior e exterior, contribuindo para a manutenção de um bom ambiente nos espaços interiores (Madureira et al., 2017). A tecnologia e os materiais utilizados no revestimento das fachadas condicionam muito as necessidades energéticas dos edifícios, pelo que a seleção da melhor alternativa é um processo complexo (Carretero-Ayuso et al., 2016).

Neste contexto, a adoção de soluções de revestimento de fachadas que incorporem materiais com boas características de isolamento térmico é particularmente interessante. Tal facto deve-se, em grande parte, ao aumento da eficiência energética que promovem, conseguida pela diminuição das necessidades de energia (Dylewski e Adamczyk, 2011). Os ETICS, uma tecnologia de revestimento de paredes exteriores, relativamente recente no mercado, são uma solução muito interessante para que tal objetivo seja atingido. A sigla ETICS tem origem anglo-saxónica e significa *External Thermal Insulation Composite System*, que em Português é traduzido como Sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior. Como o próprio nome indica, trata-se de uma forma de isolar termicamente a envolvente dos edifícios, na qual o material isolante é colocado pelo lado exterior. A poupança em consumo e gastos de energia que promovem, no que diz respeito às necessidades de aquecimento na estação fria e de arrefecimento na estação quente, torna-a uma das soluções com maior popularidade, atualmente, tanto em construções novas como em obras de reabilitação. O reconhecimento das suas vantagens, confirmadas pelas entidades certificadoras nacionais e internacionais, promove o aumento da confiança nestes sistemas e contribui para a proliferação da sua utilização (Barreira e Freitas, 2016). A nível nacional, o surgimento de legislação reguladora das características térmicas e higrométricas dos espaços interiores habitados, quase de forma simultânea com a introdução destes sistemas no mercado, constituiu-se também como fator potenciador da sua utilização. A poupança energética alia-se ao conforto em termos térmico e higrométrico conseguido através desta solução, suficiente para satisfazer de forma adequada as exigências impostas pela regulamentação (Amaro et al., 2013).

A ação conjugada de vários fatores sobre as construções e todos os seus elementos (em particular os revestimentos de fachada), desde o momento da sua entrada ao serviço, conduz a que sofram uma degradação gradual ao longo do tempo, com custos de reparação frequentemente elevados. Este

fenómeno é inevitável e origina uma perda de desempenho dos elementos construtivos, reduzindo a capacidade de corresponderem às exigências de si esperadas (Ramos et al., 2018). Segundo esta ótica, as atividades de previsão da vida útil e de durabilidade revelam uma elevada importância. Ao permitirem uma utilização mais racional dos elementos construtivos e o planeamento de ações de manutenção adequadas, é assegurada a garantia de um bom desempenho durante mais tempo e a redução de gastos com reparações urgentes (Marques et al., 2018).

O conhecimento da vida útil dos elementos construtivos deve ser um dado a ter em conta desde a fase de conceção das construções, de modo a apoiar os processos de tomada de decisão ao longo de todo o seu ciclo de vida. No entanto, a previsão de vida útil não é uma tarefa fácil, pois são muitos os fatores que condicionam o processo de degradação, muitos deles de difícil previsão e de análise subjetiva (Silva et al., 2016a). Estes fatores atuam sinergicamente, sendo extremamente variáveis entre edifícios e entre elementos construtivos. O modo de interação dos vários mecanismos de degradação nem sempre é totalmente conhecido e a inclusão de todos os potenciais agentes de degradação em modelos de previsão da vida útil é praticamente impossível (Balaras et al., 2005). Contudo, cada vez mais têm surgido metodologias para esta previsão, ferramentas de importância vital para os órgãos de decisão, por permitirem uma conceção que prolongue a vida útil esperada das construções, associada a uma minimização de custos e recursos. Em última instância, o aumento da sua vida útil torna-as, de facto, mais duráveis e sustentáveis.

1.2. Interesse e justificação da dissertação

Contrariamente aos tempos passados, onde a garantia da durabilidade das construções era conseguida através da adoção de soluções construtivas tradicionais, cujo desempenho era bem conhecido e podia ser previsto com elevada fiabilidade, o mesmo não se passa atualmente. Com a introdução de novos materiais e sistemas no setor da construção, o seu desempenho não pode ser estimado pela mesma via, por falta de experiência empírica. Deste modo, a previsão da vida útil dos materiais e sistemas tem ganho uma importância crescente, conduzindo à estimativa do desempenho expectável destes componentes, que de outro modo não poderia ser obtida. Com a posse desta informação desde a fase de conceção das construções, é possível a opção por produtos e processos construtivos que lhes confirmem um carácter mais sustentável. A sustentabilidade é conseguida em termos ambientais (pela minimização do dispêndio de materiais e energia, causando um menor impacte ambiental da construção) e em termos económicos (pelo alargamento do tempo de serviço esperado, conseguido pelo planeamento de ações de manutenção adequadas e concordantes com o desgaste previsto, tendo em conta as condições de uso e de exposição consideradas em fase de projeto) (Gonzalez et al., 2015).

A nível nacional, a aplicação relativamente recente de ETICS na envolvente dos edifícios faz com que estes sistemas não se possam inserir no leque de soluções construtivas onde a larga experiência construtiva passada permite uma previsão fiável da sua vida útil expectável. Além disso, a sua localização exterior e o seu papel como primeira proteção dos edifícios contra as ações exteriores fazem com que a degradação sentida ao longo do tempo seja mais grave e mais acelerada comparativamente a outros elementos construtivos. A par destes motivos, a existência de poucos trabalhos de investigação no âmbito da durabilidade destas soluções de revestimento torna evidente o interesse e a pertinência do estudo, que pretende dar um contributo no alargamento dos conhecimentos existentes.

Na última década, têm sido desenvolvidos vários modelos matemáticos e computacionais para

a descrição dos processos de degradação dos elementos de construção (Silva, 2015). Os dados que permitem a elaboração destes modelos são obtidos a partir do estudo da degradação evidenciada por um determinado conjunto de construções, nas suas condições reais de ocupação e utilização (Silva et al., 2016a). Os modelos determinísticos, inicialmente utilizados no âmbito da previsão da vida útil, não conseguem lidar com a natureza estocástica da degradação, sendo incapazes de contemplar a incerteza e variabilidade associada aos seus fenómenos (Morcoux e Akhnouk, 2016). A utilização de métodos computacionais tem-se revelado bastante promissora neste contexto, permitindo a obtenção de modelos capazes de dar resposta a problemas como este, de complexidade elevada, onde soluções analíticas ou numéricas dificilmente seriam obtidas com recurso a outros métodos (Dias et al., 2014).

1.3. Objetivos e âmbito da dissertação

A presente dissertação de mestrado insere-se na linha de investigação existente no Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, relativa à previsão da vida útil de elementos de construção, em particular os que são utilizados como revestimento de fachadas de edifícios correntes. As investigações de Amaro et al. (2014), Ximenes et al. (2014) e Marques et al. (2018) são as principais referências desta dissertação. Estes estudos correspondem à primeira abordagem à previsão da vida útil do sistema ETICS, caracterizando a condição global de degradação dos revestimentos e modelando a evolução da degradação ao longo do tempo com recurso a modelos determinísticos. Por sua vez, o principal objetivo do presente estudo consiste no desenvolvimento de metodologias computacionais inovadoras, baseadas na aplicação de redes neuronais artificiais (RNAs) e fundamentos de lógica difusa, também para a previsão da vida útil destes revestimentos.

Para tal, é realizada uma investigação que assenta, inicialmente, em pesquisa bibliográfica. O seu objetivo é a recolha de informação, de diversos tipos e fontes, relacionada com a temática em estudo, para a criação de uma base teórica que sustente todo o trabalho a ser desenvolvido posteriormente. Esta pesquisa visa abranger os aspetos relacionados com a previsão da vida útil, a tecnologia e patologia do sistema ETICS e os métodos computacionais a aplicar. A esta fase sucede-se um trabalho de campo, onde se procede ao levantamento de dados que, depois de processados, permitem a construção dos modelos que fornecem estimativas da vida útil deste sistema. O trabalho de campo implica a realização de inspeções visuais a edifícios onde o sistema se encontra aplicado, com o intuito de recolher dados. Assim, as inspeções visuais incluem o registo de todas as características dos edifícios, com interesse para a análise da degradação dos seus revestimentos. Para além da localização ou do tipo de envolvente, com as inspeções pretende-se fazer o levantamento das anomalias observadas nas fachadas, registando-as em suporte fotográfico. Depois de efetuado o processamento dos dados levantados na fase anterior, a última fase da investigação assenta na aplicação de métodos determinísticos, inicialmente, e na aplicação de métodos computacionais, num momento posterior. Deste modo, são obtidos diversos modelos para a previsão da vida útil dos revestimentos em estudo.

Os resultados desta dissertação irão fornecer um contributo no desenvolvimento de metodologias para a previsão da vida útil de elementos de construção, às quais poderão estar associadas mais-valias de grande interesse, não só para o setor da construção e para os seus intervenientes, mas também a nível social. Assim se consegue que este setor adquira um caráter mais sustentável, o que ao mesmo tempo melhora a imagem e a perceção das cidades.

1.4. Terminologia associada ao conceito de vida útil

Segundo Silva et al. (2016a), à semelhança de qualquer elemento ou conjunto de elementos, orgânico ou inorgânico, também os edifícios possuem um tempo de existência limitado, correntemente referido como ciclo de vida. Durante este período, os edifícios e os seus elementos constituintes não garantem sempre o cumprimento integral das funções para as quais foram concebidos. Assim, recebe a designação de vida útil o período durante o qual tais funções são efetivamente cumpridas.

Apesar da universalidade da utilização e do entendimento do conceito de vida útil, a sua definição explícita não é consensual. Como exemplo disso, a *Guideline on Durability in Buildings* (CSA, 1995) estabelece que a vida útil é entendida como o período ao longo do qual os edifícios e os seus elementos são capazes de manter os requisitos de desempenho, estabelecidos na fase de conceção, sem custos inesperados associados a reparações por deterioração precoce. Por outro lado, a ASTM E632-82 (ASTM, 1996), citada por Serralheiro et al. (2017), refere que a vida útil de uma construção ou elemento construtivo é o período durante o qual todas as propriedades excedem os valores mínimos aceitáveis, após a colocação em serviço. Por fim, a norma ISO 15686-1 (ISO, 2011), elaborada com vista à normalização dos aspetos relativos à vida útil dos edifícios e bens contruídos, define vida útil como o tempo, após a entrada em serviço, durante o qual um edifício ou os seus componentes garantem ou excedem os requisitos de desempenho estabelecidos, sendo estes o desempenho mínimo aceitável de uma dada propriedade.

As definições anteriores permitem concluir que existe uma dimensão temporal associada ao conceito de vida útil, que é condicionada pelo desempenho individual de todos os constituintes dos edifícios. A partir desta ideia, Brand (1994) contribui para o conceito de vida útil com a sugestão de um modelo de divisão dos edifícios em seis componentes com vidas úteis diferenciadas, introduzindo a ideia de que os edifícios não envelhecem gradualmente de forma homogénea; pelo contrário, os seus vários componentes apresentam taxas de degradação distintas, constituindo assim diferentes camadas de durabilidade.

Gaspar (2009) menciona que, apesar de aparentar ser algo simples, a quantificação da vida útil de um edifício não é fácil ou consensual, estando fortemente dependente de fatores de difícil quantificação e leitura, variáveis de acordo com aspetos como a época, o lugar, ou os contextos social, económico e ambiental. É a interação de todos estes fatores que eleva a sua complexidade. No entanto, com a divisão do conceito nos aspetos que o caracterizam, as dificuldades inerentes à sua quantificação são atenuadas.

A segurança e a funcionalidade são propriedades que, no entendimento de alguns autores (Lam et al., 2010; Ali e Rahmat, 2010), se inserem nos requisitos de desempenho a exigir durante a vida útil dos edifícios e dos seus componentes. A segurança refere-se à garantia da integridade de um edifício, ao passo que a funcionalidade diz respeito às funções que se exige serem cumpridas pelo edifício. A par delas, a aparência estética assume-se também condicionante para o fim da vida útil, e diz respeito sobretudo à aparência superficial do edifício ou dos elementos que integra. A sua consideração como critério decisivo torna subjetiva a definição dos requisitos que permitem a quantificação eficiente da vida útil. Segundo Moser (1999), estas três propriedades são as que ditam o fim da vida útil de um edifício, manifestado quando o limite mínimo dos requisitos de desempenho de uma das propriedades é ultrapassado. Segundo Moser (1999), embora a aparência estética seja tipicamente condicionante para a definição do fim da vida útil de um edifício (dada a maior sensibilidade dos utilizadores a esta componente), conduzindo à realização de intervenções, os aspetos relativos à segurança são os mais importantes, devendo ser estabelecidos para

um limite máximo de degradação aceitável mais baixo, de entre todas as propriedades. Apesar de, inicialmente, também serem estabelecidos níveis de degradação máxima baixos para os aspetos estéticos e de funcionalidade, ao longo do período de vida dos edifícios verifica-se a aceitação de níveis de degradação mais elevados do que os iniciais, superiores ao definido para os aspetos de segurança.

Gaspar (2002) define três critérios condicionantes para estabelecer o fim da vida útil de um edifício ou elemento constituinte: i) obsolescência funcional ou de imagem; ii) desempenho económico; iii) vida útil física. A obsolescência é atingida quando um elemento pode ser substituído por outro que desempenhe a sua função de forma mais eficiente (Silva, 2009). O desempenho económico (a perda de desempenho, mais concretamente) é caracterizado pela situação em que a reparação de um elemento é menos vantajosa do que a sua substituição. A vida útil física, relacionada com a durabilidade, é consequência da degradação sentida ao longo do tempo e agravada, por sua vez, pela menor qualidade dos materiais aplicados, pelas condições de conceção e execução e pelas características de exposição ambiental, de uso e de manutenção (Marques, 2016). Segundo Gaspar (2002), o instante a partir do qual as atividades desenvolvidas num dado edifício deixam de poder ser asseguradas, por ter sido atingido o limite máximo aceitável de degradação de uma das propriedades referidas, estabelece o fim da vida útil do edifício.

A inevitabilidade da degradação dos elementos de construção, sofrida ao longo do tempo, requer que sejam alvo de manutenção adequada e periódica, de carácter preventivo ou corretivo, ou então sujeitos a reparações ocasionais e operações de reabilitação quando a degradação é mais acentuada (Rodrigues et al., 2013). O planeamento da vida útil, referido na norma ISO 15686-1 (ISO, 2000), é entendido como a definição de todas as ações que contribuem para que os edifícios ou as suas partes constituintes desempenhem as funções para as quais foram concebidos. O objetivo é garantir que a vida útil iguale ou excede o período de vida determinado em projeto, tendo em consideração todos os custos do ciclo de vida dos edifícios. A norma 15686-1 (ISO, 2000) também refere que este processo auxilia a tomada de decisão relativa a vários aspetos durante a fase de conceção, permitindo um alargamento do domínio temporal da vida das construções definida em projeto, um aumento da flexibilidade do uso do edifício e uma diminuição da probabilidade de ocorrência de obsolescência precoce.

A relação entre durabilidade e vida útil torna relevante a explicação breve deste conceito. Segundo a norma 15686-1 (ISO, 2011), a durabilidade é definida como a capacidade dos edifícios ou das suas partes desempenharem as respetivas funções, durante um certo período, mesmo sob a influência dos agentes e das condições de uso, previstos em projeto. Gaspar (2002) define durabilidade como a capacidade de um edifício ou dos seus componentes responderem adequadamente às exigências que lhe são impostas, sem sofrerem desgaste irreversível ou, no caso de ocorrer desgaste, é expectável que uma manutenção corrente seja suficiente para restabelecer as suas propriedades e menos onerosa do que a sua substituição. Assim, apesar da semelhança, a durabilidade não possui a dimensão temporal verificada na vida útil. Ela traduz-se como uma capacidade inerente aos elementos de construção, dependente de fatores como os materiais utilizados, o nível de projeto e a qualidade de execução, que influenciam a suscetibilidade à degradação. Desta forma, os estudos do âmbito da durabilidade exigem um conhecimento adequado do comportamento dos materiais, das características ambientais às quais vão estar sujeitos e dos mecanismos de degradação que os vão afetar ao longo do tempo (ISO, 2011).

A obsolescência é outro conceito que se relaciona com a vida útil. A norma 15686-1 (ISO, 2011)

define-a como a incapacidade para a realização de uma função de forma satisfatória, devido a alterações nos requisitos de desempenho esperados. A obsolescência manifesta-se em vários níveis, embora o funcional (quando a função que justificou a construção já não é requerida), o tecnológico (quando existem alternativas atuais com um melhor desempenho) e o económico (quando, apesar da total funcionalidade, existem alternativas mais eficientes e económicas) sejam reconhecidos com mais frequência. No entanto, níveis como o cultural, o ecológico ou o político são suficientes para agravar a obsolescência associada a uma dada construção (Thomsen e van de Flier, 2011). Dada a mutação constante das exigências às quais os edifícios têm de dar resposta, a complexidade associada ao estudo deste fator é elevada.

1.5. Terminologia associada ao conceito de previsão de vida útil

1.5.1. Conceito de previsão de vida útil e enquadramento normativo

Segundo Freitas et al. (2008), o objetivo da previsão da vida útil de um edifício ou dos seus componentes é a avaliação da capacidade de satisfação de um desempenho adequado ao longo de um período considerado como razoável, antes de se proceder à sua substituição ou reparação. Não obstante a impossibilidade de se conhecer com rigor todas as condicionantes, passadas e futuras, que põem em causa a duração da vida útil das construções, a sua previsão deve ser o resultado de um prognóstico o mais fiável possível, tendo por base todos os dados disponíveis considerados como relevantes.

As primeiras referências ao conceito surgiram na década de 90, fruto da realização de estudos e da elaboração de documentos normativos, relevantes para a regulação dos procedimentos a adotar na execução de atividades de previsão da vida útil (Marques, 2016). O *Principal Guide for Service Life Planning of Buildings* do *Architectural Institute of Japan*, produzido em 1989 e traduzido de forma parcial para inglês em 1993, é um documento que providenciou um contributo inicial importante para tal regulação, fornecendo também os alicerces para a adaptação do projeto, da construção e da manutenção dos edifícios aos objetivos planeados para os mesmos em termos de durabilidade (AIJ, 1993). O *New Zealand Building Code*, criado em 1992, contém requisitos quantitativos relativos à vida útil das várias partes dos edifícios e produtos de construção na sua cláusula relativa à durabilidade; este documento também referiu que a durabilidade pode ser demonstrada por ensaios de laboratório ou por analogia com o comportamento de elementos de construção semelhantes. Também em 1992, surgiu a BS 7543 (*British Guide to Durability of Building Elements, Products and Components*), relativa à durabilidade dos elementos e produtos de construção, aplicando-se essencialmente a novos edifícios e às suas partes. A norma refere que a previsão da vida útil pode ser realizada através da experiência adquirida com construções iguais ou semelhantes, através da avaliação do nível de degradação dos elementos num curto período de utilização ou exposição e ainda através de ensaios de envelhecimento acelerado. A *Guideline on Durability in Buildings* (CSA, 1995), publicada no Canadá em 1995, estabelece os requisitos de integração da durabilidade em aspetos do projeto, da operação e da manutenção, descrevendo também três abordagens distintas para a previsão da vida útil: i) eficácia demonstrada ou desempenho histórico do elemento construtivo analisado; ii) modelação do processo de deterioração; iii) ensaios laboratoriais (Santos, 2010). A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) publica em 1996 o documento normativo ASTM E632-82, que sugere a realização de ensaios de degradação para a estimação da vida útil (Marques, 2016). Mais recentemente, a norma ISO 15686-2, do conjunto de normas

da série ISO 15686, especifica os princípios e os procedimentos que facilitam a previsão da vida útil dos componentes das construções, indicando também os requisitos para a condução de tais estudos (ISO, 2011). Contudo, não refere de forma concreta os métodos para tal objetivo.

A complexidade dos fenómenos de degradação, a par da falta de conhecimento pleno das consequências que geram sobre os elementos de construção, dificultam as tarefas de previsão da vida útil. No entanto, existem várias metodologias com este objetivo, que possuem diferentes características entre si.

1.5.2. Métodos para a previsão da vida útil

O desenvolvimento de modelos representativos de fenómenos reais é uma abordagem utilizada em diversas áreas. Apesar de exigirem um certo grau de entendimento das características internas dos fenómenos, a sua criação possibilita a previsão do comportamento futuro, isto é, da evolução dos fenómenos com o tempo (Babuška, 1998). No âmbito da previsão de vida útil de elementos de construção, Hovde e Moser (2004) classificam os modelos existentes em três categorias distintas: i) determinísticos; ii) estocásticos ou probabilísticos; iii) de engenharia. Em muitas publicações do mesmo âmbito, esta foi a classificação adotada para a caracterização dos métodos existentes. No entanto, trabalhos de investigação recentes sugerem outras classificações, motivadas pelo desenvolvimento de novas metodologias para a previsão da vida útil. Em particular, Silva (2015) e Silva et al. (2016a) sugerem a divisão dos vários métodos nas seguintes categorias: i) determinísticos; ii) estocásticos; iii) computacionais; iv) fatoriais.

Os métodos determinísticos têm por base o estudo dos fatores de degradação que afetam os elementos analisados, visando compreender os seus mecanismos de atuação e quantificar as funções de degradação que expressam a sua ação com o tempo (Gaspar, 2002). A facilidade de compreensão e de aplicação e a rapidez de implementação são algumas das vantagens atribuídas aos métodos determinísticos. No entanto, a excessiva simplicidade na modelação de uma realidade complexa é uma das suas grandes desvantagens (Gaspar, 2002). O método gráfico é um exemplo, que se baseia na aplicação de técnicas de análise de regressão matemáticas para o ajuste de uma função aos dados. A função é designada por curva de degradação e evidencia a evolução da degradação num elemento com o tempo.

Os modelos estocásticos ou probabilísticos diferenciam-se dos modelos anteriores por não apresentarem um valor único como estimativa da vida útil do elemento em análise. A sua utilização fornece um intervalo de possíveis valores com probabilidades de ocorrência associadas. Tal é conseguido pela inclusão de uma componente probabilística nos modelos, referente aos níveis de degradação dos elementos analisados (Chai et al., 2015). Têm como base o cálculo matricial ou probabilístico para a definição da probabilidade de ocorrência de mudanças no estado de degradação, pretendendo assim contornar as incertezas relacionadas quer com a evolução da degradação quer com outros aspetos de difícil previsão durante a fase de serviço (Bordalo et al., 2011). Apesar da relevância dos dados fornecidos, a complexidade dos modelos matemáticos utilizados e a necessidade de um grande número de dados recolhidos ao longo de muito tempo são os principais inconvenientes destes métodos (Gaspar, 2002).

Os métodos de engenharia surgiram como forma de integrar as duas categorias de métodos anteriores (Cecconi, 2002). Assim, aliam a facilidade de uso dos métodos determinísticos às formas de descrever os processos de degradação reais, com a sua variabilidade associada, tal como é efetuado através dos métodos probabilísticos. Segundo Hovde e Moser (2004), as suas principais vantagens são a facilidade de compreensão (para engenheiros), a facilidade e rapidez de aplicação e o fornecimento

de resultados realistas (mesmo perante as simplificações associadas ao processo de modelação).

Os métodos fatoriais são conhecidos pela sua utilização em estudos do domínio da previsão da vida útil de elementos de construção, por se constituírem como metodologias de fácil compreensão e aplicação. Apesar das críticas ao método, semelhantes às referidas para os métodos determinísticos, a sua adequabilidade para a obtenção de uma estimativa da vida útil é notória, e as dificuldades podem ser minoradas se a caracterização e quantificação dos fatores de degradação for feita de forma criteriosa e cuidada (Magos et al., 2016). A sua aplicação depende do conhecimento da vida útil de referência expectável do elemento analisado, que é afetada, de seguida, por um conjunto de fatores modificadores representativos das condições observadas (Marques et al., 2018).

Os métodos computacionais, uma vez que fazem parte do âmbito da presente dissertação, serão analisados com mais pormenor posteriormente, num capítulo exclusivamente a si dedicado.

1.6. Organização da dissertação

A presente dissertação apresenta a seguinte organização:

- **Capítulo 1: Introdução** - este capítulo tem um carácter introdutório e pretende abordar, de forma não exaustiva, os conceitos gerais relacionados com a vida útil, com a sua previsão e com os motivos que a justificam no contexto atual.
- **Capítulo 2: Revestimentos ETICS** - este capítulo dedica-se à descrição e caracterização, a vários níveis, dos sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior. Inicialmente, é abordada a constituição deste tipo de revestimento e são referidos os cuidados a ter aquando da sua aplicação. Posteriormente, a atenção é dada à patologia associada aos sistemas ETICS, através da descrição das suas anomalias mais comuns e dos principais fatores responsáveis à sua manifestação.
- **Capítulo 3: Trabalho de campo** - este capítulo dedica-se à descrição dos procedimentos relativos ao trabalho de campo efetuado, através de uma abordagem aos critérios de identificação e seleção de novos casos e à metodologia de levantamento de dados e de classificação de anomalias. É ainda analisada a amostra global, em termos estatísticos, bem como os resultados obtidos.
- **Capítulo 4: Modelos de degradação** - este capítulo descreve a metodologia adotada no presente estudo para a quantificação da degradação observada nos sistemas ETICS analisados. Para além disso, neste capítulo é aplicado o método gráfico para a definição de curvas de degradação, que permitem uma avaliação do padrão de degradação evidenciado pela amostra global.
- **Capítulo 5: Métodos computacionais** - este capítulo dedica-se à aplicação de métodos baseados em redes neuronais artificiais e em princípios de lógica difusa para a criação de modelos de previsão da vida útil de revestimentos ETICS. É efetuada uma descrição teórica relativa a cada um dos métodos e explicada a metodologia subjacente à construção de cada tipo de modelo.
- **Capítulo 6: Conclusões** - este capítulo enuncia as conclusões que podem ser retiradas de toda a investigação efetuada, confrontando-as com os objetivos propostos inicialmente.
- **Bibliografia** - este capítulo apresenta todas as referências bibliográficas consultadas.
- **Anexos** - este capítulo contempla os documentos complementares à investigação efetuada, cuja apresentação é relevante para a sua melhor compreensão.

2. Revestimentos ETICS

2.1. Introdução

Atualmente, o sistema ETICS é uma solução relativamente usual no que se refere ao revestimento de fachadas de edifícios correntes. A sua aplicação nas paredes exteriores é efetuada com recurso a métodos simples, e consiste na colocação sucessiva de camadas de diferentes materiais, com funções distintas, mas todas com um contributo específico para o cumprimento dos requisitos de desempenho exigidos ao sistema. A sua utilização permite mitigar problemas relacionados com o isolamento térmico insatisfatório, com a existência de infiltrações na envolvente dos edifícios ou com o aspeto degradado da sua envolvente, entre outros aspetos (Amaro et al., 2014). Contudo, tal como ocorre com todos os elementos construtivos, a exposição destes sistemas aos agentes de deterioração conduz ao aparecimento de diferentes anomalias, que têm como consequência a diminuição do seu desempenho, a vários níveis.

Tendo em conta o objetivo da presente dissertação (desenvolvimento de metodologias para a previsão da vida útil dos sistemas ETICS), é necessária uma base teórica que forneça todos os conhecimentos relevantes associados ao sistema, tanto no que respeita às suas características intrínsecas como no que se refere aos fatores que mais influenciam sua degradação. O capítulo que aqui se inicia tem esse objetivo. Inicialmente é feita a caracterização do sistema ETICS (de modo completo, mas não exaustivo), com abordagem à sua constituição e aos cuidados gerais a ter durante o seu processo de aplicação. Posteriormente, o foco é dado à classificação das anomalias a si associadas, com abordagem às suas características gerais e aos fatores potenciais que conduzem à sua manifestação.

2.2. Considerações sobre os sistemas de isolamento de paredes exteriores

Na indústria da construção, a aplicação de isolamento nas paredes exteriores dos edifícios é uma solução que permite melhorar a sua eficiência energética, uma vez que promove a redução do consumo de energia (para além de permitir uma diminuição da emissão de gases poluentes, prejudiciais para o ambiente) (Simona et al., 2017). As soluções de isolamento térmico de paredes exteriores são classificadas de acordo com a posição relativa da camada de material isolante aplicada. As categorias nas quais podem ser classificadas são: i) isolamento pelo exterior; ii) isolamento pelo interior; iii) isolamento na caixa-de-ar (apenas possível em paredes exteriores duplas). Para além destas alternativas, o isolamento térmico pode ser conferido por intermédio da utilização de blocos com características térmicas ou geométricas melhoradas (Veiga e Santos, 2009). Embora todas as soluções possuam inconvenientes, o conhecimento dessas limitações é imprescindível para que sejam adotadas as soluções mais adequadas, garantindo, assim, o cumprimento das exigências requeridas às construções.

Graças às suas vantagens, as soluções de isolamento térmico pelo exterior são adotadas em diversas situações, tanto em construção nova como em reabilitação de edifícios (Tingley et al., 2015). Nesta segunda categoria existem três tipos de soluções possíveis: i) revestimentos não isolantes independentes, com interposição de um isolante térmico na caixa-de-ar (correntemente designados por fachadas ventiladas); ii) revestimentos isolantes (que se dividem em *vêtures*, rebocos isolantes e revestimentos de espuma isolante projetada); iii) sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (o sistema ETICS propriamente dito, que, na sua forma tradicional, recebe a designação de reboco delgado armado sobre

poliestireno expandido). A eficiência e versatilidade do sistema ETICS são características que contribuem para o seu destaque em relação às restantes soluções. A utilização destes revestimentos promove o aumento da eficiência energética das construções através da melhoria do desempenho das suas envolventes, que limitam as trocas de calor com o exterior de modo mais eficiente. Para além deste aspeto, o ganho adicional de dimensão dos espaços interiores, pela ausência da necessidade de paredes duplas, e a melhoria promovida ao aspeto das fachadas (de maior interesse em contexto de reabilitação de edifícios existentes) são ainda outras vantagens associadas à utilização deste tipo de revestimento.

2.3. Caracterização dos sistemas

De modo simplificado, o sistema ETICS usualmente aplicado é composto por um isolante térmico sob a forma de placas, fixado contra o suporte, que recebe posteriormente um revestimento exterior delgado, contínuo e armado, com a eventual aplicação de um outro revestimento adicional. A aplicação de cada material é feita de forma sucessiva e por uma ordem específica, que deve ser respeitada a fim de serem garantidas as propriedades esperadas com a utilização desta solução na envolvente dos edifícios.

O suporte é a base onde é aplicado o sistema. No caso particular da sua aplicação em paredes exteriores, os tipos de suporte podem ser: i) paredes de alvenaria de pedra, tijolo ou blocos de betão (de agregados correntes ou leves); ii) paredes de betão moldado *in situ* (de agregados correntes ou leves); iii) paredes de painéis pré-fabricados de betão ou painéis de gesso; iv) madeira prensada ou *oriented strand boards* (OSB). Os suportes podem ainda encontrar-se rebocados, pintados ou revestidos por um outro material sem que isso inviabilize a aplicação destes sistemas, embora tal exija uma preparação da superfície mais cuidada (Ximenes, 2012). A aderência do sistema ao suporte é conseguida através de produtos de colagem, de fixadores mecânicos ou de ambos, como garantia de uma maior eficácia. Segundo Marques (2016), os produtos de colagem existem geralmente sobre a forma de um pó pré-doseado, ao qual se adiciona água (com ou sem necessidade posterior da adição de uma resina ligante sintética), ou sob a forma de uma pasta, já pronta ou que requer a adição de cimento Portland. No que diz respeito aos fixadores mecânicos, segundo a mesma autora (Marques, 2016), a ligação entre o suporte e o sistema pode ser feita através de ancoragens diretas (anilhas/aros e buchas de plástico de cabeça circular com pregos ou parafusos como elemento de expansão, protegidos contra a corrosão) ou através de perfis metálicos fixos ao suporte nos quais são colocadas as placas de isolante.

O material isolante é o elemento que confere as propriedades térmicas desejadas à envolvente dos edifícios. O poliestireno expandido moldado (EPS) sob a forma de placas, de espessuras variáveis consoante o comportamento térmico desejado, é o material mais utilizado. Também sobre a forma de placas, as alternativas à sua aplicação consistem em: i) EPS com adição de grafite; ii) poliestireno expandido extrudido (XPS); iii) lã mineral (MW); iv) aglomerado negro de cortiça (ICB). Das propriedades exigidas ao material isolante destacam-se a reduzida transmissão térmica, o comportamento adequado à penetração de água, a resistência ao fogo e a estabilidade dimensional (Marques et al., 2018).

A camada de base consiste numa argamassa aplicada diretamente sobre as placas de isolamento térmico, de espessura suficiente para permitir o recobrimento completo da armadura e de boas propriedades mecânicas, sobretudo a resistência à fissuração (Ximenes, 2012). As argamassas podem ser de natureza mineral (compostas por cimento e/ou areia), mista (compostas por cimento, resina e

areia) ou sintética (não sendo compostas por cimento nem outros componentes minerais). Nos sistemas colados, a camada de base é usualmente o produto utilizado para fixar as placas de isolante ao suporte (Saraiva, 2011). A armadura inserida na camada de base tem o objetivo de melhorar o seu comportamento mecânico, contribuindo para a melhoria do desempenho e para a maior durabilidade do sistema. Geralmente, são malhas quadradas de abertura entre 3 e 5 mm, constituídas por fibra de vidro, embora também possam ser de outros materiais (carbono ou aço galvanizado). As armaduras podem ser normais ou reforçadas. Nas armaduras reforçadas, o reforço é conseguido pela sobreposição de armaduras, aumentando assim as suas densidade e resistência mecânica (Ximenes, 2012).

Sobre a camada de base pode ser aplicado um primário de regularização, com a função de uniformizar a camada que vai receber o acabamento final, assegurando uma melhor aderência entre as camadas. Consiste, geralmente, numa pintura à base de resinas ou polímeros sintéticos, em solução aquosa (Marques, 2016). O acabamento final é a camada mais exterior dos sistemas e pode ser constituída por diversos tipos de materiais, que lhes confere, deste modo, aspetos diferenciados. Entre os materiais mais utilizados encontram-se as pinturas com tintas, os revestimentos plásticos espessos de ligantes sintéticos, os revestimentos de ligantes minerais ou mistos, os revestimentos de silicatos e os revestimentos descontínuos de madeira, ladrilhos cerâmicos e placas pétreas (Marques, 2016). As funções decorativas, de proteção e de estanqueidade à água são as principais propriedades exigidas.

O sistema ETICS é complementado através da utilização de diversos acessórios, promotores da sua melhor adaptação a certas singularidades das envolventes dos edifícios, de modo a que seja impedida a penetração da água nos sistemas ou que as tensões internas desenvolvidas não danifiquem os materiais (Sulakatko et al., 2017). Os de utilização mais frequente são os perfis de arranque e laterais (de alumínio ou aço inoxidável), as cantoneiras de reforço (de alumínio, aço inoxidável, fibra de vidro ou PVC) e os perfis de proteção de arestas, de cantos, de topos, de bases, de peitoris e de cobre-juntas.

Nas Figuras 2.1 e 2.2 são visíveis duas soluções de ETICS, nas quais cada componente anteriormente referido é facilmente identificável. Apesar da tendência na aplicação do sistema ETICS na sua forma tradicional, existem outras variantes também utilizadas. Segundo Amaro (2011), as de maior aplicação no território nacional são: i) sistema tradicional (composto por um isolante de poliestireno expandido moldado, em placas, uma armadura de fibra de vidro e um reboco delgado simples e rugoso como acabamento); ii) sistema reforçado (composto por uma duplicação da armadura existente no caso anterior); iii) sistema resistente (composto ainda por mais algum material que aumente a resistência mecânica); iv) sistema cerâmico (composto por revestimento cerâmico na camada de acabamento).

2.4. Condições de aplicação

Um dos fatores que mais contribui para a proliferação da utilização dos sistemas ETICS é a sua facilidade de aplicação, que é conseguida graças aos métodos simples requeridos, sem a necessidade de equipamentos especializados. No entanto, a par dos erros cometidos durante a fase de projeto ou durante a seleção dos materiais, os erros cometidos durante a fase de aplicação influenciam gravemente a qualidade do produto final (Sulakatko et al., 2017). Deste modo, a consulta de documentação técnica que especifique os cuidados a ter durante a fase de aplicação é fundamental para a garantia de um sistema com boas características, capaz de dotar os edifícios do desempenho térmico esperado.

Antes da aplicação propriamente dita, existem alguns outros trabalhos que devem ser realizados,

de modo a facilitar as etapas seguintes. Entre eles são de salientar (APFAC, 2014): i) examinação cuidadosa das fachadas onde o sistema será aplicado, com a determinação das suas características dimensionais e das dos materiais que as constituem; ii) elaboração de esquemas das fachadas, com a identificação de todas as singularidades existentes e de eventuais acessórios a serem removidos para facilitar a aplicação; iii) reunião de todo o equipamento necessário para a aplicação dos sistemas, incluindo andaimes para as zonas de difícil acessibilidade, que assegurem estabilidade e promovam a segurança dos operários; iv) reunião dos materiais constituintes do sistema a aplicar (certificados, de modo a cumprirem com as exigências a eles requeridas) e armazenamento dos mesmos em locais adequados, que promovam a garantia da sua integridade e não comprometam o seu desempenho; v) averiguação da existência de condições climáticas propícias à aplicação do sistema ou criação de proteções com esse objetivo.

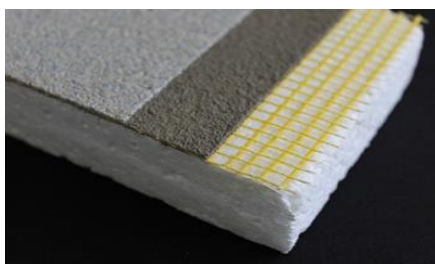


Figura 2.1 - Sistema ETICS tradicional, com EPS
(Fabrica Food Truck, 2016)

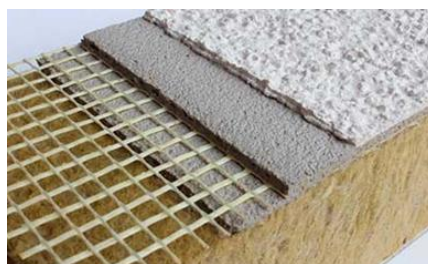


Figura 2.2 - Sistema ETICS tradicional, com MW
(Global Escolha, 2015)

A preparação do suporte é a primeira tarefa a executar e pretende garantir que o suporte reúne as condições apropriadas para a colocação sobre si do sistema de isolamento, nomeadamente planeza adequada, isenção de sujidade, partículas, poeira ou água e ausência de anomalias nos paramentos. As atividades de preparação do suporte variam em função de se tratar de uma obra nova ou de uma obra de reabilitação, do tipo de suporte existente e ainda do tipo de sistema de fixação a utilizar. No caso de obras de reabilitação, por exemplo, a preparação do suporte é mais crítica do que em obras novas e pode justificar a realização de ensaios de aderência para a comprovação da compatibilidade entre o sistema e o revestimento existente (Ximenes et al., 2014). O mesmo se passa no caso da aplicação por colagem, que implica mais cuidados do que a aplicação por fixação mecânica (Ximenes et al., 2014).

A fixação dos perfis de arranque é a tarefa seguinte e deve ser feita de forma mecânica ao substrato, com parafusos. Para além de auxiliarem o arranque dos sistemas (garantindo a horizontalidade das placas), conferem alguma proteção às suas extremidades, sobretudo contra a penetração de humidade (Amaro et al., 2014), através da sua colocação ligeiramente afastada do terreno de onde ela pode provir.

No caso da fixação das placas por colagem, o produto deve ser elaborado no momento da aplicação, respeitando o doseamento aconselhado pelo fabricante, de acordo com o próprio tipo de produto. A sua aplicação nas placas pode ser feita segundo vários métodos, designadamente de forma contínua, por ponto ou por bandas (APFAC, 2014). As placas devem ser colocadas de imediato no suporte, após esta tarefa, eventualmente complementadas com fixações mecânicas. No caso da fixação mecânica das placas, o tipo, o número e a disposição das fixações a utilizar devem ser especificados anteriormente, e a sua inserção no substrato e no isolamento deve ser efetuada de modo a que fiquem pouco salientes (Amaro et al., 2014). Neste caso, a fixação pode ser eventualmente complementada por um produto de colagem. A colocação das placas deve ser efetuada de baixo para cima e topo a topo, em fiadas horizontais e com as juntas desencontradas (Marques et al., 2018).

Após a fixação das placas, a atenção deve ser dada às singularidades existentes nas fachadas, das quais se destacam: i) cantos e arestas salientes, que requerem a aplicação de cantoneiras de reforço; ii) parapeitos de janelas, que requerem a aplicação de acessórios salientes (pingadeiras) que impeçam o escoamento de água pelos paramentos; iii) juntas de dilatação, que necessitam de serem cobertas por acessórios. Estes acessórios devem ser aplicados diretamente sobre a camada isolante.

A etapa seguinte corresponde à aplicação da camada de base sobre o material isolante (reboco armado). Esta fase não deve ser feita de uma vez só, mas sim em subcamadas e apenas após a secagem do produto de colagem. Após a aplicação da primeira camada e durante o seu estado fresco, é colocada a armadura, que deve ser sobreposta nos locais de emenda. Aquando da sua secagem, é aplicada uma segunda camada de modo a que envolva totalmente a armadura (APFAC. 2014). Quando o objetivo é a obtenção de um sistema reforçado, deve ser adicionada uma nova subcamada na qual é inserida uma nova armadura, antes da subcamada final (Amaro et al., 2014). Após a secagem desta subcamada final, quando necessário, é aplicado o primário de regularização.

O processo de aplicação termina com a colocação do revestimento final, sendo utilizados os equipamentos e os procedimentos de acordo com o tipo de revestimento pretendido.

2.5. Anomalias

A integridade dos sistemas ETICS, que garante o seu bom desempenho, é fundamental para se atingir a eficiência dos edifícios pretendida com a aplicação desta solução na sua envolvente. A presença de anomalias, pelo contrário, é um fator que coloca isto em causa. Daqui surge a necessidade da identificação, classificação e posterior correção das manifestações anómalas existentes, com vista à obtenção do nível de desempenho esperado (Amaro et al., 2013). A multiplicidade de anomalias que podem ocorrer nestes sistemas justifica a criação de sistemas classificativos, com o objetivo da sua divisão, por tipos ou grupos, de acordo com o mesmo tipo de efeitos provocados nas fachadas.

O tema relativo aos sistemas de classificação de anomalias frequentes em ETICS já foi discutido em trabalhos anteriores, dos quais se destacam Amaro et al. (2013), Ximenes et al. (2014) e Marques et al. (2018). Mais recentemente, a Tarefa 3 (Silva et al., 2017a) do Projeto FCT PTDC / ECM - COM / 5772 / 2014 - “Sistema de Gestão de Edifícios baseado na avaliação do risco e na Previsão da Vida Útil (SLPforBMS)”, tendo por base todos os trabalhos anteriores referidos, apresenta um sistema classificativo de anomalias associadas a este tipo de revestimento unificado, visível na Tabela 2.1. Na presente dissertação, a classificação das anomalias é efetuada segundo o sistema de Silva et al. (2017a).

2.5.1. Anomalias relacionadas com manchas/alterações cromáticas

Estas anomalias são facilmente identificáveis no sistema ETICS e ocorrem com elevada frequência, sendo os fatores que as originam de natureza variada. Apesar de não influenciarem diretamente a perda de propriedades de isolamento térmico, por estarem tipicamente associadas a modificações de coloração, textura ou brilho, que são propriedades de caráter visual (Amaro et al., 2013), a sua presença é frequentemente o primeiro sinal de que outras anomalias mais graves poderão surgir nos sistemas (Marques et al., 2018). As anomalias consideradas neste grupo, que se encontram visíveis na Figura 2.3, são (Silva et al., 2011; Amaro et al., 2014; Ximenes et al., 2014; Marques et al., 2018):

- sujidade e acumulação de detritos: relaciona-se com a deposição de partículas na superfície

dos revestimentos, que têm origem, por norma, em poeiras provenientes do solo ou em partículas de poluição do meio envolvente; a maior rugosidade das superfícies favorece a acumulação de partículas, tipicamente em depósitos pontuais, promovendo a manifestação destas anomalias;

- **humidade superficial:** diz respeito a manchas de fraco valor estético, induzidas pelo escoamento de água em zonas preferenciais dos revestimentos, que contribui para a acumulação de sujidades, para o desenvolvimento biológico de organismos e para a criação de marcas de escorrência;
- **alterações cromáticas:** englobam todo o tipo de manchas que podem ocorrer nestes sistemas e que, à primeira vista, não se incluem em nenhuma das restantes categorias pertencentes a este grupo de anomalias; as manchas de oxidação, resultantes da ação da água em elementos metálicos existentes nas fachadas, são um exemplo; a descoloração da tinta no caso de acabamentos com pintura, pelo envelhecimento natural ou por diferenças de tonalidade devido a erros de execução, é outro exemplo;
- **eflorescências/criptoflorescências e carbonatação:** são entendidas como depósitos cristalinos que surgem nos revestimentos (no primeiro caso à superfície e no segundo abaixo dela), devido à evaporação da água que contém sais dissolvidos; a água pode ter várias origens, entre as quais absorção capilar, infiltrações, condensações ou excesso de dosagem de água na amassadura das argamassas; a cristalização dos sais tem influência, sobretudo, na perda de aderência entre camadas;
- **biodeterioração/colonização biológica:** relaciona-se com o surgimento de microrganismos no sistema (geralmente algas, fungos e líquenes), de dimensão reduzida, mas que em grande concentração originam manchas de cor esverdeada ou mais escura; a presença de humidade superficial, a orientação preferencial a Norte e a exposição ao vento são fatores que geram o agravamento desta situação;
- **vegetação parasitária:** diz respeito à fixação de ervas daninhas ou de plantas trepadeiras nos revestimentos; a sua ocorrência é menos comum do que a de colonização biológica; embora a presença destas plantas apenas tenha consequências iniciais de cariz estético, com o seu desenvolvimento, as raízes podem penetrar no sistema e exercer uma influência negativa na sua funcionalidade.



Figura 2.3 - Exemplos ilustrativos de anomalias do tipo manchas/alterações cromáticas

Tabela 2.1 - Sistemas de classificação de anomalias frequentes em ETICS (Silva et al., 2017a)

Sistema de classificação de grupos de anomalias de Ximenes et al. (2014)	Sistema de Classificação de anomalias unificada presente na Tarefa 3 (adaptado de Silva et al., 2017)
Manchas / alterações cromáticas	A-A3 - sujidade e acumulação de detritos
	A-A2 - humidade superficial
	A-A4 - alterações cromáticas
	A-B3 - eflorescências / criptoflorescências e carbonatação
	A-B1 - biodeterioração / colonização biológica A-B2 - vegetação parasitária
Em juntas	A-C7 - empeno, inchamento, deformações e outras deficiências de planeza
Perda de continuidade / integridade	A-C2 - fissuração orientada
	A-C1 - fissuração mapeada
	A-D1 - defeitos nos remates
Perda de aderência	A-B4 - empolamento / abaulamento e bolhas
	A-C5 - desgaste ou descolamento do acabamento
	A-C10 - descolamento
	A-C8 - lacuna de material / perfuração

2.5.2. Anomalias em juntas

Tendo em conta que a aplicação do revestimento é feita troço a troço e não de uma só vez, a consequente existência de juntas é um fator que propicia a manifestação destas anomalias, caracterizadas por heterogeneidades de planeza facilmente identificáveis, através de desníveis na superfície das placas, nas subcamadas do sistema ou na camada de acabamento (Amaro et al., 2013). Geralmente, não apresentam uma influência muito grave no que respeita o funcionamento do sistema, mas têm influência ao nível estético e, entre outros problemas, podem conduzir a uma eventual facilidade na acumulação de detritos, com as consequentes desvantagens. As principais anomalias consideradas neste grupo, visíveis na Figura 2.4, são (Amaro et al., 2013; Marques et al., 2018):

- empeno, inchamento, deformações e outras deficiências de planeza: a visualização das juntas entre as placas de material isolante através da camada de acabamento é um dos vários exemplos que se inserem nesta categoria; tal situação surge devido ao empolamento ou à falta de estabilidade dimensional das placas, e é agravada, por sua vez, pela reduzida espessura da camada de acabamento.



Deficiências de planeza em juntas

Figura 2.4 - Exemplos ilustrativos de anomalias em juntas

2.5.3. Anomalias por perda de continuidade/integridade

As anomalias desta categoria caracterizam-se por levarem à rotura dos materiais constituintes dos sistemas, superficialmente (se afetarem apenas a camada de revestimento superficial) ou em profundidade (se afetarem camadas mais profundas, eventualmente até ao suporte). O seu aparecimento pode prejudicar o desempenho dos sistemas em termos de eficiência térmica (Ximenes et al, 2014). As suas causas são variadas, embora derivem sobretudo de erros na fase de conceção do projeto, na fase

de execução ou na fase de utilização (Amaro et al, 2013). Podem potencializar a ocorrência de outras anomalias como o destacamento, o deslocamento e a queda de material. As principais anomalias consideradas neste grupo, visíveis na Figura 2.5, são (Amaro et al, 2013; Ximenes et al, 2014):

- fissuração: engloba duas tipologias distintas, facilmente identificáveis (orientada e mapeada); a sua presença nos revestimentos é indesejada uma vez que permite a entrada de água, que contribui diretamente para a aceleração da degradação; a insuficiência de armadura em locais de concentração de esforços, o uso de materiais pouco adequados ou termicamente incompatíveis e os movimentos estruturais ou impactos imprevisíveis são fatores que induzem o aparecimento de fissuração;
- defeitos nos remates: dada a elevada fragilidade dos cantos salientes dos revestimentos a ações mecânicas, devem ser utilizados elementos de reforço complementares, como cantoneiras metálicas; no entanto, nelas podem surgir alguns tipos de anomalias, como por exemplo fissuração, que pode evoluir e conduzir à queda de material; os erros de execução e a utilização de materiais pouco adequados ou com fraca compatibilidade térmica costumam estar na origem destas anomalias.



Fissuração orientada

Fissuração mapeada

Defeitos nos remates

Figura 2.5 - Exemplos ilustrativos de anomalias de perda de continuidade/integridade

2.5.4. Anomalias por perda de aderência

Comparativamente a outros tipos de revestimentos de paredes exteriores, os sistemas ETICS apresentam maior propensão à ocorrência de anomalias de perda de aderência. Dada a sua constituição por camadas sucessivas de diferentes materiais, existe um maior número de interfaces onde a falta de aderência pode surgir. As principais anomalias consideradas neste grupo, visíveis na Figura 2.6, são (Amaro et al., 2013; Ximenes et al., 2014; Marques et al., 2018):

- empolamento/abaulamento e bolhas: estão normalmente associadas à existência de humidade superficial na camada de acabamento, que se infiltra no sistema e leva à dessolidarização da camada superficial, pela formação de empolamentos; todos os fatores que conduzam à presença de mais quantidade de água do que a necessária na camada de acabamento podem ter influência na maior propensão para o aparecimento desta anomalia, que pode evoluir e dar origem a outras anomalias;
- desgaste ou destacamento do acabamento: têm como característica a dessolidarização total do material superficial dos revestimentos, o que conduz à sua queda; em sistemas tradicionais corresponde ao destacamento da argamassa de recobrimento e tem implicações graves na sua funcionalidade; a utilização de materiais não homologados e a aplicação deficiente do sistema, em condições pouco adequadas ou com espessuras insuficientes, são fatores que promovem a ocorrência deste tipo de problema;
- descolamento: ocorre quando há uma perda de ligação entre os elementos do sistema; pode dar-se de forma parcial, em zonas reduzidas, pela dessolidarização entre o sistema e o suporte ou a camada de base e o isolamento, ou de forma generalizada, em zonas muito abrangentes; para além das causas

que levam ao destacamento do acabamento, na ocorrência desta anomalia também tem elevada influência a má preparação e limpeza do suporte, que impede a obtenção de uma boa aderência;

- lacuna de material/perfuração: correspondem a anomalias associadas a perfurações ou impactos (acidentais ou intencionais) no sistema, com objetos rígidos; têm como resultado roturas localizadas que afetam várias camadas do sistema; a resistência ao choque limitada do sistema ETICS é um fator que contribui para a manifestação desta anomalia, em especial nas zonas acessíveis dos edifícios.



Figura 2.6 - Exemplos ilustrativos de anomalias de perda de aderência

2.6. Causas prováveis das anomalias

As dificuldades inerentes à compreensão dos processos de degradação do sistema ETICS devem-se, em grande parte, à dificuldade da avaliação das causas das anomalias. Por norma, o seu desenvolvimento deve-se à combinação de vários fatores que, atuando simultaneamente ou não, conduzem ao agravamento progressivo da degradação e à consequente perda de desempenho (Amaro et al, 2013). A complexidade do estudo da patologia associada a este revestimento é acrescida, desta forma, por esta ramificação de ligações na cadeia causa-efeito das diferentes manifestações anómalas.

Os fatores preponderantes para a presença de anomalias podem ser agrupados da seguinte forma (Marques, 2016): i) fatores associados a ações ambientais; ii) fatores relacionados com as características dos edifícios; iii) fatores relacionados com as características dos materiais; iv) erros de projeto, execução e utilização; v) fatores associados a outras causas. Na presente dissertação, a modelação da degradação do sistema ETICS é efetuada a partir de fatores associados aos dois primeiros grupos, essencialmente. A dificuldade em modelar eventos discretos (não modeláveis ao longo do tempo) e fatores de degradação que não visíveis em trabalho de campo, leva a que, apesar da sua importância, os fatores relacionados com as características dos materiais e os erros de projeto, execução e utilização, não sejam analisados em detalhe.

2.6.1. Fatores associados a ações ambientais

As ações ambientais são de origem natural, independente da ação humana, e levam à ocorrência de fenómenos de origem física ou química no sistema ETICS. Segundo Marques et al. (2018), são extremamente relevantes para a degradação do desempenho dos sistemas. Os fatores que pertencem a este grupo são (Amaro et al., 2014; Barreira e Freitas, 2013; Magos et al., 2016; Ximenes et al., 2014):

- ação da água: está diretamente ligada à manifestação das anomalias mais comuns do sistema ETICS, de natureza cromática ou estética, embora possa induzir o desenvolvimento de outros tipos de anomalias; a água surge de várias fontes (precipitação atmosférica, ascensão por capilaridade, condensações superficiais ou escorrência de outros locais, por exemplo) e a deterioração causada pela sua ação tanto pode ser sentida na superfície dos revestimentos como no seu interior;

- ação da temperatura: os gradientes térmicos provocados nos sistemas, sobretudo devido à radiação solar, levam ao desenvolvimento de tensões que propiciam fenômenos de rotura das superfícies; as anomalias de perda de continuidade ou de aderência são as que mais evoluem com esta causa;
- ação da radiação solar: as anomalias associadas a alterações cromáticas ou ao desgaste do acabamento são diretamente influenciadas por esta causa; ao longo do tempo, a deterioração do aspeto das fachadas, em termos da coloração ou da sua aparência fragilizada, é potenciada pela ação da luz solar; a exposição à luz também pode propiciar o desenvolvimento biológico;
- ação do vento: o vento é um dos principais meios de transporte de partículas, que se podem fixar nos revestimentos; o tipo de anomalia gerado depende do elemento transportado; embora as alterações cromáticas sejam as mais frequentes, se as partículas tiverem sais dissolvidos, a sua cristalização pode gerar anomalias de perda de aderência, com implicações mais graves que as anteriores;
- ações de origem biológica: a sua influência traduz-se, de maneira geral, em alterações de coloração; no entanto, podem ser outras as anomalias associadas, como é o caso da perda integridade do sistema, gerada pela pressão de penetração exercida pelas plantas.

2.6.2. Fatores relacionados com as características dos edifícios

As características dos edifícios que mais condicionam a degradação dos seus revestimentos são (Ximenes et al., 2014; Marques et al., 2018; Chai et al., 2015):

- tipo de envolvente: as características da zona envolvente dos edifícios afetam os sistemas de modos distintos; em zonas urbanas, a menor exposição à radiação solar (devido à atmosfera poluída ou a barreiras à passagem de luz) propicia o desenvolvimento biológico; em zonas marítimas, a ação de partículas ricas em sais conduz aos problemas já referidos na ação do vento; em zonas industriais, as partículas em suspensão geram anomalias cromáticas, em função da rugosidade dos acabamentos;
- orientação: as orientações a norte e a oeste aumentam a suscetibilidade à presença de humidade (mais grave segundo a direção norte), pela menor incidência de radiação solar e pela maior sujeição à ação do vento, o que propicia o desenvolvimento biológico; a orientação a sul, que favorece a exposição solar, tem como inconveniente a ocorrência de elevados gradientes térmicos, que se associam aos problemas referidos na ação da temperatura; a incidência de radiação solar também conduz à degradação do aspeto das fachadas, em termos de coloração, causando o seu envelhecimento acelerado;
- idade: qualquer material está sujeito à ação do tempo, que causa a perda progressiva das suas propriedades; a propensão ao aparecimento de anomalias, de qualquer tipo, é influenciada pela idade.

2.7. Conclusão

Os revestimentos de fachadas do tipo ETICS têm ganho espaço crescente no seio das soluções de isolamento térmico de edifícios. As propriedades que conferem às fachadas adequam-se às exigências relativas aos espaços interiores habitados e às preocupações energéticas e ambientais em voga. Dada a sua constituição, os cuidados a ter durante as fases de projeto, conceção e utilização são imperativos para a garantia de um bom desempenho dos sistemas. O desrespeito por estes princípios, a par dos efeitos inevitáveis da ação do tempo e de outros fatores, de natureza ambiental ou fruto da ação humana, conduz ao agravamento da degradação dos revestimentos. Deste modo, o cumprimento das exigências funcionais dos sistemas é posto em causa e o valor da sua vida útil sofre uma redução.

3. Trabalho de campo

3.1. Introdução

A investigação desenvolvida na presente dissertação teve por base um extenso trabalho de campo, que permitiu a recolha de informação essencial para o desenvolvimento dos modelos de previsão da vida útil de ETICS. O trabalho de campo consistiu na avaliação de edifícios, nas suas condições reais de ocupação e utilização, apenas com recurso de métodos empíricos (inspeções visuais). Apesar das limitações associadas a estes métodos, alguns autores (Grant et al., 2014; Galbusera et al., 2014) referem que as informações recolhidas por esta via são adequadas para a criação de modelos de previsão de vida útil, sendo o seu rigor tanto maior quanto maior o rigor durante os procedimentos de recolha de informação.

O presente capítulo inicia-se com a descrição da metodologia subjacente ao trabalho de campo, com referência à ficha de inspeção e diagnóstico utilizada nesta fase e às escalas de degradação adotadas para a classificação das anomalias detetadas nos revestimentos. De seguida, é efetuada uma análise à investigação anterior sobre a previsão da vida útil do sistema ETICS, da autoria de Marques et al. (2018), com foco na sua amostra e nos resultados obtidos. Por fim, é efetuada uma caracterização da amostra global desta investigação, sendo apresentados os resultados da sua análise estatística, com ênfase nas características dos edifícios e nas anomalias neles existentes (em quantidade e em nível de degradação).

3.2. Objetivos

O principal objetivo do trabalho de campo foi o levantamento *in situ* de todas as variáveis relevantes para a modelação do processo de degradação associado ao sistema ETICS. Com a consideração destas variáveis, tornou-se possível a aplicação de metodologias distintas de previsão de vida útil, que permitiram a análise da evolução da degradação deste tipo de revestimento em função do tempo.

O trabalho de campo consistiu na realização de inspeções visuais a um conjunto de edifícios, todos eles com o sistema ETICS aplicado na sua envolvente, e visou o registo do estado de degradação por eles manifestado no momento da inspeção, no que se refere às anomalias visíveis e à sua gravidade aparente. Para tal, foram utilizados procedimentos simples e não intrusivos, de modo a facilitar as inspeções. Esta opção, tal como refere Marques (2016), leva à não exigência de competências específicas a quem conduz as atividades de inspeção e a que não seja causado prejuízo aos edifícios inspecionados.

As inspeções não foram realizadas com vista à obtenção de um levantamento exaustivo e detalhado de todas as anomalias verificadas nas fachadas dos edifícios. Pelo contrário, o objetivo residiu apenas na recolha das manifestações anómalas com relevância para a modelação dos processos de degradação, ou seja, que não estivessem associadas a fenómenos pontuais ou acidentais. Anomalias deste tipo, uma vez que não apresentam variação gradual ao longo do tempo, não são modeláveis (Marques et al., 2018).

Após o tratamento estatístico dos dados recolhidos e da quantificação da degradação apresentada pelas fachadas inspecionadas, tornou-se possível a definição de curvas de degradação (apresentadas no capítulo 4), tradutoras da evolução da degradação sofrida pelo sistema ETICS ao longo do tempo. Paralelamente, também se tornou possível a aplicação de métodos computacionais para a criação de modelos do mesmo tipo (apresentados no capítulo 5). Ambos os procedimentos, por sua vez, permitiram a obtenção de estimativas do valor de vida útil a esperar desta solução de revestimento.

3.3. Metodologia de investigação

A elevada importância do trabalho de campo exigiu a sua realização de modo rigoroso, desde o momento inicial, a fim de não condicionar a adequabilidade dos dados para a sua utilização posterior. Embora a realização das inspeções visuais aos edifícios seja considerada preponderante em investigações deste âmbito, por ser o procedimento que possibilita a recolha dos dados, também são requeridos alguns procedimentos prévios, sem os quais a realização das inspeções é dificultada. Contudo, todos estes procedimentos inserem-se em duas fases principais: i) planeamento do trabalho de campo; ii) recolha de informação.

O planeamento do trabalho de campo, que se constituiu como a fase inicial, incluiu os aspetos referentes à identificação e seleção dos casos de estudo a analisar, para a constituição de uma amostra. As características associadas aos revestimentos com ETICS, aos edifícios nos quais eles estavam aplicados e às suas zonas envolventes auxiliaram no processo de seleção dos novos casos. Desta forma, foi possível assegurar heterogeneidade à amostra escolhida, no que diz respeito a todas as variáveis relevantes para a modelação dos processos de degradação dos sistemas. Nesta fase também foi definida a metodologia a adotar durante o processo de recolha de informação, de forma criteriosa, e foram identificados todos os recursos técnicos necessários para a sua execução.

A recolha de informação constituiu-se como a fase seguinte. Em primeiro lugar, envolveu a obtenção de informação prévia, com o objetivo de reunir aspetos sobretudo de caráter qualitativo, que permitiram a caracterização inicial de cada caso de estudo. De forma objetiva, visou a reunião de dados como a idade dos revestimentos, os atributos gerais dos edifícios e outros considerados relevantes. Em segundo lugar, a recolha de informação baseou-se na realização das inspeções visuais, com o objetivo de serem levantados aspetos referentes aos casos de estudos sobretudo de caráter quantitativo (as características dos revestimentos ETICS e as anomalias neles observadas, tanto em extensão como em gravidade).

Todos os dados foram registados numa ficha de inspeção e diagnóstico, sistematizadora deste procedimento. Complementarmente, também foi efetuado o registo fotográfico de todas as anomalias detetadas, de modo a que as suas respetivas áreas pudessem ser quantificadas, numa fase seguinte.

Os materiais utilizados durante a fase correspondente ao trabalho de campo foram: i) fita métrica (para a medição de elementos de referência); ii) bússola (para a determinação da orientação das fachadas); iii) máquina fotográfica (para o levantamento fotográfico dos revestimentos); iv) binóculos (para uma melhor apreciação das anomalias em locais elevados das fachadas); v) materiais de escrita (para o preenchimento da ficha de inspeção e para a criação de esboços).

Um dos cuidados a ter durante o levantamento fotográfico foi a minimização da distorção das fachadas nas fotografias, de modo a que a posterior medição das áreas conduzisse aos seus valores reais. Para tal, foi utilizado o *software* GIMP® para ortogonalizar as fotografias recolhidas, corrigindo assim a sua perspetiva, como se ilustra na Figura 3.1. Para além do registo fotográfico, foram efetuados desenhos esquemáticos das fachadas, com a respetiva localização das anomalias nelas presentes. A quantificação das áreas das fachadas e das anomalias foi efetuada através do *software* AutoCAD®.

3.3.1. Ficha de inspeção e diagnóstico

A principal função da ficha de inspeção e diagnóstico é a sistematização da caracterização e da recolha de dados (Amaro et al., 2014), o que permite aumentar a eficácia dos procedimentos realizados

durante o trabalho de campo. A sua constituição engloba tipicamente duas partes: a primeira pretende reunir todas as informações que digam respeito aos edifícios e às suas fachadas, bem como ao espaço envolvente; a segunda pretende reunir, para cada fachada, as anomalias observadas, descrevendo a sua tipologia e registando a sua extensão e gravidade. Assim, ao passo que a primeira parte visa garantir a posse de todos os dados relevantes para a análise da influência dos vários fatores na diminuição do desempenho dos revestimentos, a segunda parte visa garantir a posse de todos os parâmetros necessários para a caracterização das anomalias, em gravidade e extensão, para uma quantificação concreta da degradação existente. Este documento contém todos os parâmetros necessários para uma adequada definição do nível de degradação global das fachadas, em função dos fatores mais pertinentes.

À semelhança do sistema classificativo de anomalias adotado, também a ficha de inspeção utilizada na fase de trabalho de campo surgiu a partir da Tarefa 3 (Silva et al., 2017a). Ela foi o resultado da agregação das fichas de inspeção e diagnóstico utilizadas em trabalhos de investigação anteriores associados ao sistema ETICS, da autoria de Amaro et al. (2014), Ximenes et al. (2014) e Marques et al. (2018). A ficha apresenta os seguintes grupos: i) condições climáticas na altura da inspeção; ii) edifício; iii) características de exposição ambiental; iv) manutenção; v) observações; vi) anomalias. A ficha pode ser consultada no Anexo 1, no qual podem ser vistos os seus vários campos de preenchimento.

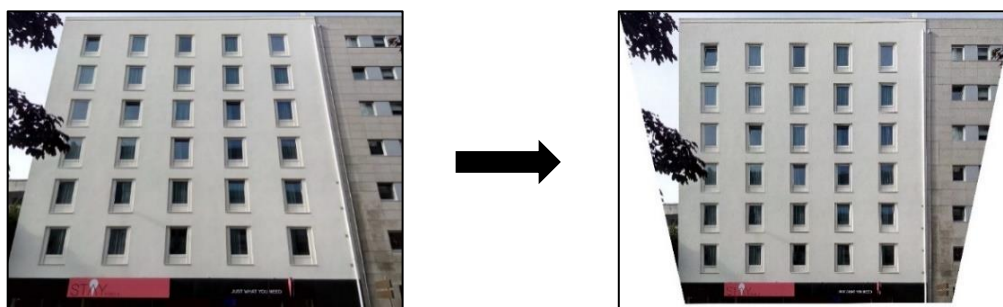


Figura 3.1 - Exemplo ilustrativo da correção de perspectiva das fotografias com recurso ao *software* GIMP®



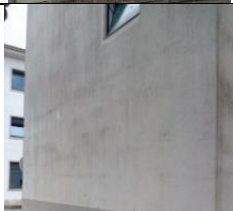

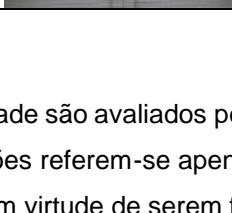
3.3.2. Classificação das anomalias e quantificação dos níveis de degradação

A etapa correspondente ao levantamento de dados, através das inspeções visuais, foi sucedida por uma etapa de processamento da informação recolhida, no que diz respeito à classificação das anomalias detetadas e à definição dos seus níveis de degradação. A classificação das anomalias foi efetuada de acordo com o sistema classificativo referido no subcapítulo 2.5. A definição prévia dos grupos de anomalias é um procedimento que facilita tanto o levantamento das anomalias como o seu tratamento, permitindo agrupar as anomalias segundo os seus efeitos, frequência e gravidade (Ximenes et al., 2014).

A quantificação dos níveis de degradação foi realizada pela comparação de cada anomalia identificada em cada caso de estudo com escalas ou padrões visuais de referência. O sistema de definição do nível de degradação adotado neste trabalho de investigação foi o mesmo aplicado por Marques et al. (2018), desenvolvido por Ximenes (2012) com base nos trabalhos de Gaspar (2002) e Gaspar e de Brito (2005). Os tipos e características das anomalias e as áreas por si afetadas são os critérios nos quais este sistema se baseia, que define cinco patamares de degradação distintos, desde o nível 0 (sem degradação visível) até ao nível 4 (degradação generalizada) (Tabela 3.1). Cada grupo de anomalias possui a sua respetiva escala de degradação (visíveis nas Tabelas 3.2 a 3.5), nas quais é apresentada uma descrição simples das características das manifestações anómalas que em cada nível geralmente se verificam.

Em cada grupo de anomalias, o nível de gravidade que a um nível de degradação está associado também tem de corresponder ao nível de gravidade, de qualquer outra escala, associado a esse nível de degradação. Por este motivo, uma vez que as anomalias resultantes de perda de aderência são mais graves de que anomalias de outra natureza, a sua escala de níveis de degradação transita automaticamente do nível 0 para o nível 2 (Ximenes et al., 2014). À semelhança da investigação de Marques et al. (2018), também é considerada a simplificação do não estabelecimento de relações de interdependência entre as várias anomalias, o que possibilita a análise de cada uma de modo individual.

Tabela 3.1 - Escala para de definição dos níveis de degradação das anomalias (adaptado de Marques, 2016)

Nível	Intensidade das alterações	Exemplo de referência
0	Aspeto inalterado	
1	Alterações pouco perceptíveis (cerca de 10,8% da área da fachada)	
2	Intensidade ligeira (cerca de 58% da área da fachada)	
3	Intensidade moderada	
4	Degradação generalizada	

3.3.2.1. Anomalias de perda de integridade

Os níveis de degradação das anomalias de perda de integridade são avaliados pela comparação com os padrões de referência existentes na Tabela 3.2. Tais padrões referem-se apenas aos aspetos destas anomalias relativos à sua abertura, padrão e intensidade, em virtude de serem facilmente identificáveis sem recurso a equipamentos ou técnicas especializadas. Para a determinação de outras características (entre elas a profundidade ou o grau de estabilização da abertura) teriam de ser empregues outros recursos que aumentariam a complexidade da realização das inspeções visuais.

As anomalias do tipo fissuração (orientada ou mapeada) contemplam todos os níveis de degradação, uma vez que a sua influência na promoção da degradação dos revestimentos é elevada (permitem a entrada de água e a retenção de ar ou sujidade, o que potencia o desenvolvimento de outras anomalias) (Marques, 2016). Para a estimação da gravidade destas anomalias que ocorram em zonas

elevadas da fachada, é utilizado o seguinte critério, também seguido por Marques et al. (2018):

- Fissuras de abertura inferior a 0,2 mm - visíveis a uma distância inferior a 2 m;
- Fissuras de abertura superior a 0,2 mm - visíveis a uma distância superior a 2 m.

As anomalias do tipo defeitos nos remates apenas contemplam os níveis 1 e 2, respetivamente quando se verifica fissuração ou destaque de material nos remates do sistema ETICS.

Tabela 3.2 - Níveis de degradação para anomalias de perda de integridade (adaptado de Marques, 2016)

Níveis de degradação	Caraterização das anomalias e intensidade das alterações		Abertura [mm]
Nível 0	Não apresenta degradação visível		-
Nível 1	Fissuração (orientada ou mapeada)	Muita ou pouca intensidade	< 0,2
	Defeitos nos remates (fissuração)		-
Nível 2	Fissuração (orientada ou mapeada)	Muita ou pouca intensidade	> 0,2
		Intensidade moderada	< 0,2
	Defeitos nos remates (destaque do material)		-
Nível 3	Fissuração (orientada ou mapeada)	Intensidade moderada	> 0,2
		Intensidade muito elevada	< 0,2
Nível 4	Fissuração (orientada ou mapeada)	Intensidade muito elevada	> 0,2

3.3.2.2. Anomalias do tipo manchas ou alterações estéticas

Os níveis de degradação das anomalias do tipo manchas ou alterações estéticas são avaliados a partir da comparação com os padrões de referência existentes na Tabela 3.3. Essencialmente, tais padrões referem-se à intensidade com a qual estas anomalias se manifestam nos revestimentos, gerando assim diferentes perceções visuais, correspondentes a diferentes níveis de gravidade.

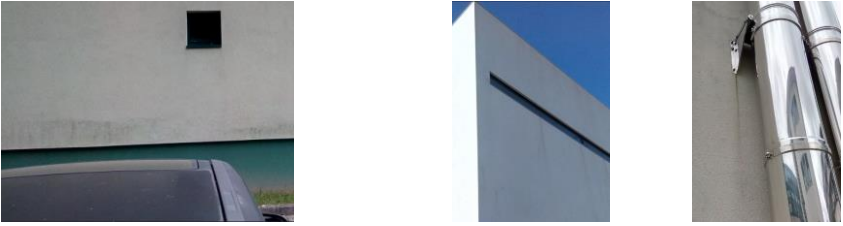

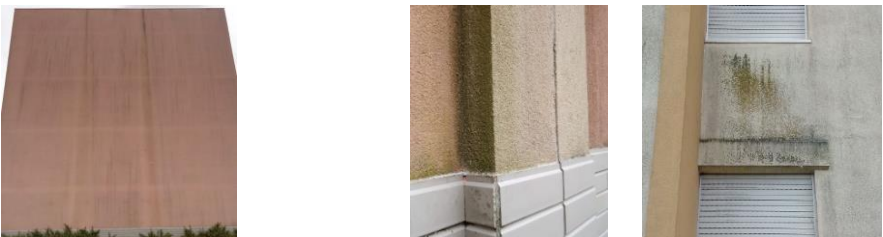

As anomalias de sujidade e acumulação de detritos apenas contemplam o nível 1 de gravidade, pois associam-se tipicamente a depósitos pontuais de sujidade, de dimensão mais reduzida (Marques, 2016). Por sua vez, as anomalias que derivam de alterações cromáticas dos revestimentos, correspondem apenas aos níveis 1 e 2 de gravidade. As anomalias de biodeterioração/colonização biológica, vegetação parasitária e eflorescências/criptoflorescências apenas contemplam níveis de gravidade de degradação iguais ou superiores a 2, devido à sua maior gravidade relativamente às outras anomalias pertencentes a este grupo (a sua presença pode contribuir para uma evolução mais rápida da deterioração).

3.3.2.3. Anomalias de perda de aderência

Os níveis de degradação das anomalias de perda de aderência são avaliados a partir da comparação com os padrões de referência existentes na Tabela 3.4. Tais padrões referem-se aos aspetos destas anomalias relativos à sua quantidade e dimensão, previamente limitados de modo a que a sua avaliação durante o trabalho de campo pudesse ser realizada de uma forma expedita.

As anomalias do tipo empolamento/abaulamento e bolhas contemplam os níveis 2, 3 e 4 de gravidade de degradação. A transição diretamente para o nível 2 é justificada, tal como foi referido anteriormente, pela maior gravidade que uma anomalia deste tipo tem quando comparada com uma anomalia de qualquer outro grupo (segundo Marques (2016), as anomalias pertencentes a este grupo são consideradas como as mais condicionantes para a durabilidade dos revestimentos). As anomalias do tipo destacamento contemplam apenas os níveis 3 e 4 de gravidade de degradação, em virtude de se revelarem ainda mais críticas do que as anomalias do tipo anterior (o destaque de material possibilita a entrada direta de água e outras partículas para o interior dos sistemas, o que naturalmente acelera o processo de degradação).

Tabela 3.3 - Níveis de degradação para anomalias do tipo manchas ou alterações estéticas (adaptado de Marques, 2016)

Níveis de degradação	Caraterização das anomalias	Intensidade das alterações
Nível 0	Não apresenta degradação visível	-
Nível 1	Sujidade e acumulação de detritos Humidade superficial Alterações cromáticas	Ligeira ou alterações pouco perceptíveis
		
	Acumulação de detritos ligeira Humidade superficial ligeira Alteração cromática ligeira	
Nível 2	Humidade superficial Alterações cromáticas	Moderada ou bastante perceptível
	Eflorescências / criptoflorescências Biodeterioração / colonização biológica Vegetação parasitária	Ligeira ou alterações pouco perceptíveis
		
	Humidade superficial moderada Alteração cromática moderada Biodeterioração ligeira	
Nível 3	Humidade superficial	Elevada ou alterações pronunciadas
	Eflorescências / criptoflorescências Biodeterioração / colonização biológica Vegetação parasitária	Moderada ou bastante perceptível
		
	Humidade superficial elevada Biodeterioração moderada e bastante perceptível	
Nível 4	Humidade superficial	Muito elevada ou alterações muito pronunciadas
	Biodeterioração / colonização biológica Vegetação parasitária	Elevada ou alterações pronunciadas
		
	Humidade superficial muito elevada Biodeterioração elevada, com alterações pronunciadas	

3.3.2.1. Anomalias nas juntas

Os níveis de degradação das anomalias nas juntas entre as placas de isolamento térmico são avaliados a partir da comparação com os padrões de referência existentes na Tabela 3.5. Tais padrões

referem-se às características apresentadas por estas anomalias, de modo particular no que se refere à intensidade das deficiências de planeza identificadas visualmente nas juntas.

A existência de juntas em revestimentos de edifícios com ETICS é uma inevitabilidade, uma vez que a utilização de isolamento térmico em forma de placas a elas conduz. Assim, a possibilidade do aparecimento de problemas relacionados com a planeza das superfícies é elevada, o que faz com que este tipo de anomalias seja específico destes revestimentos. Irregularidades na superfície entre placas ou o empolamento das mesmas são manifestações anómalas que se inserem neste grupo, e que promovem uma maior distinção visual das juntas. A maior propensão à fixação de sujidade e à escorrência de água nestas zonas (propícia ao desenvolvimento biológico), agrava também esta distinção visual.

As anomalias pertencentes a este grupo contemplam todos os níveis de degradação exceto o último, uma vez que os seus efeitos têm um cariz estético, não tão grave quanto outros tipos de anomalias.

Tabela 3.4 - Níveis de degradação para anomalias de perda de aderência (adaptado de Marques, 2016)

Níveis de degradação	Caraterização das anomalias	Quantidade e dimensão dos efeitos
Nível 0	Não apresenta degradação visível	-
Nível 2	Empolamento / abaulamento	Pouca quantidade e maior dimensão inferior a 15 cm
Nível 3	Empolamento / abaulamento	Pouca quantidade e maior dimensão superior a 15 cm
		Quantidade moderada e maior dimensão inferior a 15 cm
	Destacamento	Pouca quantidade e maior dimensão inferior a 15 cm
Nível 4	Empolamento / abaulamento	Quantidade moderada e maior dimensão superior a 15 cm
		Padrão denso (qualquer dimensão)
	Destacamento	Pouca quantidade e maior dimensão superior a 15 cm
		Padrão denso e moderado (qualquer dimensão)

Tabela 3.5 - Níveis de degradação para anomalias nas juntas (adaptado de Marques, 2016)

Níveis de degradação	Caraterização das anomalias e intensidade das alterações	Intensidade das alterações
Nível 0	Não apresenta degradação visível	-
Nível 1	Visualização de juntas entre as placas por problemas resultantes de deficiências de planeza	Intensidade ligeira ou alterações pouco perceptíveis
Nível 2	Visualização de juntas entre as placas por problemas resultantes de deficiências de planeza	Intensidade moderada ou com alterações bastante perceptíveis
Nível 3	Visualização de juntas entre as placas por problemas resultantes de deficiências de planeza	Intensidade elevada ou com alterações pronunciadas

3.4. Análise da investigação de Marques et al. (2018)

3.4.1. Caraterização da amostra de Marques et al. (2018)

Na sua investigação, Marques et al. (2018) teve como objeto de estudo uma amostra constituída por 264 fachadas, provenientes de edifícios estudados em trabalhos anteriores, da autoria de Marques (2016) e Ximenes (2012), e de novos edifícios selecionados. Os edifícios localizavam-se em zonas distintas do país e todos foram alvo de inspeção, o que permitiu o levantamento das anomalias neles existentes e dos restantes fatores com influência na degradação sofrida pelos revestimentos ETICS.

As necessidades a serem satisfeitas pela nova amostra, que se traduzem em novos casos de estudo a inspecionar, são determinadas a partir da quantificação e avaliação dos casos de estudo da amostra de Marques et al. (2018). Cada caso de estudo refere-se a uma fachada com determinadas características que a distinguem das restantes, inclusivamente das pertencentes a um mesmo edifício. Por terem sido as variáveis consideradas na investigação de Marques et al. (2018), a análise da sua

amostra é efetuada com base na idade dos revestimentos, nas características próprias dos sistemas e nas características das zonas envolventes. Estas variáveis foram selecionadas de acordo com os fatores mais relevantes para a durabilidade dos revestimentos, referidos pela norma ISO 15868 (ISO, 2011).

A Figura 3.2 apresenta a distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em relação à idade. Na presente dissertação, a idade dos revestimentos é entendida como o número de anos após aplicação ou reparação generalizada no sistema até à data da inspeção. A amostra revela maior número de revestimentos com idades de 5 a 9 anos e de 15 a 19 anos, o que evidencia um desequilíbrio entre as classes admitidas. Dada a grande importância intuitivamente atribuída à idade, na evolução da degradação, este fator será relevante para a quantificação de casos de estudo necessários na nova amostra.

Relativamente à zona envolvente, as características pertencentes a este grupo identificadas como relevantes no processo de degradação do sistema ETICS são: i) orientação das fachadas; ii) proximidade do mar; iii) ação conjunta da chuva e do vento; iv) exposição à humidade e aos poluentes.

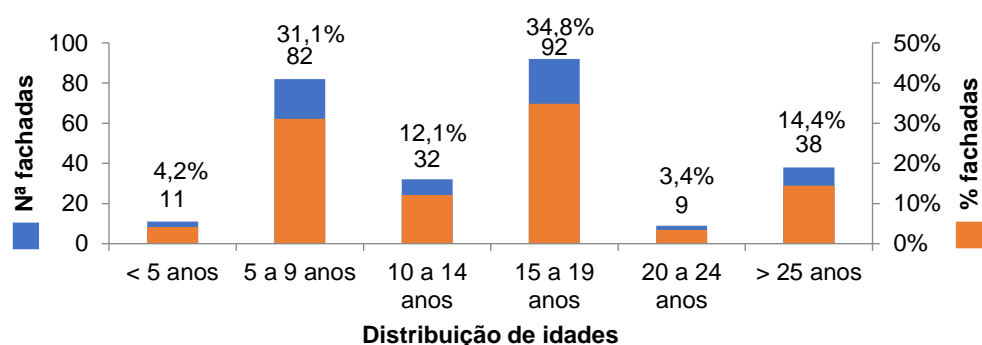


Figura 3.2 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) por idades (número de fachadas e percentagem)

A Figura 3.3 representa a distribuição da amostra em termos da orientação das fachadas, que revela uma boa distribuição dos casos pelas orientações principais (embora a orientação sul apresente um número de revestimentos ligeiramente inferior). As orientações secundárias, por sua vez, revelam globalmente um número mais reduzido de casos. As curvas de degradação de Marques et al. (2018) com a orientação como variável explicativa, resultantes da aplicação do método gráfico à amostra utilizada na sua investigação, apresentam coeficientes de determinação elevados, embora não traduzam bem a realidade física expectável: seria de esperar uma evolução da degradação segundo as orientações E/SE menos próxima da verificada segundo as orientações O/NO e mais próxima da verificada segundo as orientações S/SO, devido às condições menos adversas às quais estão sujeitas. Assim, a orientação não traduz claramente, por si só, o comportamento dos sistemas. A Tabela 3.6 indica o número adicional de casos de estudo para cada orientação, em função dos diferentes intervalos de idade.

A Figura 3.4 apresenta a distribuição da amostra relativamente à proximidade ao mar, onde é notório o domínio dos casos localizados a uma distância elevada. Pelas curvas de degradação de Marques et al. (2018) referentes a este fator, constata-se que, próximo do limite de degradação associado ao fim de vida útil do sistema ETICS, as curvas interseccionam-se e fornecem um valor semelhante de vida útil, o que não vem de acordo com a expectativa física. Tendo também em consideração o coeficiente de determinação baixo associado à curva da maior distância ao mar, não se podem tirar conclusões inequívocas sobre a tradução da degradação através deste fator. Na Tabela 3.7 é indicado o número adicional de casos de estudo, com vista à melhoria da distribuição de casos por ambas as classes.

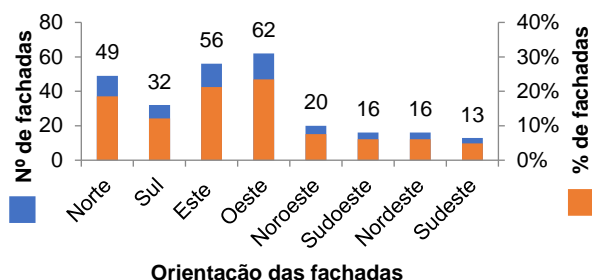


Figura 3.3 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da orientação

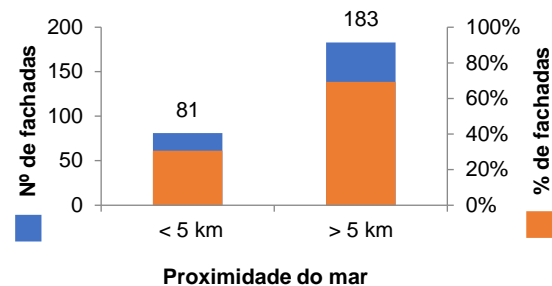


Figura 3.4 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da proximidade ao mar

Tabela 3.6 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de orientação das fachadas

Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)					Nova amostra					Total
	N/NE	S/SO	E/SE	O/NO	Total	N/NE	S/SO	E/SE	O/NO	Total	
< 5	5	3	1	2	11	0	5	5	5	15	26
5 a 9	21	14	10	28	83	0	0	0	0	0	83
10 a 14	4	2	9	17	32	5	5	0	0	10	42
15 a 19	27	15	21	23	86	0	0	0	0	0	86
20 a 24	3	3	6	4	16	5	5	0	5	15	31
> 25	6	9	10	11	36	0	0	0	0	0	36
Soma					264					40	304

Tabela 3.7 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de proximidade ao mar das fachadas

Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)			Nova amostra			Total
	< 5 km	> 5 km	Total	< 5 km	> 5 km	Total	
< 5	0	11	11	5	0	5	16
5 a 9	25	58	83	0	0	0	83
10 a 14	0	34	34	5	0	5	39
15 a 19	20	71	91	0	0	0	91
20 a 24	0	9	9	5	0	5	14
> 25	36	0	36	0	5	5	41
Soma			264			20	284

Na Figura 3.5 encontra-se a distribuição da amostra quanto à exposição à humidade, que revela algum equilíbrio entre o número de casos em cada classe (embora o número de casos sujeitos a uma exposição alta seja superior). As curvas de degradação de Marques et al. (2018), em função da exposição à humidade, revelam coerência com a realidade física prevista: os revestimentos com elevada exposição apresentam um padrão de degradação mais grave com o tempo, conduzindo a uma menor vida útil. No entanto, de modo a melhorar os resultados obtidos, justifica-se a necessidade de analisar casos de estudo adicionais, em conformidade com o número mínimo estabelecido na Tabela 3.8.

Em relação à exposição dos revestimentos à ação combinada da chuva e do vento, a Figura 3.6 indica que uma parte significativa da amostra se encontra exposta desfavoravelmente (edifícios altos e sem barreiras adjacentes, naturais ou artificiais, que limitem os efeitos destes fatores). Em relação às curvas de degradação de Marques et al. (2018), a realidade física esperada é relativamente bem traduzida, pois é obtida uma menor vida útil segundo a classe de exposição alta a este fator. No entanto, para a classe de exposição baixa, este resultado deve ser analisado com cuidado, pois surge a partir de um baixo número de casos. Assim, a utilização desta variável explicativa requer a análise de casos adicionais. A Tabela 3.9 traduz as necessidades mínimas do número de casos a analisar.

Por fim, relativamente à exposição aos agentes poluentes, a distribuição da amostra encontra-se na Figura 3.7 e revela a existência de um maior número de casos com exposição baixa (embora em

ambas as situações o número de casos existentes seja significativo). Em relação às curvas de degradação de Marques et al. (2018), a expectativa física não é corretamente representada. Apesar de se esperar uma evolução da degradação mais acelerada por parte dos revestimentos sujeitos a uma exposição alta aos poluentes, tal não é o comportamento verificado. As interseção das curvas e o baixo coeficiente de determinação associado à classe de exposição alta justificam a adição de casos de estudo (Tabela 3.10), para uma melhor modelação do processo de degradação com recurso a esta variável.

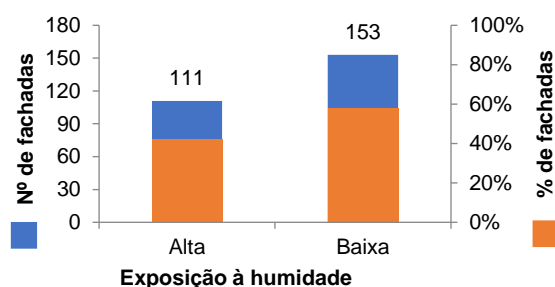


Figura 3.5 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da exposição à humidade

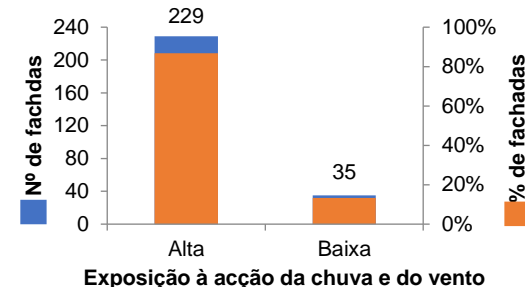


Figura 3.6 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da ação da chuva-vento

Tabela 3.8 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de exposição à humidade das fachadas

Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)			Nova amostra			Total
	Alta	Baixa	Total	Alta	Baixa	Total	
< 5	0	11	11	5	0	5	16
5 a 9	19	64	83	0	0	0	83
10 a 14	11	23	34	0	0	0	34
15 a 19	38	53	91	0	0	0	91
20 a 24	9	0	9	0	5	5	14
> 25	34	2	36	0	0	5	41
Soma			264			15	279

Tabela 3.9 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de ação da chuva-vento das fachadas

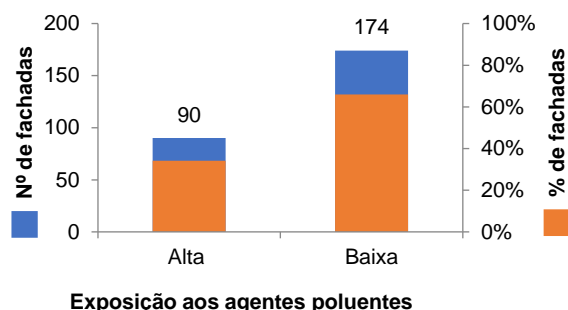
Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)			Nova amostra			Total
	Alta	Baixa	Total	Alta	Baixa	Total	
< 5	8	3	11	0	5	5	16
5 a 9	53	30	83	0	0	0	83
10 a 14	34	0	34	0	5	5	39
15 a 19	91	0	91	0	5	5	96
20 a 24	9	0	9	0	5	5	14
> 25	34	2	36	0	5	5	41
Soma			264			25	289

No que diz respeito aos próprios revestimentos, as características que integram este grupo consideradas relevantes são: i) tipo de revestimento; ii) textura; iii) cor do acabamento; e iv) tipo de remate inferior.

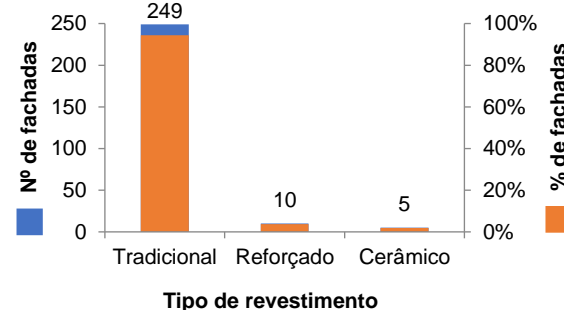
A distribuição da amostra em relação ao tipo de revestimento é apresentada na Figura 3.8 e dela se conclui que existe uma diferença pronunciada entre o número de revestimentos tradicionais, em maior número na amostra, face aos outros tipos de revestimentos, com representatividade muito reduzida. Nas curvas de degradação de Marques et al. (2018), dada a baixa relevância estatística em duas das três classes consideradas, às quais estão associados coeficientes de determinação muito baixos, não se podem tirar conclusões inequívocas sobre a influência deste parâmetro no processo de degradação. Assim, a necessidade de casos de estudo adicionais é evidente e encontra-se visível na Tabela 3.11.

Como se constata na Figura 3.9, em relação à textura do acabamento, a maior frequência de casos corresponde a revestimentos de textura rugosa, estando as restantes categorias de textura associadas

a um número muito reduzido de casos. Uma vez mais, as curvas de Marques et al. (2018) associadas a este fator não permitem que se tirem conclusões sobre a preponderância desta variável na degradação dos revestimentos ETICS devido à baixa relevância estatística em duas das três classes consideradas. Assim, a Tabela 3.12 apresenta as necessidades evidentes para a melhoria da amostra.



Exposição aos agentes poluentes



Tipo de revestimento

Figura 3.7 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da exposição aos poluentes

Figura 3.8 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função do tipo de revestimento

Tabela 3.10 - Número mínimo de casos adicionais em termos de exposição aos poluentes face à idade dos revestimentos

Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)			Nova amostra			Total
	Alta	Baixa	Total	Alta	Baixa	Total	
< 5	11	0	11	0	5	5	16
5 a 9	30	53	83	0	0	0	83
10 a 14	30	4	34	0	5	5	39
15 a 19	19	72	91	0	0	0	91
20 a 24	0	9	9	5	0	5	14
> 25	0	36	36	5	0	5	41
Soma			264			20	284

Tabela 3.11 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de tipo de revestimento das fachadas

Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)				Nova amostra				Total
	Tradicio-nal	Reforçado	Outro	Total	Tradicio-nal	Reforçado	Outro	Total	
< 5	11	0	0	11	0	5	5	10	21
5 a 9	81	0	2	83	0	5	5	10	93
10 a 14	31	0	3	34	0	5	5	10	44
15 a 19	81	10	0	91	0	0	5	5	96
20 a 24	9	0	0	9	0	5	5	10	19
> 25	36	0	0	36	0	5	5	10	46
Soma				264				55	319

Por sua vez, na Figura 3.10, a divisão da amostra relativamente à cor do acabamento revela o predomínio de casos com cor branca, apesar da existência de um número significativo de casos pertencentes a outras categorias de cores. Nas curvas de degradação de Marques et al. (2018), obtidas através desta variável explicativa, a curva associada a cores escuras revela uma evolução de degradação menos acentuada do que a observada para as cores claras, o que contraria a expectativa física (revestimentos mais escuros têm maiores índices de absorção da radiação solar, degradando-se mais rapidamente). A Tabela 3.13 apresenta o número de casos de estudo adicionais necessários para a obtenção de resultados mais fiáveis relativamente à influência da cor na degradação dos sistemas ETICS.

Por fim, na Figura 3.11, onde se encontra a divisão da amostra face ao tipo de remate inferior dos sistemas, é notório o predomínio de revestimentos com recurso a lambris, por oposição aos revestimentos com recurso a perfis de arranque elevado ou sem recurso a proteção superior. Nas curvas de degradação de Marques et al. (2018) para esta variável, a sua sobreposição e interseção, em determinado ponto, não

permitem que se tirem conclusões inequívocas da influência deste parâmetro na degradação de sistemas ETICS. Deste modo, é justificada a análise de mais casos de estudo, de acordo com a Tabela 3.14.

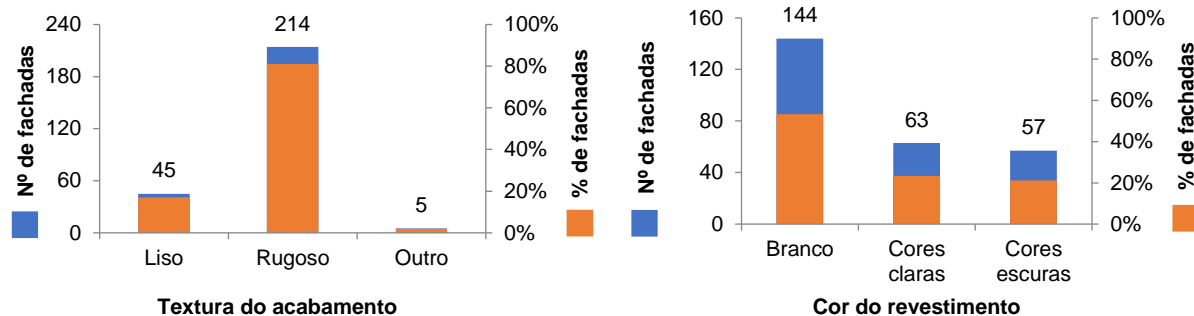


Figura 3.9 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da textura do acabamento

Figura 3.10 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) em função da cor do revestimento

Tabela 3.12 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de tipo de textura das fachadas

Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)				Nova amostra				Total
	Liso	Rugoso	Outro	Total	Liso	Rugoso	Outro	Total	
< 5	0	11	0	11	5	0	5	10	21
5 a 9	22	59	2	83	0	0	5	5	88
10 a 14	3	28	3	34	5	0	5	10	44
15 a 19	20	71	0	91	0	0	5	5	96
20 a 24	0	9	0	9	5	0	5	10	19
> 25	0	36	0	36	5	0	5	10	46
Soma				264				50	314

Tabela 3.13 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de cor dos revestimentos das fachadas

Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)				Nova amostra				Total
	Branco	Cores claras	Cores escuras	Total	Branco	Cores claras	Cores escuras	Total	
< 5	9	0	2	11	0	5	5	10	21
5 a 9	45	19	19	83	0	0	0	0	83
10 a 14	12	19	3	34	0	0	5	5	44
15 a 19	39	19	33	91	0	0	0	0	91
20 a 24	9	0	0	9	0	5	5	10	19
> 25	34	2	0	36	0	5	5	10	46
Soma				264				35	299

Após a análise da amostra e a definição do número mínimo de casos adicionais necessários, segundo cada variável explicativa, é apresentada na Tabela 3.15 a reunião de todas as necessidades reveladas. O resultado desta agregação é obtido pela seleção, em cada variável, do número mais elevado de casos de estudo que em cada intervalo de idades se assumem como necessários, independentemente dos parâmetros aos quais se referem. Assim, pode-se concluir que é exigida uma amostra mínima de mais 65 revestimentos para além dos que foram alvo de estudo no trabalho de investigação anterior.

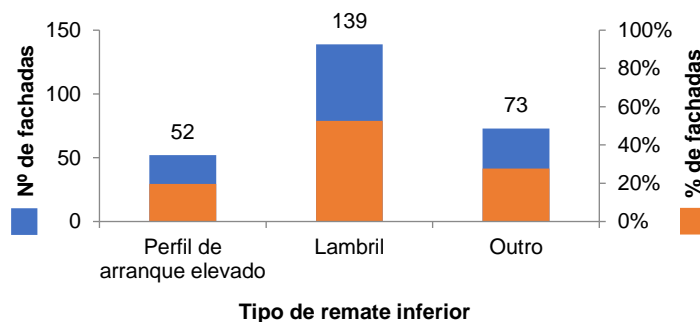


Figura 3.11 - Distribuição da amostra de Marques et al. (2018) pelo tipo de remate inferior

Tabela 3.14 - Número mínimo de casos de estudo adicionais em termos de tipo de remate inferior das fachadas

Idade (anos)	Amostra de Marques et al. (2018)				Nova amostra				Total
	Perfil elevado	Lambril	Outro	Total	Perfil elevado	Lambril	Outro	Total	
< 5	7	2	2	11	0	5	5	10	21
5 a 9	30	16	37	83	0	0	0	0	83
10 a 14	11	1	22	34	0	5	0	5	39
15 a 19	3	52	36	91	5	0	0	5	96
20 a 24	1	8	0	9	5	0	5	10	19
> 25	0	34	2	36	5	0	0	5	41
Soma				264				35	299

Tabela 3.15 - Número mínimo total de casos de estudo adicionais necessários

Idade (anos)	Número mínimo de novos casos de estudo									Total
	Orientação	Proximidade ao mar	Exposição à humidade	Ação da chuva-vento	Exposição aos poluentes	Tipo de revestimento	Textura do acabamento	Cor	Remate Inferior	
< 5	15	5	5	5	5	10	10	10	10	15
5 a 9	0	0	0	0	0	10	5	0	0	10
10 a 14	10	5	0	5	5	10	10	5	5	10
15 a 19	0	0	0	5	0	5	5	0	5	5
20 a 24	15	5	5	5	5	10	10	10	10	15
> 25	0	5	5	5	5	10	10	10	5	10
Soma										65

3.4.2. Caracterização das anomalias detetadas na amostra de Marques et al. (2018)

À semelhança da caracterização da amostra, também é relevante a caracterização das anomalias observadas nos casos de estudo inspecionados na investigação de Marques et al. (2018). A caracterização das anomalias é efetuada de acordo com o sistema proposto por Silva et al. (2017a). Para cada grupo, é apresentada, na Figura 3.12, a frequência de fachadas com anomalias detetadas durante a inspeção.

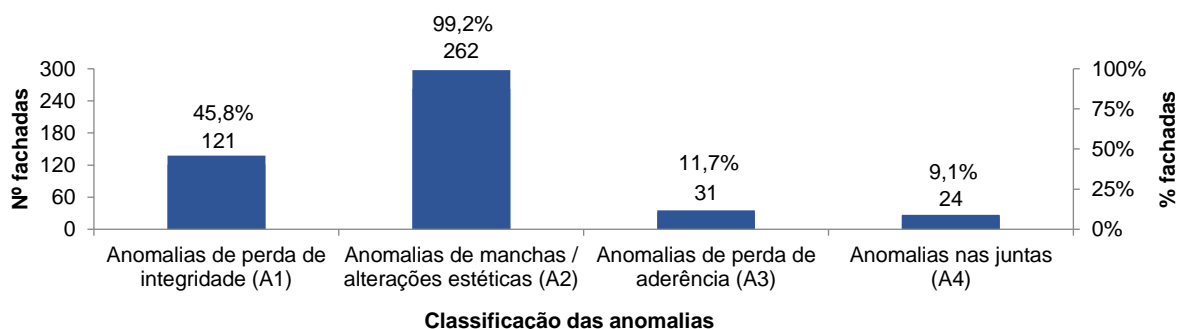


Figura 3.12 - Frequência de ocorrência das anomalias, por grupos, na amostra analisada por Marques et al. (2018), em termos absolutos e em percentagem do número total de fachadas

A análise da Figura 3.12 permite concluir que as anomalias decorrentes de manchas ou outras alterações estéticas são as que surgem mais vezes no sistema ETICS, por oposição às que decorrem nas juntas, que apresentam uma frequência bastante inferior. A Figura 3.13 fornece a caracterização das anomalias presentes na amostra inspecionada, mas desta vez relativa à frequência de ocorrência das anomalias de forma independente. As manchas devidas a biodeterioração ou colonização biológica na superfície dos sistemas, a par da humidade superficial, foram as anomalias mais vezes registadas, ambas pertencentes ao grupo de anomalias com maior frequência de ocorrência na amostra. Por oposição, as anomalias com menor frequência de registo na amostra foram a presença de vegetação parasitária nos sistemas e as alterações cromáticas, também do grupo de alterações estéticas.

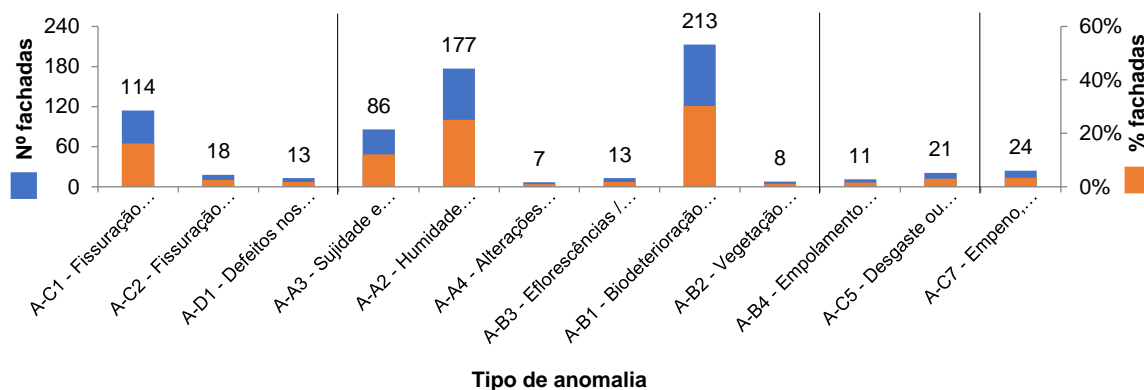


Figura 3.13 - Frequência de ocorrência das anomalias, por tipos, na amostra analisada por Marques et al. (2018), em termos absolutos do número total de fachadas

3.4.3. Análise dos resultados obtidos por Marques et al. (2018)

Com os dados recolhidos por Marques et al. (2018) foi possível a obtenção da curva de degradação global visível na Figura 3.14, que traduz o comportamento esperado dos revestimentos ETICS com o tempo. O valor do coeficiente de determinação obtido (superior a 0,6) permite afirmar que este modelo caracteriza de modo eficiente a degradação sofrida pelos sistemas. Com ele, a vida útil de referência da amostra é de 20 anos, para um limite de severidade de degradação de 30% (a severidade de degradação é um indicador numérico que traduz o estado de degradação global apresentado pelos revestimentos).

O trabalho de investigação de Marques et al. (2018) também teve como objetivo a aplicação de uma forma de cálculo para a durabilidade do sistema ETICS baseada no método fatorial. Para a minimização da influência das incertezas associadas à definição dos fatores que afetam a vida útil de referência, um parâmetro necessário para a aplicação do método, foram considerados quatro cenários distintos. Segundo as conclusões da autora (Marques et al., 2018), o resultado mais relevante conduziu à estimação de uma vida útil de 21 anos. Este valor, de elevada semelhança com o valor estimado pela curva de degradação e por outros existentes na bibliografia, evidencia a adequabilidade do método ao objetivo da investigação, de onde se conclui que ambos os modelos propostos por Marques et al. (2018) possibilitam uma tradução plausível da deterioração sofrida pelo sistema ETICS com o tempo.

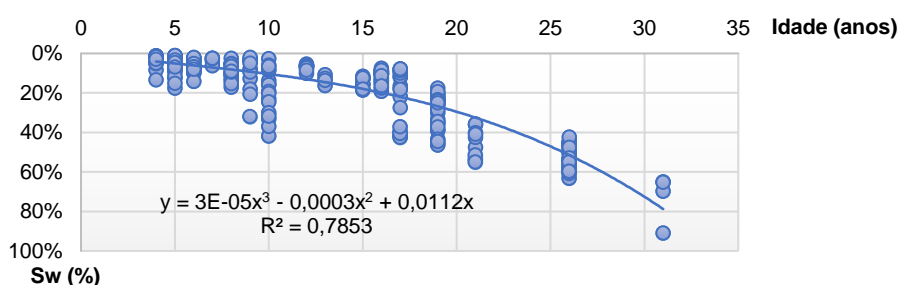


Figura 3.14 - Curva de degradação global obtida com a amostra analisada por Marques et al. (2018)

3.5. Análise da amostra global

3.5.1. Seleção da nova amostra

A seleção de casos de estudo, para a constituição de uma nova amostra, teve como principais fontes empresas aplicadoras do sistema ETICS, que facultaram informações de edifícios existentes com esta solução. Tendo em conta a utilização relativamente recente deste tipo de revestimentos em

Portugal, para além de a sua aplicação não ser uniforme em todo o território comparativamente a outras soluções possíveis, a obtenção de casos de estudo por esta via é naturalmente facilitada.

Durante a fase de seleção, uma das preocupações consistiu na reunião de uma amostra variada em termos de todas as variáveis relevantes para a explicação do processo de degradação dos revestimentos, referidas acima. Para além disto, também houve o cuidado de excluir casos de estudo com uma aplicação dos revestimentos muito recente, por ser baixa a probabilidade de terem sinais de degradação úteis para a criação dos modelos pretendidos.

A nova amostra consistiu em 114 fachadas revestidas com ETICS, pertencentes a um conjunto de edifícios situados em zonas distintas do país, e todas elas foram devidamente inspecionadas. Os casos de estudo inserem-se num intervalo de idades de 19 anos (desde 1998 até 2017), o que vem de acordo com a referência anterior de a aplicação destes revestimentos ser ainda recente no território nacional. Para além disto, através da observação da localização dos casos de estudo, facilmente se entende que a sua aplicação tende a ser mais recorrente no norte do país, onde se deteta a existência de mais casos de estudo. As condições meteorológicas desta região, tipicamente mais adversas em termos de temperatura e humidade, são o motivo da opção preferencial por esta solução (Ximenes et al., 2014).

3.5.2. Caracterização da totalidade da amostra

A amostra global, resultante da reunião da nova amostra com a amostra de Marques et al. (2018), totalizou 378 fachadas revestidas com ETICS, pertencentes aos edifícios que constam no Anexo 2. A análise da amostra global, tal como foi efetuada no subcapítulo 3.4, é um procedimento uma vez importante, pois permite a sua caracterização de modo completo. Assim, é obtida uma justificação mais segura da influência dos vários fatores no processo de degradação dos revestimentos (Marques, 2016).

Inicialmente, a caracterização dos edifícios que constituem a amostra adicional é feita segundo três fatores: i) tipo de utilização; ii) número de pisos elevados; iii) configuração volumétrica. A distribuição da amostra relativamente ao tipo de utilização é visível na Figura 3.15. Através dela, conclui-se que a generalidade dos edifícios se distribui pelas classes “habitação” ou “serviços” (9 na primeira e 11 na segunda), dizendo respeito a ambas um número elevado de fachadas, que perfazem quase a totalidade da amostra. As classes “comércio” e “outro” (que diz respeito à situação na qual os edifícios têm uma utilização mista (como por exemplo “habitação” e “comércio”) contemplam um número muito reduzido de fachadas, estando apenas associado um edifício a cada uma dessas classes. Em função do número de pisos elevados, a distribuição da amostra é visível na Figura 3.16. É possível concluir que a maior frequência de edifícios diz respeito à classe “3 ou 4” pisos elevados (12 edifícios), sendo a que apresenta um maior número de fachadas. As restantes classes apresentam um número mais reduzido, estando-lhes associadas também um menor número de edifícios (cinco em cada). Por sua vez, em relação à configuração volumétrica, a Figura 3.17 permite a visualização da distribuição da amostra. Dela se conclui que a maioria dos edifícios apresenta uma configuração compacta (15 edifícios), estando associada a esta classe um maior número de fachadas. A restante classe, associada a um menor número de fachadas, corresponde a sete edifícios.

A caracterização da amostra total tendo em conta a idade dos revestimentos, visível na Figura 3.18, revela um predomínio de casos com idades entre os 5 e os 19 anos. O número de casos nas restantes classes (com a exceção da classe “20 a 24 anos”, que é a que regista uma menor frequência), embora não seja tão elevado, é ainda assim significativo. Comparativamente com a amostra de Marques et al.

(2018), a nova amostra assegurou um incremento considerável do número de revestimentos pertencentes às classes etárias “< 5 anos”, “5 a 9 anos” e “10 a 14 anos”. As restantes classes, correspondentes a idades dos revestimentos mais avançadas, não sofreram um incremento tão substancial. Tal é justificado pela dificuldade na identificação de revestimentos com ETICS com idades superiores a 20 anos, dada a prática de aplicação recente deste tipo de sistema no território nacional.

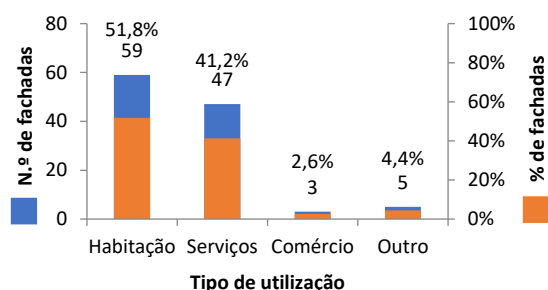


Figura 3.15 - Distribuição da nova amostra em função do tipo de utilização (número absoluto e percentagem)

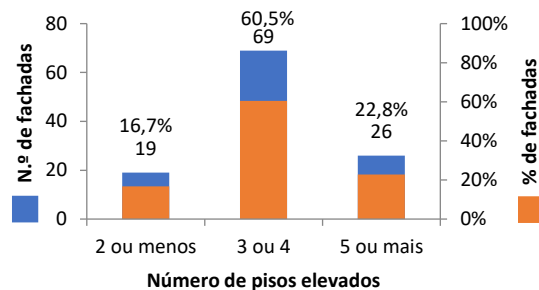


Figura 3.16 - Distribuição da nova amostra em função do n.º de pisos elevados (número absoluto e percentagem)

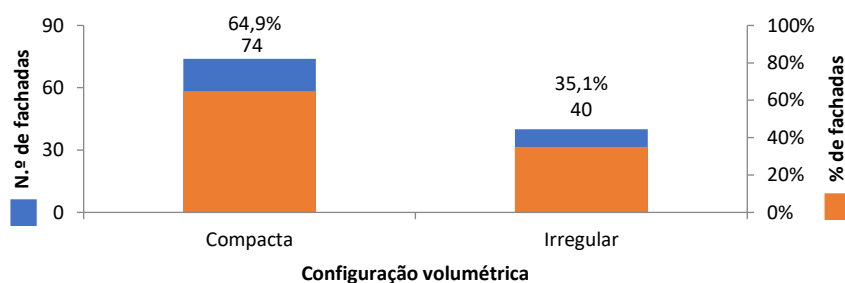


Figura 3.17 - Distribuição da nova amostra em função da configuração volumétrica (número absoluto e percentagem)

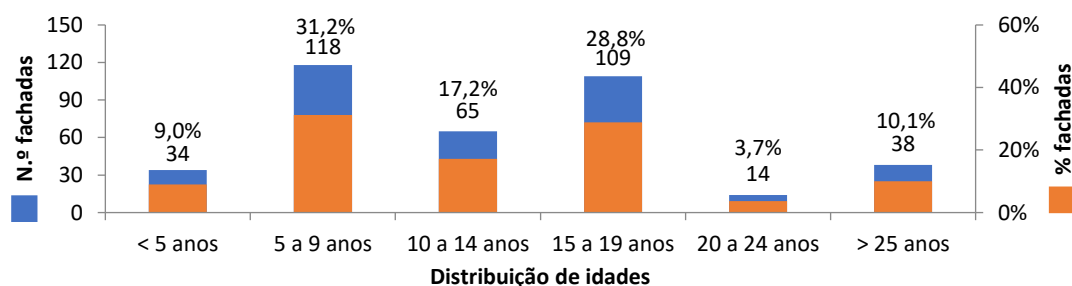


Figura 3.18 - Distribuição da amostra global em função da idade dos revestimentos (número absoluto e percentagem)

A caracterização da amostra relativamente à zona envolvente dos casos de estudo, tal como no subcapítulo 3.4, incide nos seguintes fatores: i) orientação; ii) proximidade ao mar; iii) exposição à humidade; iv) exposição à ação chuva-vento; v) exposição aos agentes poluentes.

A Figura 3.19 apresenta a distribuição da amostra global segundo a orientação das fachadas, e revela a existência de mais revestimentos orientados segundo as direções principais do que os orientados segundo as outras direções. Em relação à amostra de Marques et al. (2018), a nova amostra permitiu um maior incremento em casos de estudo orientados segundo as direções não principais, por oposição ao incremento em casos de estudo orientados segundo as direções principais, que não foi tão pronunciado. A distribuição da amostra global pelas classes de proximidade ao mar, visível na Figura 3.20, revela um predomínio de casos localizados a uma maior distância, apesar do número considerável de casos com uma localização próxima. Por comparação entre a nova amostra e amostra de Marques et

al. (2018), é perceptível a existência de um aumento semelhante em cada uma das classes que integram este fator. No que respeita a exposição à humidade, a amostra global passou a apresentar uma distribuição de casos, em ambas as classes, bastante equilibrada, como se constata na Figura 3.21. A nova amostra conduziu a um maior aumento do número de casos sujeitos a uma exposição elevada, por oposição ao aumento nos casos sujeitos a uma exposição baixa. No que se refere à exposição das fachadas à ação chuva-vento, a distribuição global da amostra, visível na Figura 3.22, indica uma distribuição pouco equilibrada entre as classes deste parâmetro. A comparação da nova amostra e da amostra de Marques et al. (2018) revela um aumento pronunciado do número de casos sujeitos a efeitos elevados deste fator, por oposição ao aumento do número de casos sujeitos a efeitos baixos, mais reduzido. Por último, em relação à exposição aos agentes poluentes, a distribuição da amostra global (Figura 3.23) revela equilíbrio em ambas as classes, em termos do número de casos que as constituem. No que diz respeito à comparação dos casos de estudo entre a nova amostra e a amostra de Marques et al. (2018), é visível o maior incremento do número de casos sujeitos a uma exposição alta, contrariamente ao incremento do número de casos sujeitos a uma exposição baixa.

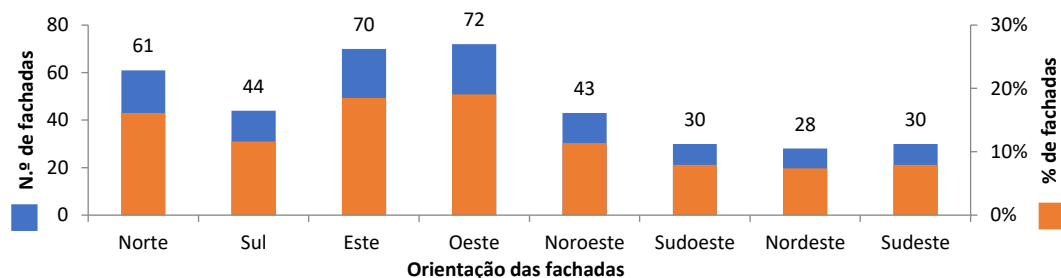


Figura 3.19 - Distribuição da amostra global em função da orientação dos revestimentos

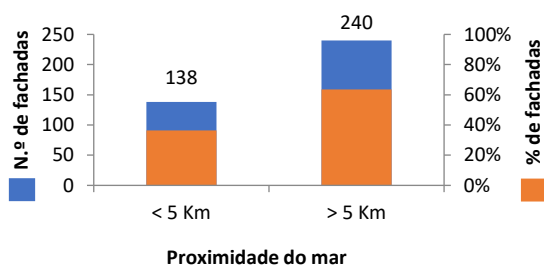


Figura 3.20 - Distribuição da amostra global em função da proximidade ao mar

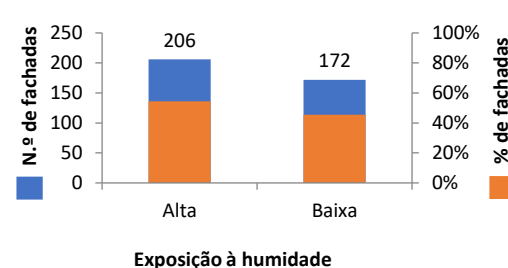


Figura 3.21 - Distribuição da amostra global em função da exposição à humidade

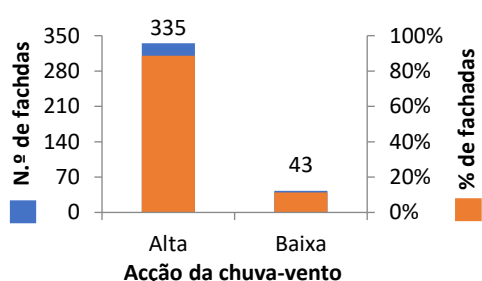


Figura 3.22 - Distribuição da amostra global em função da exposição à ação chuva-vento

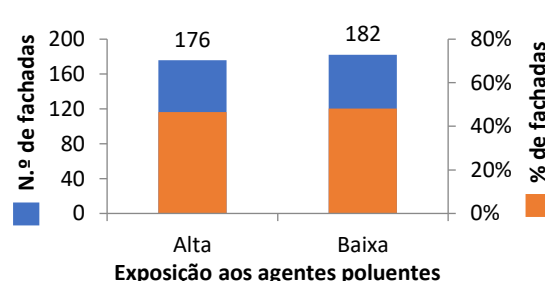


Figura 3.23 - Distribuição da amostra global em função da exposição aos poluentes

A análise da amostra relativamente às características próprias dos casos de estudo, à semelhança do subcapítulo 3.4, foca-se nos seguintes fatores: i) tipo de revestimento; ii) textura do acabamento; iii) cor do revestimento; iv) tipo de remate inferior.

A distribuição da amostra global segundo o tipo de revestimento, visível na Figura 3.24, revela a existência de pouca representatividade de casos nas classes “reforçado” e “cerâmico”, em contraste com a classe “tradicional”. De facto, a maioria dos casos de estudo da nova amostra inseriu-se na classe “tradicional”, que já era a classe que continha o maior número de casos de estudo, o que conduziu a uma má distribuição da amostra face a este fator. No que se refere à textura do acabamento, o incremento de casos estudo deu-se exclusivamente na classe de revestimentos rugosos, não se tendo verificado aumento em qualquer outra classe. Assim, a distribuição conseguida com a amostra global também não se revela equilibrada em todas as classes, como se repara na Figura 3.25 (maior número de casos associado a revestimentos com textura rugosa e um número muito reduzido de casos nas outras classes). Em relação à cor do acabamento, a nova amostra conduziu a um aumento mais significativo de casos nas classes “cores claras” e “branco”. A distribuição conferida à amostra global com a adição dos novos casos de estudo, como se constata na Figura 3.26, revela um domínio dos revestimentos de cor branca, apresentado as restantes classes uma frequência de casos mais baixa, mas considerável, ainda assim. Por último, em função do tipo de remate inferior, os incrementos com a nova amostra segundo as classes “lambрил” e “outro” foram superiores ao incremento segundo a classe “perfil de arranque elevado”. A distribuição da amostra global, visível na Figura 3.27, revela uma maior frequência de casos na classe “lambрил”, embora as restantes classes também apresentem um número significativo de casos.

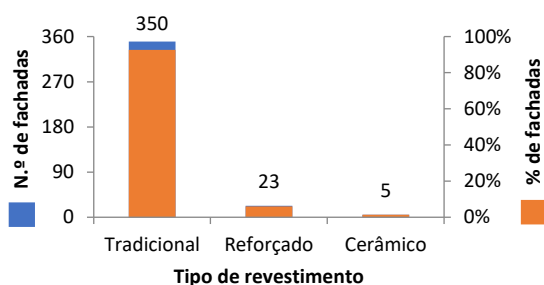


Figura 3.24 - Distribuição da amostra global em função do tipo de revestimento

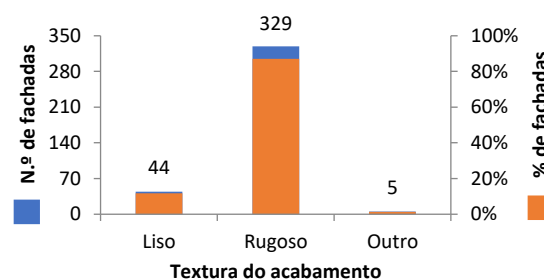


Figura 3.25 - Distribuição da amostra global em função da textura do acabamento

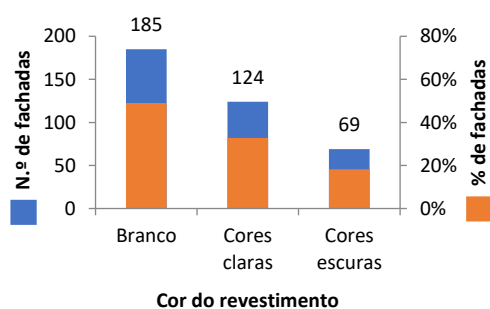


Figura 3.26 - Distribuição da amostra global em função da cor do revestimento

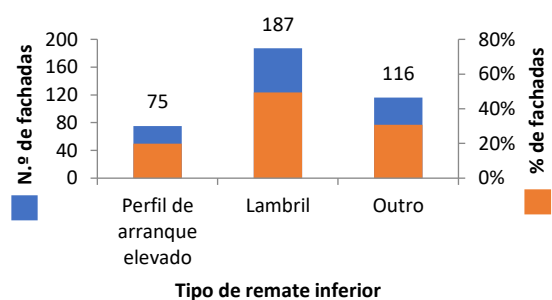


Figura 3.27 - Distribuição da amostra global em função do tipo de remate inferior

3.5.3. Caraterização das anomalias detetadas na nova amostra

A caraterização da amostra global não fica completa sem antes se efetuar uma análise às anomalias detetadas nos casos de estudo. Esta análise visa reconhecer quais os fenómenos de degradação que ocorrem com mais frequência nos sistemas ETICS, bem como os níveis de degradação aos quais estão associados. Tal como no subcapítulo 3.4, a análise terá como referência o sistema classificativo de Silva et al. (2017a), tanto para os grupos como para os tipos de anomalias.

A Figura 3.28 traduz a quantidade de revestimentos pertencentes à amostra total que possuem anomalias. A sua análise permite referir que a frequência de casos de estudo com anomalias de manchas ou alterações cromáticas foi a mais elevada, ao passo que a frequência de casos de estudo que apresentavam anomalias de perda de aderência foi a mais baixa. À semelhança de Marques (2016), nesta análise foi adotado o critério de que os revestimentos com anomalias pertencentes simultaneamente a um mesmo grupo apenas são contabilizados uma vez, não se fazendo distinção entre anomalias.

A partir da Figura 3.29, é possível a realização de uma análise análoga à anterior, mas desta vez tendo em conta os tipos de anomalias presentes nos revestimentos. A partir dela constata-se, uma vez mais, o domínio das anomalias resultantes de manchas ou alterações estéticas nos casos de estudo que integram a amostra total. Neste grupo, os tipos de anomalias mais frequentemente observados em foram as anomalias causadas por sujidade e acumulação de detritos, as anomalias causadas por humidade superficial e as anomalias de biodeterioração ou colonização biológica. Nos restantes grupos, importa salientar que a fissuração mapeada e as anomalias nas juntas foram os tipos de anomalias com maiores frequências. As anomalias associadas à presença de eflorescências/criptoflorescências ou de vegetação parasitária e ao empolamento dos sistemas foram as menos recorrentes.

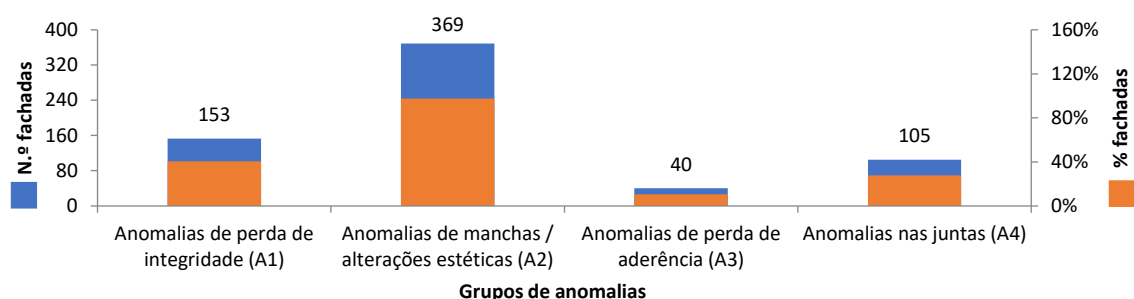


Figura 3.28 - Frequência de casos da amostra total que apresentam anomalias de cada um dos grupos de anomalias

Em relação aos níveis de degradação das várias anomalias identificadas nos casos de estudo, na nova amostra foi identificado um elevado número de anomalias classificadas segundo os níveis 2 e 3 de severidade, perfazendo quase a totalidade das anomalias detetadas. O mesmo não aconteceu na amostra de Marques et al. (2018), que revelou o predomínio de anomalias classificadas segundo os níveis 1 e 2 de severidade de degradação. Em ambos os casos, as anomalias classificadas segundo o nível de degradação 4 foram as menos frequentes. A Figura 3.29, resultante da agregação de ambas as amostras, revela um decréscimo da frequência de anomalias existentes nos revestimentos com o aumento do nível de severidade da degradação das mesmas, um padrão expetável.

A Figura 3.30 permite a visualização da contribuição de cada grupo de anomalias para a frequência de anomalias total verificada por cada patamar de degradação. A sua análise permite concluir que as anomalias de manchas ou alterações estéticas são as principais responsáveis pelo número de anomalias existentes segundo cada nível, com percentagens superiores a 65% em todos eles. Por oposição, as anomalias resultantes de perda de aderência e nas juntas são as que apresentam percentagens mais reduzidas em todos os níveis de degradação. A Figura 3.31 permite a visualização das frequências de anomalias existentes em cada grupo segundo os seus níveis de degradação. O padrão de tendência comum é a existência de uma frequência cada vez menor com o aumento do nível de severidade.

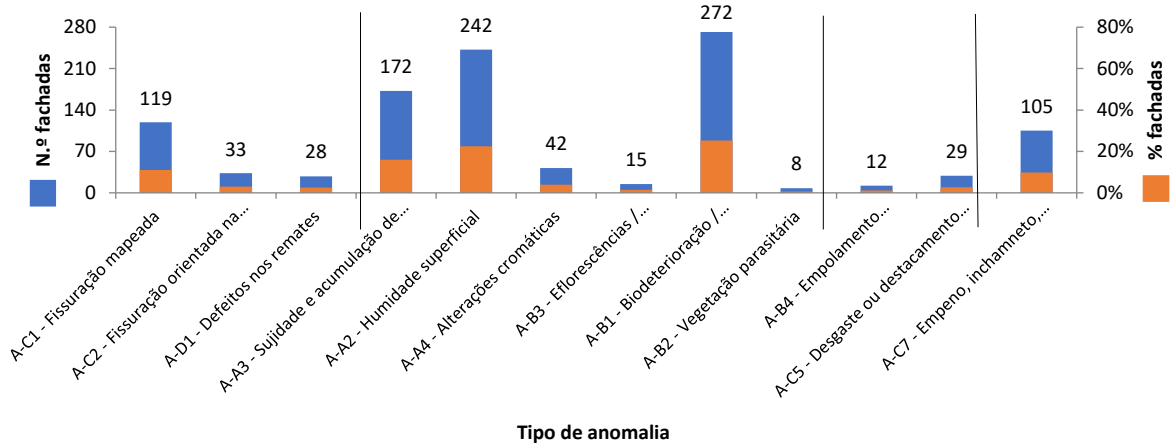


Figura 3.29 - Frequência de revestimentos da amostra total que apresentam anomalias de cada um dos tipos de anomalias

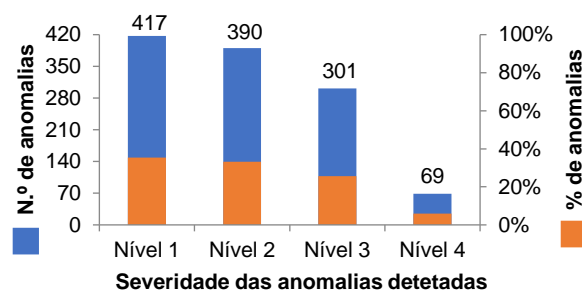


Figura 3.30 - Frequência de anomalias na amostra total por severidade de degradação

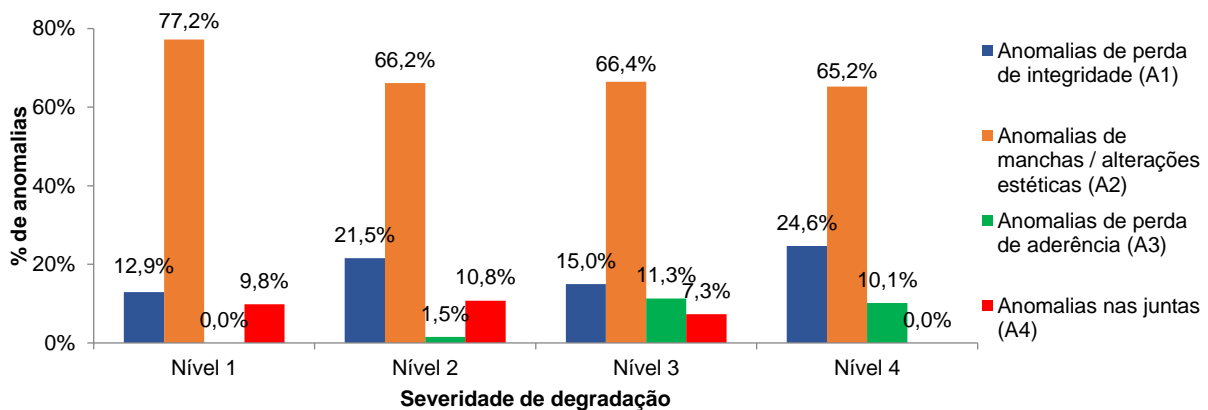


Figura 3.31 - Percentagem de cada grupo de anomalias verificada na amostra total, por nível de severidade de degradação

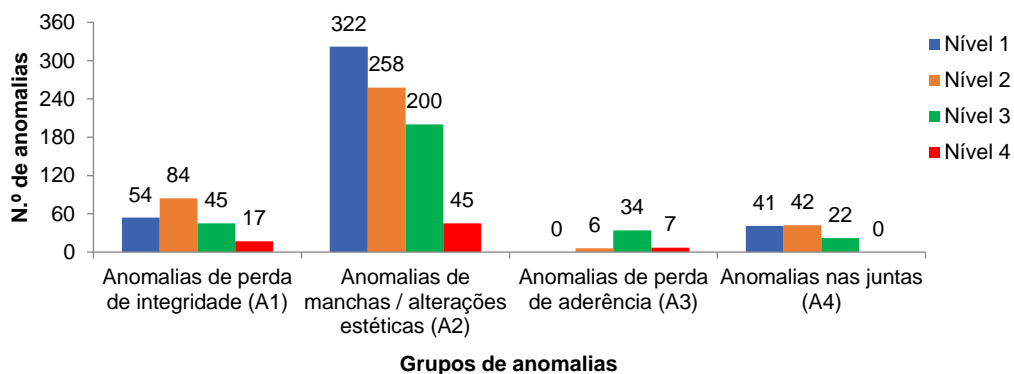


Figura 3.32 - Frequência de anomalias distribuídas por severidade e verificadas na amostra total, por grupos de anomalias

3.5.4. Casos excluídos

Apesar da análise de todos os casos de estudo pertencentes à nova amostra, 10 fachadas foram excluídas e não foram consideradas para a fase seguinte da construção dos modelos de previsão da vida útil.

Na Escola Secundária Aurélia de Sousa, foram excluídos três revestimentos de dois edifícios distintos, por apresentarem um padrão de degradação bastante superior ao apresentado pelas restantes fachadas existentes nos mesmos edifícios. Um dos motivos justificativos é a localização dos revestimentos nas traseiras da escola, que levou ao surgimento de anomalias resultantes de erros de utilização, em particular ações de vandalismo. No entanto, erros de projeto / execução potenciaram também o aparecimento destas anomalias. A falta de proteção inferior do sistema é um desses exemplos, pois a sua ausência impediu uma maior resistência do sistema aos impactos por si sofridos, conduzindo ao aparecimento de perfurações e lacunas de material, sobretudo nas zonas acessíveis (à direita, na Figura 3.32). Em alguns casos, era inclusivamente possível a visualização do substrato (ao centro, na Figura 3.32), como resultado da acelerada degradação dos sistemas pela falta de um adequado remate inferior, o que levará à entrada de humidade as camadas internas do sistema, podendo dar origem a problemas mais graves.

No edifício habitacional da Rua Aristides Sousa Mendes, em Vila do Conde, foi excluída uma fachada orientada a noroeste (Figura 3.33). A severidade de degradação apresentada por esta fachada, superior a 50%, apresenta uma discordância elevada com a severidade de degradação apresentada pelas fachadas do mesmo edifício, sendo sobretudo motivada por anomalias do tipo manchas / alterações cromáticas. Apesar de a orientação da fachada e da sua proximidade ao mar poderem servir para justificar este valor, eventuais erros de projeto / execução podem também estar na origem da diferença muito significativa verificada. Por motivos análogos, no conjunto habitacional da Rua Liga dos Melhoramentos da Amadora, na Amadora, foram excluídos quatro revestimentos (dois de cor branca, orientados a sudeste, e dois de cor amarela, orientados a noroeste) (Figura 3.34). A alta severidade de degradação apresentada pelas fachadas, tendo em conta a idade dos revestimentos, a par da degradação não tão pronunciada apresentada por fachadas nas mesmas condições, sugere a existência de erros durante as fases de projeto ou de execução.

Na residência universitária Duarte Pacheco, no Parque das Nações, foram excluídas ainda duas fachadas (ambas de cor rosa, uma orientada a este e outra a oeste), por apresentarem severidades de degradação bastante inferiores à degradação média apresentada por fachadas em condições similares (valores de cerca 20%, por oposição a valores de cerca de 40%). O bom estado de conservação pode dever-se a obras de manutenção recentes ou outras intervenções nos edifícios, das quais não há registo.



Figura 3.33 - Exemplos de anomalias das fachadas excluídas da amostra, na Escola Secundária Aurélia de Sousa



Figura 3.34 - Aspeto geral da fachada excluída da amostra, na Rua Aristides Sousa Mendes, em Vila do Conde



Figura 3.35 - Aspeto degradado das fachadas excluídas da amostra, no Empreendimento Alto da Mira, na Amadora

3.6. Conclusão

A fase correspondente ao trabalho de campo é fundamental para a elaboração de modelos de previsão da vida útil de revestimentos de fachada, uma vez que permite a recolha de dados que sustentam toda a modelação posterior. Apesar da sua simplicidade, a realização de inspeções visuais a edifícios tem-se revelado um procedimento bastante eficaz neste contexto, ao permitir um levantamento das anomalias manifestadas pelos edifícios, nas suas condições reais de utilização. A subjetividade associada a este método de recolha de dados, baseado apenas na perceção visual e sem implicar a realização de qualquer método complementar, é atenuada se forem utilizadas ferramentas como a ficha de inspeção e diagnóstico ou as escalas de degradação, uniformizadores dos critérios de recolha e avaliação de informação.

A caracterização da amostra, em termos estatísticos, também é um procedimento de grande importância. O principal objetivo desta avaliação é a averiguação da existência de uma representatividade adequada segundo todos os fatores que influenciam a degradação dos revestimentos. Com esta garantia, a viabilidade dos modelos no que se refere à explicação do fenómeno de degradação aumenta, uma vez que a sua construção teve em conta a influência de todos os parâmetros significativos.

4. Modelos de degradação

4.1. Introdução

Apesar de o objetivo principal da dissertação consistir na aplicação de métodos computacionais para a criação de modelos da mesma natureza, úteis para a previsão da vida útil de revestimentos com ETICS, um objetivo parcelar consiste na criação de modelos com o mesmo fim, mas com recurso ao método gráfico. Os modelos que daqui derivam, designados por curvas de degradação, são a representação gráfica dos processos de deterioração e possibilitam a avaliação a perda de desempenho destes sistemas ao longo do tempo. Esta metodologia é particularmente interessante por permitir a definição de uma vida útil estimada para os revestimentos em estudo de uma forma simples, requerendo o tratamento estatístico, a quantificação e a conversão para modelos dos dados recolhidos no trabalho de campo (Marques, 2016).

Numa fase inicial, a nível teórico, este capítulo enquadra a metodologia considerada para a previsão da vida útil, referindo todos os parâmetros necessários para a obtenção de indicadores numéricos capazes de caracterizar a degradação existente nos casos de estudo inspecionados. Numa fase intermédia, são elaborados os modelos de degradação com recurso ao método gráfico, considerando todos os fatores intervenientes neste processo, tanto de forma independente como de forma integrada. Numa fase final, procede-se à estimação da vida útil de referência pela curva de degradação global obtida, valor que surge da interseção da curva com o valor mínimo de aceitação de desempenho definido para os sistemas. São ainda efetuadas as análise e discussão dos resultados obtidos.

4.2. Metodologia da estimação da vida útil

São vários os estudos que avançam com metodologias de interesse prático para a previsão da vida útil de revestimentos de edifícios (Nireki, 1996; Shohet et al., 2002; Cole e Corrigan, 2009). A presente investigação tem por base a metodologia proposta por Gaspar (2009), que faz uso das informações recolhidas através das inspeções visuais às fachadas (as anomalias detetadas, devidamente classificadas em tipos e grupos) para a obtenção de um indicador numérico global, tradutor do estado de degradação das fachadas analisadas (Marques et al., 2018). Este indicador é calculado por intermédio de fórmulas matemáticas, que contabilizam o nível de degradação e a área associados a cada anomalia. A aplicabilidade desta metodologia ao tipo de revestimento aqui em estudo, bem como a sua relativa simplicidade de aplicação, torna-a adequada para o propósito desta investigação.

4.2.1. Modelo de Gaspar (2009)

A metodologia mais recente de Gaspar (2009) tem como objetivo a estimação de um valor numérico designado por índice de severidade de degradação (S_w), que permite a indicação do nível de degradação global associado a um dado revestimento. Uma vez que se trata de um valor normalizado, com ele torna-se possível a comparação estatística da degradação existente em revestimentos distintos (Marques et al., 2018). A aplicação desta metodologia requer a existência de um trabalho de campo prévio, que permita a análise de um conjunto de revestimentos. Esta análise deve incidir nos seguintes aspetos: i) identificação e classificação, por tipo e por grupo, das anomalias presentes no revestimento; ii) classificação da gravidade aparente de cada anomalia identificada (segundo uma escala discreta de cinco níveis de degradação); iii) quantificação da área associada a cada anomalia,

por tipo e por nível de degradação; iv) quantificação da área total da fachada.

Através do processamento das informações recolhidas durante o trabalho de campo, torna-se possível a quantificação dos parâmetros referidos de seguida:

- **A** - área total da fachada [m²]: é considerada como a área opaca da fachada que se encontra efetivamente revestida pelo sistema de isolamento térmico do tipo ETICS;

- **A_n** - área da fachada degradada [m²]: é considerada como a parte da área revestida pelo sistema ETICS que se encontra afetada por uma dada anomalia *n*, pertencente a qualquer um dos tipos de anomalias associados a este tipo de revestimento; para cada anomalia *n*, é identificada uma área independente das restantes; no caso de revestimentos com recurso a ETICS, tem-se **A_i** para a área associada a anomalias de perda de integridade, **A_m** para a área associada a anomalias de manchas ou alterações estéticas, **A_d** para a área associada a anomalias de perda de aderência e **A_j** para a área associada a anomalias nas juntas;

- **A_w** - área degradada ponderada [m²]: é considerada como o somatório dos produtos das áreas do sistema ETICS afetadas por cada uma das *n* anomalias pelas constantes que traduzem as suas gravidades, e é estimada através da expressão 4.1. As constantes $k_n = \{0; 1; 2; 3; 4\}$ correspondem a fatores de ponderação dos diferentes níveis de gravidade de degradação que certas anomalias possam ter em relação às restantes. Devido à admissão da possibilidade de sobreposição de anomalias (pertencentes apenas a grupos distintos) ou então à existência de pelo menos uma anomalia com gravidade superior a 1, este parâmetro não possui limite máximo definido (Marques, 2016). Se tais situações não fossem admitidas, então o limite máximo possível seria o valor de **A_n**, a área degradada revestida pelo sistema ETICS.

$$A_w = \sum A_n \times k_n = \sum(A_i \times k_c) + \sum(A_m \times k_m) + \sum(A_d \times k_d) + \sum(A_j \times k_j) \quad (4.1)$$

- **E** - extensão da degradação do revestimento [%]: é considerada como sendo o quociente entre a totalidade da área da fachada degradada e a área total opaca da fachada, e é estimada através da expressão 4.2. Uma vez que se considera possível a sobreposição das anomalias, os valores deste parâmetro variam de 0 (na situação de inexistência de anomalias) a 400% (na situação pouco provável de todos os grupos de anomalias se manifestarem sobre a totalidade do revestimento);

$$E = \frac{\sum A_n}{A} = \frac{A_i + A_m + A_d + A_j}{A} \quad (4.2)$$

- **E_w** - extensão da degradação ponderada [%]: é considerada como sendo o quociente entre a totalidade de área degradada ponderada e a área total da fachada, e é estimada através da expressão 4.3. Este parâmetro difere do anterior na medida em que considera o nível de gravidade de degradação das diferentes anomalias, considerando, de igual modo, a possibilidade da sobreposição das mesmas (apenas de grupos distintos). Assim, os valores do numerador deste parâmetro variam de 0% (na situação de inexistência de anomalias) a 1600% (na situação de todos os grupos de anomalias se manifestarem na totalidade do revestimento e com a máxima gravidade possível);

$$E_w = \frac{A_w}{A} = \frac{\sum(A_n \times k_n)}{A} \quad (4.3)$$





Os elementos anteriores permitem a determinação do índice de severidade de degradação (**S_w**) associado a um determinado revestimento, que é estimado a partir da expressão 4.4. Ele é considerado como o quociente entre a extensão da degradação ponderada e o valor que representa o nível de gravidade de degradação mais elevado ($k = 4$, segundo a escala dos níveis de degradação adotada na

dissertação, apresentada na Tabela 3.1). Na prática, a obtenção deste índice resulta da normalização de uma determinada fachada em relação a uma fachada de referência.

$$S_w = \frac{E_w}{k} \quad (4.4)$$

Os fatores de ponderação k_n , como referido, constituem-se como uma forma de diferenciação dos níveis de gravidade apresentados pelas anomalias. Com a sua utilização, na situação em que dois revestimentos idênticos apresentam uma extensão afetada por anomalias de igual valor, mas com gravidades distintas entre si, torna-se possível a obtenção de valores de severidade de degradação distintos para cada um deles. Estes fatores assumem apenas valores inteiros, apresentando uma variação desde 0, na situação de ausência de degradação visível, até 4, na situação de degradação generalizada. As Tabelas 3.2 a 3.5, referidas no subcapítulo 3.3, auxiliam a definição do fator de ponderação k_n mais adequado a cada anomalia, uma vez que descrevem as principais características associadas a cada um dos tipos de anomalias mais frequentes no sistema ETICS, segundo cada nível de gravidade. A Tabela 4.1 permite a visualização de exemplos tipo de revestimentos classificados segundo cada um dos níveis admitidos.

Tabela 4.1 - Exemplos ilustrativos dos níveis de degradação associados ao sistema ETICS

Nível 1 Alterações pouco perceptíveis	Nível 2 Intensidade ligeira	Nível 3 Intensidade moderada	Nível 4 Degradação generalizada
			

4.2.2. Relação entre severidade e nível de degradação

A estimativa da vida útil dos revestimentos com base em modelos gráficos de degradação só se torna possível com a definição prévia de uma correspondência entre o índice de severidade de degradação e os níveis de degradação admitidos para o sistema ETICS, referidos no capítulo anterior. A correspondência adotada, visível na Tabela 4.2, foi a utilizada por Marques et al. (2018) e também em investigações anteriores e tem por base a metodologia proposta por Gaspar (2009).

Tal como foi adotado por Marques et al. (2018), bem como em outros estudos relacionados com o sistema ETICS, o limite máximo de severidade de degradação considerado para este tipo de revestimento corresponde ao nível 3 (degradação moderada). Deste modo, qualquer revestimento com uma degradação superior a 30% é classificado como tendo atingido o fim da sua vida útil. No entanto, este valor limite é passível de ser alterado em função do nível de exigência pretendido.

Tabela 4.2 - Correspondência entre a severidade de degradação normalizada e a condição global dos revestimentos

Níveis de degradação	Severidade normalizada de degradação
Nível 0 (inalterado)	$S_w \leq 1 \%$
Nível 1 (pouco alterado)	$1 \% < S_w \leq 10 \%$
Nível 2 (degradação ligeira)	$10 \% < S_w \leq 30 \%$
Nível 3 (degradação moderada)	$30 \% < S_w \leq 50 \%$
Nível 4 (degradação generalizada)	$S_w \geq 50 \%$

4.3. Curvas de degradação

A evolução da degradação dos revestimentos com o tempo, em função dos agentes intervenientes nos seus processos de deterioração, pode ser descrita de uma forma gráfica com recurso a curvas de degradação, nas quais o tempo é a variável independente e a degradação é a variável dependente. A sua visualização, para além de tornar perceptível o padrão de degradação do revestimento, também possibilita a determinação da sua vida útil (Serralheiro, 2016). Shohet et al. (1999) e Gaspar (2002) definiram cinco padrões tipicamente apresentados pelas curvas de degradação, referidos de seguida:

- **linear:** corresponde à atuação permanente de um ou mais agentes de deterioração sobre um revestimento, o que se traduz numa evolução constante da sua degradação; as ações atmosféricas estão entre os agentes de deterioração responsáveis por este tipo de comportamento;
- **curva côncava:** corresponde ao desenvolvimento inicial acelerado da degradação apresentada por um revestimento, mas cujo potencial de evolução vai diminuindo com o tempo; os agentes biológicos estão entre as causas com maior responsabilidade por este tipo de comportamento;
- **curva convexa:** corresponde a um desenvolvimento inicial lento da degradação apresentada por um revestimento, embora o seu potencial de evolução acelere com tempo e os efeitos por si provocados se façam sentir cumulativamente; este comportamento deve-se, sobretudo, a fenómenos físicos e químicos que ocorram nos revestimentos;
- **curva em “S”:** corresponde a situações em que a degradação se manifesta de forma precoce num revestimento, embora tenda a estabilizar posteriormente; no entanto, na fase final da sua vida útil, a degradação volta a manifestar-se, tipicamente de forma mais rápida e acentuada do que a verificada na fase inicial; por outras palavras, é um padrão de degradação com intensidade variável ao longo do tempo;
- **fenómenos espontâneos ou discretos:** corresponde a fenómenos de degradação que ocorrem pontualmente e sem previsão aparente, em qualquer fase da vida útil de um revestimento; por este motivo, não são úteis para a modelação da evolução da degradação com o tempo; a degradação de um revestimento causada por ações acidentais, por exemplo, apresenta este tipo de comportamento.

4.3.1. Curva de degradação global

Na Figura 4.1, é apresentada a curva de degradação global obtida para a totalidade da amostra analisada. A curva foi gerada através de uma regressão simples, com a qual foi efetuado o ajuste de uma função polinomial de terceiro grau aos pontos correspondentes aos casos de estudo analisados (364 revestimentos). O modelo de regressão apresenta um coeficiente de determinação de 0,775, o que revela uma forte correlação entre a severidade de degradação e a idade dos revestimentos ETICS, permitindo afirmar que a adequabilidade do modelo à realidade observada é significativa. Por outras palavras, a idade, enquanto única variável incluída no modelo, é capaz de explicar, por si só, cerca de

78% da variabilidade da degradação apresentada pelos revestimentos analisados, sendo que os restantes 22% se devem a outros fatores não avaliados na análise efetuada. Segundo Silva et al. (2011), as características específicas dos revestimentos, a qualidade dos materiais e a sua interação, bem como a conceção e as condições de execução são exemplos desses fatores.

A curva global apresenta uma configuração convexa, o que sugere que a evolução da deterioração dos revestimentos com ETICS segue um padrão lento, na fase inicial da vida útil, aumentando gradualmente de intensidade. Por sua vez, em fases mais avançadas da vida útil, a evolução torna-se mais acelerada, conduzindo a valores mais elevados de degradação. Este padrão assemelha-se aos padrões obtidos nas investigações de Marques et al. (2018) e Ximenes et al. (2014), segundo as quais a deterioração de revestimentos com o sistema ETICS também apresenta uma evolução menos acelerada nos primeiros anos de serviço e aumento de intensidade à medida que o tempo de serviço aumenta.

Apesar de a curva gerada descrever de forma aceitável o comportamento dos casos analisados, graficamente é perceptível a existência de alguma dispersão dos dados. Esta situação verifica-se particularmente para 10, 15, 19 e 26 anos de idade, onde a concentração de casos de estudo (por fazerem parte do mesmo edifício) abrange uma gama alargada de valores de severidade de degradação, o que origina a dispersão gráfica dos dados observada. Marques (2016) utiliza uma técnica que permite atenuar esta variabilidade, que consiste em traçar a curva de degradação a partir da média dos valores de severidade de degradação das fachadas pertencentes a cada edifício. A Figura 4.2 apresenta a curva de degradação global obtida com este procedimento, o que conduz a um aumento do coeficiente de determinação (0,843), aumentando a correlação entre a realidade observada e a curva de degradação proposta.

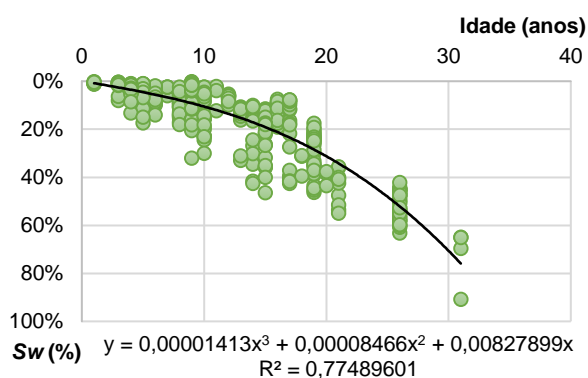


Figura 4.1 - Curva de degradação global

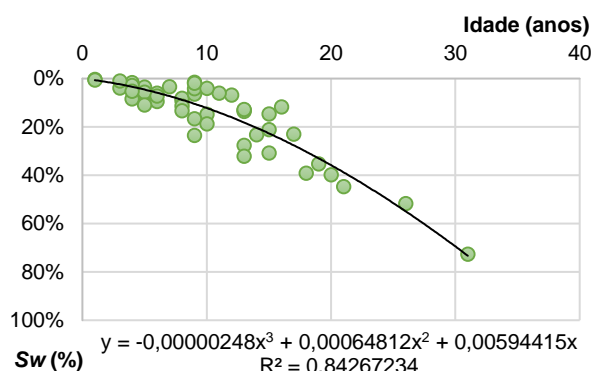


Figura 4.2 - Curva de degradação média global

4.3.2. Influência dos fatores de degradação condicionantes

A caracterização completa do processo de degradação dos revestimentos ETICS requer o estudo de todos os fatores que contribuem para a ocorrência de anomalias. Deste modo, torna-se útil a análise da evolução da degradação que ocorre segundo cada uma das variáveis condicionantes na deterioração sofrida por este tipo de revestimento (caraterísticas das zonas envolventes e caraterísticas próprias dos sistemas, consideradas na análise das amostras no capítulos 3). Para tal, à semelhança do estudo de Marques et al. (2018) e de outros anteriores, são traçadas diversas curvas de degradação, sobre as quais são tecidas algumas considerações sobre o padrão de deterioração apresentado por cada.

Relativamente à influência da orientação das fachadas, a Figura 4.3 apresenta as curvas de degradação obtidas a partir da consideração desta variável.

A associação de uma orientação principal a uma secundária, de acordo com a semelhança de efeitos que provocam nas fachadas, é o procedimento utilizado para contornar o menor número casos associados às orientação secundárias. A análise da figura permite constatar que o padrão de degradação apresentado pelos revestimentos vai ao encontro do que seria de esperar. Ou seja, as orientações N/NE e O/NO são as que apresentam uma degradação mais acelerada (em virtude das condições de exposição mais gravosas às quais estão sujeitas, em termos de humidade e intensidade do vento), ao passo que as orientações S/SO e E/SE apresentam uma degradação menos rápida (em virtude das condições de exposição mais favoráveis às quais estão sujeitas). A orientação E/SE é a que apresenta uma evolução da degradação mais lenta (face à orientação E/SE, a exposição solar mais prolongada segundo a orientação S/SO promove maiores gradientes térmicos e gera maiores tensões internas nos revestimentos, o que a torna mais gravosa). Todas as curvas de degradação apresentam coeficientes de determinação com valores elevados, o que justifica a existência de uma boa correlação com os dados. Assim, a degradação dos revestimentos é relativamente bem retratada com recurso a esta variável.

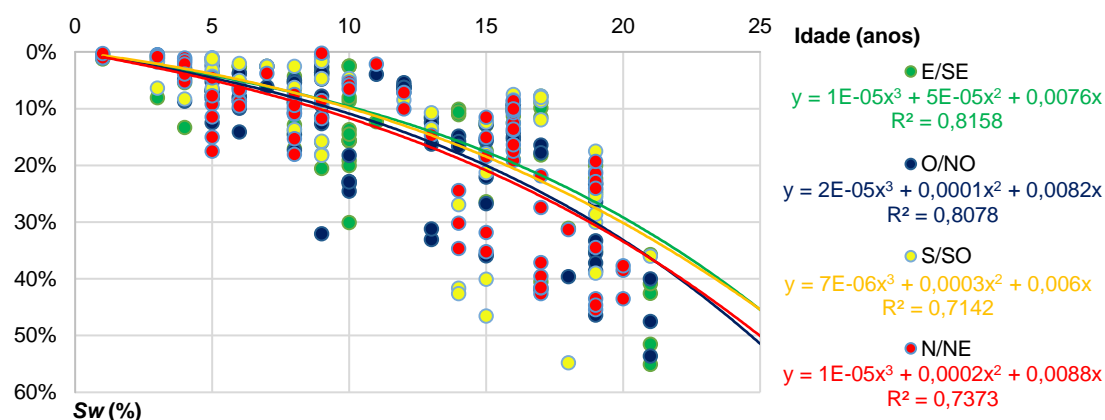


Figura 4.3 - Curva de degradação em função da orientação das fachadas

As curvas de degradação a partir da consideração da proximidade ao mar como variável explicativa são apresentadas na Figura 4.4, sendo possível constatar que a evolução da degradação coincide com a realidade física expectável. Ou seja, para distâncias mais próximas ao mar a degradação dos ETICS é mais acelerada (a forte exposição à humidade e aos elementos químicos transportados pela brisa marítima conduz a uma deterioração mais rápida dos elementos) e para distâncias maiores é menos acelerada. No que diz respeito aos coeficientes de determinação, o valor associado à maior distância ao mar não é muito significativo, devido à elevada dispersão dos casos segundo esta classe. Apesar de o valor do coeficiente de determinação associado à classe de maior proximidade ser elevado, como este deriva de um número inferior de casos, não distribuídos de forma homogénea ao longo do tempo, tem de ser interpretado com algum cuidado.

A Figura 4.5 apresenta as curvas de degradação obtidas em função da exposição à humidade. A sua análise revela que as curvas apresentam padrões de degradação que estão de acordo com a realidade esperada, uma vez que a evolução da degradação na classe de exposição alta é mais acelerada do que na classe de exposição baixa (a presença de humidade é um fator que potencia a deterioração dos elementos). A partir dos coeficientes de determinação, que apresentam valores elevados em ambos os casos, é possível afirmar que as duas curvas apresentam uma boa correlação com a realidade observada.

A consideração da ação combinada da chuva e do vento como variável explicativa permite a

obtenção das curvas de degradação visíveis na Figura 4.6. Embora os coeficientes de determinação obtidos sejam elevados em ambas as classes, o padrão da evolução da degradação apresenta algumas incongruências com a realidade física esperada. Uma vez que à classe de exposição alta estão associadas condições de mais desfavoráveis, seria de esperar que a degradação apresentada pelos revestimentos fosse sempre mais elevada do que a degradação apresentada segundo a outra classe. Embora isso se verifique nas curvas de degradação para idades dos revestimentos mais elevadas, o mesmo não acontece para idades mais jovens (as curvas interseccionam-se). A existência de um menor número de casos de estudo classificados segundo a classe de exposição baixa pode servir para justificar a existência desta situação nas curvas de degradação obtidas. De qualquer forma, tal como seria esperado, a curva relativa aos casos com exposição alta à ação vento-chuva atinge mais cedo o limite estabelecido como sendo o fim da vida útil dos sistemas ETICS (Sw de 30%).

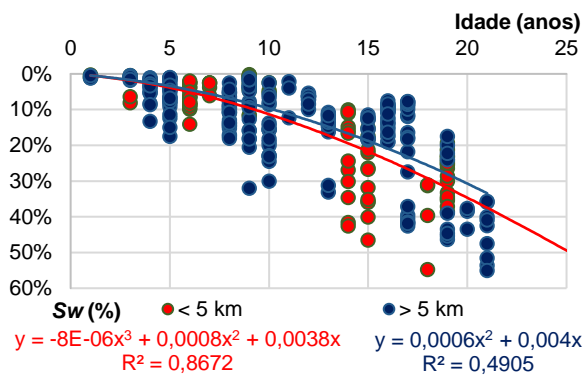


Figura 4.4 - Curva de degradação em função da proximidade ao mar das fachadas

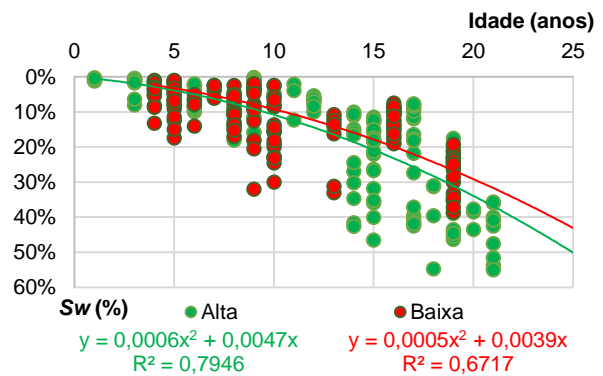


Figura 4.5 - Curva de degradação em função da exposição à humidade das fachadas

As curvas de degradação obtidas quando se considera a exposição aos poluentes como variável explicativa são apresentadas na Figura 4.7. A sua análise permite concluir que a evolução da degradação por elas evidenciada vai ao encontro da realidade física esperada. À classe de exposição alta associa-se uma evolução da degradação mais pronunciada do que a associada à classe de exposição baixa, o que conduz, por sua vez, a um fim de vida útil mais rápido (a elevada exposição aos poluentes propicia a maior fixação de partículas nos revestimentos, promovendo a sua degradação). Em relação aos coeficientes de determinação, apesar da classe de exposição baixa apresentar um valor alto, o mesmo não se passa na classe de exposição alta, o que revela a existência de uma maior dispersão dos dados.

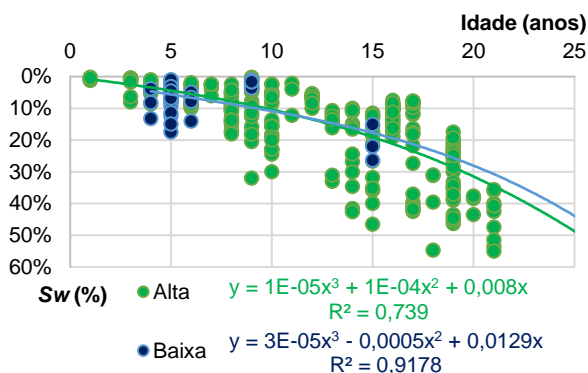


Figura 4.6 - Curva de degradação em função da ação chuva-vento sobre as fachadas

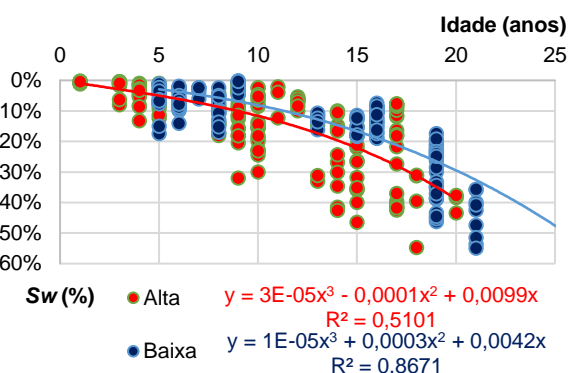


Figura 4.7 - Curva de degradação em função da exposição aos agentes poluentes das fachadas

A Figura 4.8 permite a visualização das curvas de degradação obtidas com a consideração do tipo de revestimento como variável explicativa. A sua análise revela a existência de um número muito reduzido de casos nas classes de revestimento reforçado e revestimento cerâmico (às quais estão associados coeficientes de determinação sem qualquer validade estatística). Deste modo, existindo apenas uma classe de revestimento com um número significativo de casos (à qual está associada um coeficiente de determinação elevado), não se podem retirar conclusões inequívocas sobre a influência deste fator, por si só, na degradação apresentada pelos revestimentos com o sistema ETICS.

A consideração da textura do acabamento dos revestimentos como variável explicativa permite a obtenção das curvas de degradação da Figura 4.9. As classes de textura lisa e rugosa apresentam um comportamento que vai ao encontro da realidade esperada, com uma evolução mais acelerada nos revestimentos de textura rugosa, uma vez que esta propicia a acumulação de detritos, que promove manifestações anómalas, sobretudo de cariz estético. No entanto, a existência de um número muito reduzido de casos nas classes de textura lisa e de outra textura (a par do coeficiente de determinação sem qualquer validade estatística associado a esta segunda classe) não permitem que, uma vez mais, se possam tecer conclusões claras sobre a influência deste parâmetro na degradação dos revestimentos ETICS.

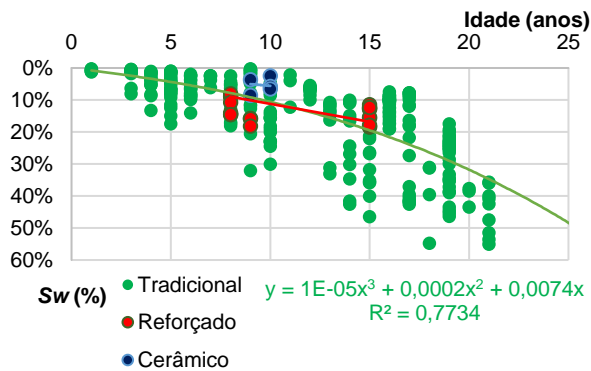


Figura 4.8 - Curva de degradação em função do tipo de revestimento das fachadas

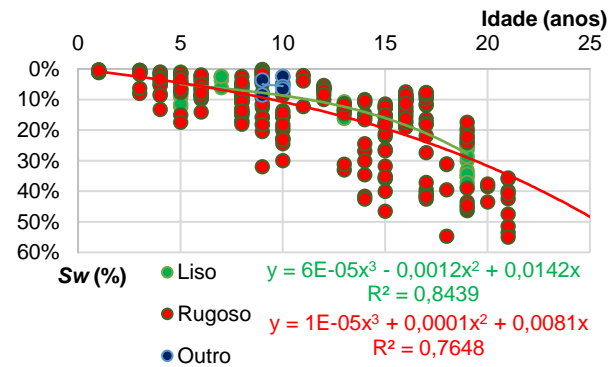


Figura 4.9 - Curva de degradação em função da textura do acabamento das fachada

As curvas de degradação que se obtêm com a consideração da cor das fachadas como variável explicativa, visíveis na Figura 4.10, revelam um padrão de degradação coerente com a realidade física expectável. Uma vez que as cores claras facilitam a perceção da existência de anomalias (as de natureza estética, em particular), as curvas de degradação segundo as classes cores claras e branco apresentam uma evolução mais acelerada. Por oposição, apesar de os revestimentos com cores escuras favorecerem a absorção de calor e gerarem mais tensões internas, as anomalias que por este motivo surgem não se desenvolvem de forma tão acelerada. Assim, esta classe apresenta uma evolução da degradação mais lenta. No entanto, o baixo coeficiente de determinação relativo a esta classe (uma vez que advém de um número reduzido de casos) e a interseção das curvas correspondentes às restantes duas classes, não permitem que a degradação sofrida pelos revestimentos seja convenientemente justificada com recurso apenas a esta variável.

Por último, no que diz respeito ao tipo de remate inferior, as curvas de degradação obtidas a partir da amostra analisada encontram-se visíveis na Figura 4.11. A partir delas conclui-se que, tal como seria de esperar, a degradação associada à classe de perfil de arranque elevado apresenta um padrão evolutivo mais lento do que as restantes classes, uma vez que este tipo de remate contribui

para uma boa proteção da zona acessível das fachadas. No entanto, o valor do coeficiente de determinação obtido para esta curva de degradação é relativamente baixo (0,545). Relativamente às restantes classes, seria de esperar uma evolução da degradação segundo a classe lambril mais branda do que a manifestada pela classe outra (uma vez que a esta classe dizem respeito as fachadas sem qualquer proteção inferior). O que se verifica através das curvas são evoluções da degradação praticamente coincidentes em ambas as classes. Assim, esta variável por si só não possibilita uma definição clara da evolução da degradação dos revestimentos.

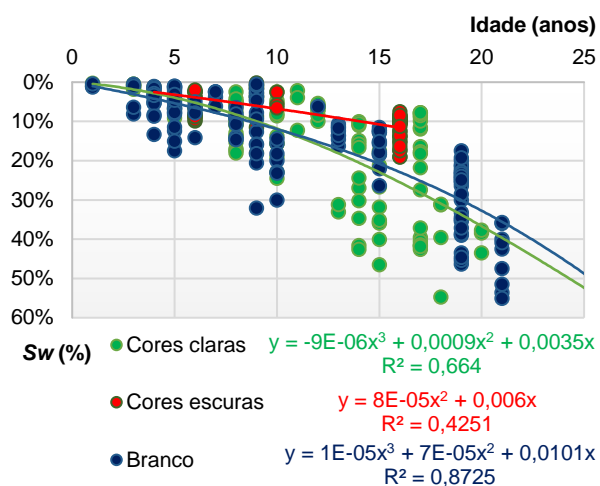


Figura 4.10 - Curva de degradação em função da cor das fachadas

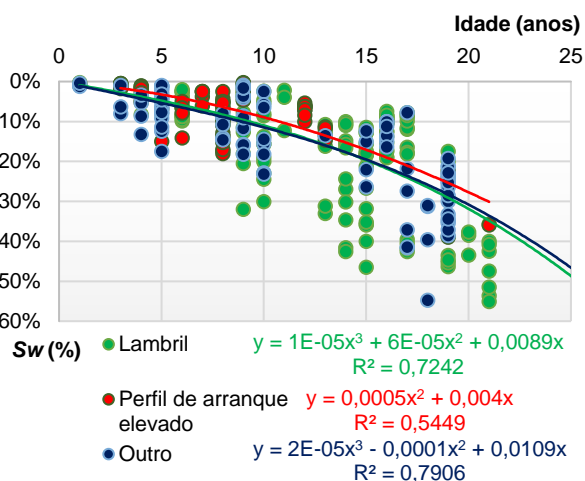


Figura 4.11 - Curva de degradação em função do tipo de remate inferior das fachada

4.4. Análise dos resultados

Uma das vantagens associadas à utilização do método gráfico é a obtenção, de uma forma simples, de uma estimativa para a vida útil de um dado tipo de revestimento. Esta estimativa resulta da interseção da linha horizontal correspondente ao nível mínimo de desempenho aceitável para esse revestimento com a curva de degradação global, gerada através do método gráfico. De modo análogo, a estimativa da vida útil também pode ser obtida com recurso à expressão matemática que caracteriza a curva global, através do cálculo da idade a partir da qual se obtém uma severidade de degradação igual ao limite associado ao fim de vida do revestimento.

A curva de degradação global obtida (Figura 4.3) fornece uma estimativa para a vida útil deste tipo de revestimento de 19,56 anos (cerca de 20 anos). Este valor é semelhante à estimativa da vida útil fornecida com a investigação de Marques et al. (2018), também ela de aproximadamente 20 anos.

Na bibliografia existente sobre o sistema ETICS são várias as fontes que indicam valores de vida útil a esperar para esta solução de revestimento. Por exemplo, a ETAG 004 (2013) refere uma vida útil de pelo menos 25 anos, desde que sejam asseguradas condições de utilização adequadas e ações de manutenção regulares. Tůmová et al. (2017), num estudo relacionado com o desenvolvimento de materiais isolantes biodegradáveis, para a sua incorporação em sistemas ETICS, afirma que a vida útil expectável para estes sistemas se encontra no intervalo de 25 a 30 anos, para condições de uso e de manutenção adequadas. Paczkowski (2013), tendo por base o sistema de avaliação de edifícios sustentáveis estabelecido pelo *German Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development*, refere uma vida útil para sistemas ETICS mais elevada, de 40 anos. A diferença entre os valores previstos por estes estudos e o valor obtido

na presente investigação pode ser justificada pelo facto de nenhum dos revestimentos analisados na presente dissertação ter sido alvo de ações de manutenção regulares, uma hipótese considerada nos estudos presentes na literatura. A falta de manutenção regular acelera os processos de deterioração que afetam os revestimentos, conduzindo a um valor mais reduzido da sua vida útil. Liisma et al. (2014) apoiam esta afirmação, referindo que a vida útil de ETICS tende a revelar-se menor do que o valor de 25 anos preconizado pela ETAG 004 (2004), sendo a falta de ações de manutenção um dos seus motivos. Künzel et al. (2006), segundo o conceito de que os sistemas ETICS atingem o fim da vida útil quando não cumprem todos os seus requisitos de desempenho, mencionam o valor de 20 anos como referência para a necessidade de ações de reabilitação sobre os revestimentos. Silva e Falorca (2009), num estudo sobre um modelo de manutenção de edifícios correntes, definem uma vida útil para estes sistemas de 24 a 28 anos. A ausência de manutenção em condições normais de serviço, admitida nesta investigação, levou a um valor de vida útil mais próximo do valor obtido pelo método gráfico no presente estudo.

4.5. Conclusão

O principal objetivo do presente capítulo foi a aplicação do método gráfico para a estimação da vida útil de revestimentos ETICS. Este método teve por base a metodologia de Gaspar (2009) e possibilitou a definição de uma curva de degradação global, que permite correlacionar a severidade de degradação de um revestimento e a sua idade. Esta ferramenta, para além de permitir a perceção da evolução da degradação ao longo do tempo de um dado tipo de revestimento, possibilita também a obtenção de um valor para a sua vida útil. Para tal, apenas é necessário o conhecimento do limite máximo de degradação a partir do qual se considera que os revestimentos deixam de satisfazer todos os seus requisitos de desempenho. Neste estudo, o valor obtido para a vida útil de revestimentos ETICS foi de 20 anos, aproximadamente, considerando como limite máximo admissível, uma severidade de degradação de 30%.

Embora a curva de degradação global descreva de forma aceitável a perda de desempenho destes revestimentos, o mesmo não acontece para todas as curvas de degradação quando elas são traçadas em função de cada um dos fatores condicionantes do fenómeno de degradação. Este facto pode ser justificado tanto pela baixa relevância estatística de alguns fatores como pela influência de outros fatores não tidos em consideração na análise efetuada (devido às limitações associadas à metodologia de recolha de informação adotada no presente estudo).

5. Métodos computacionais

5.1. Introdução

As situações em que a observação direta de um fenómeno real permite uma boa compreensão da sua evolução natural, bem como de todos os processos nele envolvidos, são pouco frequentes nas áreas científicas. Nestes casos, a modelação dos fenómenos assume uma maior utilidade. Os modelos matemáticos de previsão são ferramentas que os descrevem e que permitem uma avaliação do seu comportamento futuro, servindo de suporte, em última instância, aos processos de tomada de decisão.

Das várias técnicas de modelação existentes nos tempos atuais, as técnicas computacionais encontram-se entre as mais populares. Uma das suas principais vantagens refere-se à capacidade de previsão que apresentam, garantida através de processos de aprendizagem (admitindo que os mesmos padrões encontrados no passado se vão manifestar também no futuro). A modelação com recurso a técnicas computacionais exige duas fases distintas: i) fase de treino, a partir da qual os modelos “aprendem” com base num determinado conjunto de observações; ii) fase de teste, que visa a validação dos modelos através da análise dos resultados por eles fornecidos após a apresentação de um novo conjunto de dados, até então desconhecido. Eventualmente, pode ainda ser usado um conjunto de validação cruzada para monitorizar a evolução dos erros sobre observações não usadas durante o treino (Silva et al., 2016a). As suas características próprias, que aliam conhecimento baseado no raciocínio humano à inferência matemática para uma aprendizagem a partir do ambiente exterior, tornam os modelos computacionais particularmente úteis quando estão em causa sistemas de representação matemática complexa ou cujos processos são não lineares e variáveis no tempo (Siddique e Adeli, 2013).

O objetivo deste capítulo é a aplicação de métodos computacionais, baseados em redes neurais artificiais e em princípios de lógica difusa, à previsão da vida útil de revestimentos ETICS. A utilização recente de ambas as técnicas em vários problemas reais, relacionados com a engenharia civil e não só, motivou a sua utilização na presente dissertação. As redes neurais artificiais, inspiradas no funcionamento biológico do cérebro, são conhecidas pela sua capacidade de adaptação a um conjunto de dados, com os quais adquirem conhecimento, sendo capazes de generalizar e aplicar o conhecimento obtido a um novo universo de casos (Silva et al., 2016a). Os modelos de lógica difusa, apesar de possuírem uma complexidade acrescida, que condiciona a sua utilização, possuem diversas vantagens. Entre elas, destacam-se a capacidade de lidar eficientemente com dados vagos e imprecisos, a habilidade para a representação de sistemas complexos não lineares e a capacidade de generalização (Silva et al., 2016b). Todas as considerações gerais e fundamentos teóricos subjacentes à construção dos modelos, com base em cada técnica referida, são descritos neste capítulo, de forma sucinta. Após a sua validação, os modelos são utilizados para a estimação de um valor de vida útil associado ao sistema ETICS.

Frequentemente, em problemas de elevada complexidade e onde são vários os fatores ou variáveis que afetam um dado fenómeno, a utilização de técnicas computacionais requer a realização de uma análise prévia. O seu objetivo fundamental é a distinção das variáveis estatística e fisicamente relevantes para a explicação da variabilidade associada ao fenómeno analisado, e que devem ser integradas nos modelos para a obtenção de resultados significativos. Nesta dissertação, a identificação das variáveis estatisticamente significativas foi efetuada através de uma técnica de análise de regressão.

5.2. Identificação das variáveis explicativas - modelos de regressão múltipla linear

5.2.1. Considerações gerais

A regressão múltipla linear (RML) é uma das técnicas estatísticas mais utilizadas na modelação de fenómenos reais influenciados por um número elevado de fatores (Mata, 2011). Ao passo que a regressão simples avalia o comportamento da variável dependente com base numa única variável independente (ou explicativa), na regressão múltipla, o mesmo ocorre tendo por base mais do que uma variável independente. A consideração de um maior número de variáveis (desde que contribuam significativamente para a explicação do fenómeno em análise), torna expectável a obtenção de modelos com maior capacidade explicativa da realidade observada, ou seja, mais eficazes (Wooldridge, 2009).

O método *stepwise* é um dos algoritmos de seleção (passo a passo) de variáveis mais utilizados. Este método inicia-se com a inclusão de uma única variável independente (a que mais se correlaciona com a variável dependente), sendo avaliada a variação da significância do modelo à medida que são adicionadas novas variáveis (Montgomery e Ruger, 2003). Silva (2015) refere que, com a utilização de métodos passo a passo como este na construção de modelos de regressão, é garantida uma adequada significância estatística dos modelos, uma vez que são eliminados os efeitos da multicolinearidade (existência de correlação entre variáveis independentes, que se explicam entre si).

Após a construção de um modelo de regressão, a realização de qualquer inferência estatística implica uma avaliação prévia à qualidade do modelo. Para tal, é utilizado um procedimento conhecido como diagnóstico de regressão, que analisa o grau de consistência do modelo e dos seus pressupostos com os dados, por intermédio de uma associação de métodos gráficos e testes estatísticos (Montgomery e Ruger, 2003). A ausência desta avaliação pode condicionar a fiabilidade dos resultados obtidos.

A utilidade desta ferramenta na previsão da vida útil dos revestimentos de fachada é elevada, como comprova a sua aplicação em diversas investigações deste âmbito (Silva et al., 2011, 2013; Dias et al., 2014). Uma vez que são vários os fatores que afetam a durabilidade dos revestimentos, a sua utilização permite a distinção matematicamente fundamentada dos que possuem maior influência no processo de degradação. Com estes fatores, por sua vez, torna-se possível a construção de modelos capazes de fornecer indicações fidedignas sobre a evolução da deterioração ao longo do tempo.

5.2.2. Metodologia de construção dos modelos

Na presente dissertação, a RML foi executada com o auxílio do *software* SPSS® (*Statistical Package for Social Sciences*). Para tal, foram admitidas 10 variáveis independentes, escolhidas com base nos fatores condicionantes da deterioração dos revestimentos com ETICS, identificados no capítulo 3.

Dada a natureza categórica da maioria das variáveis (com exceção da variável idade, de natureza numérica), antes da realização da análise de regressão foi necessária uma conversão para valores numéricos. A quantificação das variáveis foi efetuada segundo uma metodologia semelhante à proposta por Gaspar (2009), utilizada também por Marques et al. (2018), que se baseia na relação entre o padrão de degradação global evidenciado pela amostra e os padrões de degradação associados a cada variável explicativa. Por outras palavras, tendo por base a curva de degradação global e as curvas de degradação associadas a cada uma das variáveis, apresentadas no capítulo 4, foi determinada a vida útil estimada

por cada uma das curvas e adotado o resultado obtido pela razão entre o valor estimado por cada variável explicativa e o valor médio global estimado. Na Tabela 5.1, é visível a quantificação utilizada com base neste procedimento. Para a variável idade, foi adotada a própria idade dos revestimentos. A variável dependente considerada na análise de regressão foi a severidade de degradação.

A análise de regressão, com o método *stepwise*, identificou 5 variáveis com relevância estatística significativa na explicação da degradação observada dos revestimentos: idade; mar; poluentes; acabamento; e orientação (referidas por ordem decrescente de relevância). Embora se entenda a influência de todos os fatores na evolução da degradação (sendo a influência da idade acrescida, em relação às restantes), o tipo de acabamento apresenta o problema da falta de representatividade de casos numa das suas classes (a classe “outro”, que diz respeito a acabamentos do tipo cerâmico, possui um número muito reduzido de casos na amostra). Por este motivo, a fim de se evitar uma potencial influência negativa deste parâmetro no modelo (ou enviesamento dos resultados), a opção recaiu na realização de uma nova análise, desta vez sem a presença da variável “tipo de acabamento”. A segunda análise conduziu à identificação de apenas três variáveis: idade; mar; e poluentes (também por ordem decrescente de relevância). Com estes resultados, uma vez que a presente dissertação visa a criação de modelos de previsão da vida útil com base em relações matemáticas viáveis entre a degradação dos revestimentos e as variáveis significativas, considerou-se relevante explorar a utilização de ambos os conjuntos de variáveis para a criação de dois tipos de modelos distintos: um baseado no conjunto de três variáveis e outro baseado no de cinco variáveis.

Tabela 5.1 - Quantificação adotada na análise de regressão, para as variáveis independentes

		VUE média [anos]	19,5
		VUE [anos]	Quantificação
Orientação da fachada	N/NE	18,7	0,959
	S/SO	19,9	1,021
	E/SE	20,3	1,041
	O/NO	18,9	0,969
Proximidade ao mar	< 5 km	18,7	0,959
	> 5 km	19,7	1,010
Exposição à humidade	Alta	18,6	0,954
	Baixa	20,3	1,041
Exposição à ação chuva-vento	Alta	19,4	0,995
	Baixa	20,7	1,062
Exposição aos poluentes	Alta	17,6	0,903
	Baixa	20,1	1,031
Tipo de revestimento	Tradicional	19,3	0,990
	Reforçado	26,7	1,369
	Cerâmico	53,7	2,754
Tipo de acabamento	Liso	19,5	1,000
	Rugoso	19,3	0,990
	Cerâmico	53,7	2,754
Cor do revestimento	Claras	17,6	0,903
	Escuras	34,4	1,764
	Branco	18,9	0,969
Tipo de remate inferior	Perfil	19,3	0,990
	Lambril	20,9	1,072
	Outro	19,6	1,005

A execução de análises de regressão providencia um conjunto de coeficientes que permitem a construção de modelos de previsão. Embora não pertençam ao domínio computacional, considerou-se relevante a sua criação e posterior comparação com os restantes modelos computacionais. Após a construção dos dois modelos de regressão, as hipóteses subjacentes à análise de regressão foram asseguradas, através de análises sobre os resíduos. Com a execução de análises de regressão através do SPSS®, são fornecidos diversos indicadores estatísticos, de grande utilidade para a avaliação da

significância estatística dos modelos obtidos por esta via. Alguns desses indicadores encontram-se nas Tabelas 5.2 e 5.3, que apresentam um sumário dos modelos de regressão (com três e cinco variáveis explicativas, respetivamente). A análise dos coeficientes de determinação revela uma adequada capacidade, de ambos os modelos propostos, para a explicação da variabilidade associada ao fenómeno de degradação dos revestimentos. Assim, os valores de 0,718, no modelo com três variáveis e de 0,725, no modelo com cinco variáveis, asseguram uma correspondência adequada entre os valores fornecidos pelo modelo e a realidade observada. Acima de tudo, estas análises permitem identificar as variáveis relevantes que deverão ser incluídas posteriormente nos modelos computacionais.

Tabela 5.2 - Sumário do modelo de RML com três variáveis

Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Erro padrão da estimativa
1	0,821	0,674	0,673	0,09805
2	0,835	0,697	0,695	0,09460
3	0,847 ^a	0,718	0,715	0,09146
a. Variáveis dependentes: (constante), Idade (anos), Mar, Poluentes				

Tabela 5.3 - Sumário do modelo de RML com cinco variáveis

Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Erro padrão da estimativa
1	0,821	0,674	0,673	0,09805
2	0,835	0,697	0,695	0,09460
3	0,847	0,718	0,715	0,09146
4	0,849	0,722	0,718	0,09097
5	0,851 ^a	0,725	0,721	0,09054
a. Variáveis dependentes: (constante), Idade (anos), Mar, Poluentes, Acabamento, Orientação				

A tabela ANOVA, que, para cada um dos modelos propostos, se encontra nas Tabelas 5.4 e 5.5, permite uma análise à significância estatística de cada um. Em ambos os casos, o valor da estatística *F* revela-se bastante superior ao valor crítico (2,630, no caso do modelo com três variáveis, e 2,239, no caso do modelo com cinco variáveis, para um nível de significância de 5%). Deste modo, a hipótese nula é rejeitada nos dois modelos, o que revela que as variáveis independentes adotadas explicam a variabilidade da variável dependente, ou seja, a variabilidade da severidade de degradação dos ETICS.

Tabela 5.4 - Tabela ANOVA do modelo de RML com três variáveis

Modelo		Soma dos desvios quadráticos	Graus de liberdade	Desvio quadrático médio	<i>F</i>	Significância
3	Regressão	7,656	3	2,552	305,097	0,000 ^a
	Resíduo	3,011	360	0,008		
	Total	10,668	363			
a. Variáveis independentes: (constante), Idade, Mar, Poluentes						

Tabela 5.5 - Tabela ANOVA do modelo de RML com cinco variáveis

Modelo		Soma dos desvios quadráticos	Graus de liberdade	Desvio quadrático médio	<i>F</i>	Significância
5	Regressão	7,733	5	1,547	188,683	0,000 ^a
	Resíduo	2,934	358	0,008		
	Total	10,668	363			
a. Variáveis independentes: (constante), Idade, Mar, Poluentes, Acabamento, Orientação						

Os coeficientes dos dois modelos propostos são apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7. A estatística *t* associada a cada variável independente, também presente nas tabelas 5.6 e 5.7, também permite uma avaliação da significância do modelo. Nos dois casos, o valor crítico de *t* (1,967 em ambos os modelos, para um nível de significância de 5%) revela-se sempre inferior ao valor absoluto de *t* de cada variável. Assim, são rejeitadas todas as hipóteses nulas formuladas nesta avaliação, sendo possível afirmar que, em ambos os modelos, todas as variáveis são úteis para a explicação da variável dependente.

Tabela 5.6 - Coeficientes de regressão do modelo com três variáveis, obtidos pelo SPSS®

Modelo	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig.	Intervalo de confiança a 95% para os valores de B		Estatísticas de colinearidade		
	B	Erro Padrão	Beta			Lim. inferior	Lim. superior	Tolerância	VIF	
3	(Constante)	1,524	0,226		6,746	0,000	1,079	1,968		
	Idade	0,020	0,001	0,859	26,230	0,000	0,018	0,021	0,732	1,367
	Mar	-1,219	0,201	-0,177	-6,058	0,000	-1,614	-0,823	0,920	1,087
	Poluentes	-0,445	0,087	-0,167	-5,123	0,000	-0,616	-0,274	0,740	1,351

Tabela 5.7 - Coeficientes de regressão do modelo com cinco variáveis, obtidos pelo SPSS®

Modelo	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig.	Intervalo de confiança a 95% para os valores de B		Estatísticas de colinearidade		
	B	Erro Padrão	Beta			Lim. inferior	Lim. superior	Tolerância	VIF	
5	(Constante)	1,862	0,265		7,023	0,000	1,340	2,383		
	Idade	0,020	0,001	0,864	26,617	0,000	0,019	0,021	0,730	1,370
	Mar	-1,189	0,200	-0,173	-5,957	0,000	-1,581	-0,796	0,916	1,092
	Poluentes	-0,470	0,087	-0,176	-5,433	0,000	-0,640	-0,300	0,732	1,366
	Acabamento	-0,055	0,023	-0,066	-2,356	0,019	-0,101	-0,009	0,977	1,024
	Orientação	-0,290	0,138	-0,059	-2,106	0,036	-0,561	-0,019	0,994	1,006

Com os coeficientes de regressão, tornou-se possível a formulação das equações matemáticas que permitem a quantificação da severidade de degradação de um determinado revestimento com o sistema ETICS, em função dos fatores considerados em cada modelo (Equações 5.1 e 5.2, referentes, respetivamente, aos modelos com três e com cinco variáveis). Nas equações, *I* representa a idade dos revestimentos, *M* a proximidade ao mar, *P* a classe de exposição dos revestimentos aos poluentes, *A* o tipo de acabamento e *O* a orientação de cada fachada. A estimação da degradação pelas equações implica a utilização da quantificação das variáveis apresentada na Tabela 5.1.

$$S_{WRML} = 0,020 \cdot I - 1,219 \cdot M - 0,445 \cdot P + 1,524 \quad (5.1)$$

$$S_{WRML} = 0,020 \cdot I - 1,189 \cdot M - 0,470 \cdot P - 0,055 \cdot A - 0,290 \cdot O + 1,862 \quad (5.2)$$

Apesar da elevada importância da análise à significância estatística dos modelos, antes da sua implementação, a avaliação do seu sentido físico é uma necessidade de importância igual ou acrescida. As duas equações propostas revelam-se lógicas do ponto de vista físico, isto é, no que diz respeito à influência de cada uma das suas variáveis sobre a severidade de degradação dos sistemas ETICS. A idade, estando associada a um coeficiente positivo, contribui para o aumento da degradação dos revestimentos. As restantes variáveis, uma vez que têm associadas aos fatores favoráveis uma quantificação mais elevada (por exemplo, a classe relativa a ETICS “a mais de 5 km do mar” é quantificada pelo valor 1,010, enquanto à classe “a menos de 5 km do mar” foi atribuído um valor de 0,959), apresentam coeficientes negativos. Estas evidências sugerem que condições favoráveis contribuem para a diminuição da degradação dos revestimentos, ao passo que condições desfavoráveis contribuem para o seu aumento.

A aplicação das equações matemáticas a cada caso de estudo permitiu a obtenção dos valores de severidade de degradação fornecidos pelos modelos de RML. A comparação entre os valores observados e os valores previstos (graficamente e através de parâmetros estatísticos) possibilitou a análise das suas respetivas capacidades preditivas. Segundo Nakashima et al. (2000), a análise da capacidade preditiva dos modelos de previsão é um aspeto relevante, pois permite aferir a aptidão do modelo na descrição do fenómeno analisado. A garantia desta capacidade permite a validação dos modelos e assegura confiabilidade nas suas previsões. No entanto, existem sempre incertezas associadas aos modelos de previsão, uma vez que estes apenas são uma tradução aproximada do mundo real e deixam sempre por

explicar, de forma inevitável, alguma variabilidade associada aos fenômenos (Silva et al., 2016a).

Os parâmetros estatísticos utilizados na validação dos modelos foram: i) o erro médio percentual normalizado em relação ao máximo ($\bar{\epsilon}$); ii) o erro percentual normalizado máximo (ϵ_{max}); iii) o erro quadrático médio normalizado ($EQMN$); iv) o coeficiente de correlação de Pearson (r). As equações destes parâmetros (Equações 5.3 a 5.5) consideram um conjunto com P padrões, onde, para cada padrão p , a variável t_p é o respetivo valor real, a variável z_p é o valor fornecido pelo modelo e a variável $t_{máx}$ é o maior valor real no conjunto de dados. Para além dos indicadores estatísticos referidos, também foi calculada a percentagem de casos com erros ϵ superiores a 5%, 10%, 20% e 30% ($PP_{\epsilon>x}$).

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (\epsilon_p), \quad \text{com} \quad \epsilon_p = \left| \frac{z_p - t_p}{t_{máx}} \right| \cdot 100 \% \quad (5.3)$$

$$EQMN = \frac{EQM}{\bar{t}}, \quad \text{com} \quad EQM = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (z_p - t_p)^2} \quad e \quad \bar{t} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P t_p \quad (5.4)$$

$$r = \frac{\sum_p (z_p - \bar{z}) (t_p - \bar{t})}{\sqrt{\sum_p (z_p - \bar{z})^2 \sum_p (t_p - \bar{t})^2}}, \quad \text{com} \quad \bar{z} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P z_p \quad (5.5)$$

A relação entre os valores reais observados e os valores previstos pelos modelos de RML (com três e cinco variáveis), correspondentes aos 364 casos de estudo, é apresentada na Figura 5.1. A análise da figura evidencia uma tendência para a sobrestimação dos valores da severidade de degradação dos ETICS por parte dos dois modelos. Na Tabela 5.8, são visíveis os parâmetros estatísticos associados a cada um dos modelos de regressão propostos. Os três primeiros parâmetros ($\bar{\epsilon}$, ϵ_{max} e $EQMN$) revelam que ambos os modelos possuem erros com valores relativamente baixos. As percentagens de casos com erros ϵ superiores a $x = \{5\%; 10\%; 20\%; 30\%\}$ ($PP_{\epsilon>x}$) também o comprovam, uma vez que os valores obtidos são progressivamente menores. O coeficiente de Pearson associado aos dois modelos possui um valor elevado (superior a 0,8), o que permite concluir que existe uma boa correlação entre os valores observados e os valores previstos pelos modelos de regressão. Uma vez que os parâmetros estatísticos não apresentam valores preocupantes, é assegurada uma adequada capacidade preditiva dos dois modelos de regressão propostos, o que permite, por sua vez, a sua validação. A comparação entre os dois modelos propostos revela que, face ao modelo com três variáveis, a inclusão adicional de duas variáveis não conduziu a uma melhoria muito significativa da sua capacidade preditiva (verificando-se um acréscimo de apenas 0,5% no coeficiente de correlação obtido para o modelo com cinco variáveis).

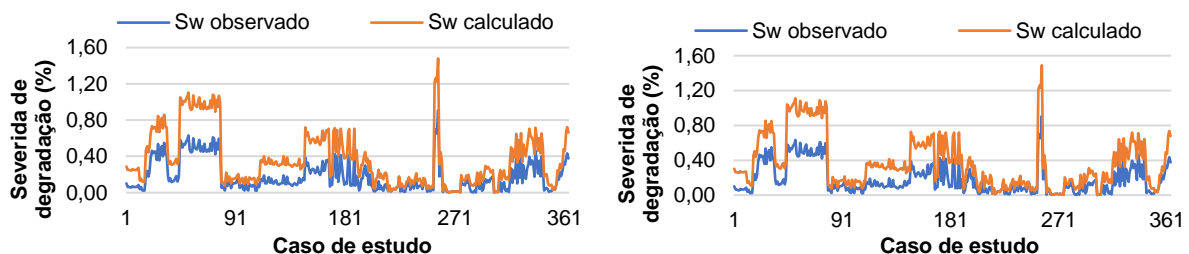


Figura 5.1 - Relação entre os valores observados e previstos pelo modelo de RML com três variáveis (à esquerda) e com cinco variáveis (à direita)

Tabela 5.8 - Parâmetros estatísticos utilizados na análise da validade dos modelos de RML

Modelo	$\bar{\epsilon}$	ϵ_{max}	$EQMN$	$PP_{\epsilon>5\%}$	$PP_{\epsilon>10\%}$	$PP_{\epsilon>20\%}$	$PP_{\epsilon>30\%}$	r
3 variáveis	7,87%	31,17%	48%	62%	35%	4%	0%	0,847
5 variáveis	7,70%	36,20%	47%	60%	33%	4%	0%	0,851

5.2.3. Aplicação à previsão da vida útil de revestimentos ETICS

A determinação da vida útil de revestimentos ETICS, estimada com base nos modelos de regressão propostos, consiste na utilização das equações 5.1 e 5.2. Para tal, é determinada a idade para a qual é atingido o limite máximo de degradação admissível ($S_w = 30\%$), que corresponde ao fim da vida útil destes sistemas, em função dos fatores incluídos nos modelos. Para cada modelo de regressão, a aplicação desta metodologia a cada caso de estudo conduz à obtenção dos histogramas apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3. A partir do modelo de RML com três variáveis, é estimada uma vida útil média de 20,9 anos, com um desvio padrão de 1,8 anos e uma moda de 20,6 anos. Por sua vez, a partir do modelo de RML com cinco variáveis, é estimada uma vida útil média de 20,8 anos, com um desvio padrão de 2,0 anos. O valor mais recorrentemente obtido é de 19,9 anos. A cada histograma foi ajustada uma distribuição normal. O teste à normalidade dos valores de vida útil estimados foi efetuado de forma gráfica, através da análise dos gráficos de probabilidade normal. Ambos os casos verificaram bom ajuste dos dados à linha de tendência diagonal, existente em cada gráfico. Segundo Schmidt e Finan (2018), esta situação é um bom indicador da existência de normalidade na distribuição dos valores estimados.

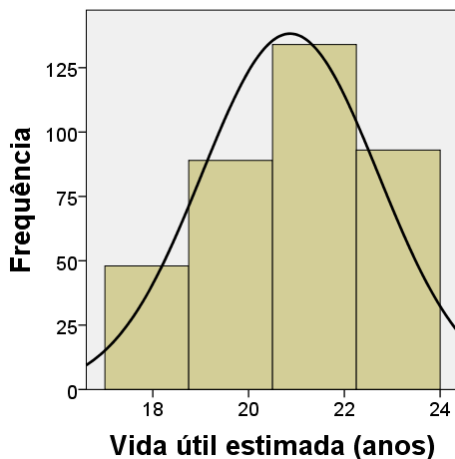


Figura 5.2 - Histograma da vida útil estimada pelo modelo de RML com três variáveis

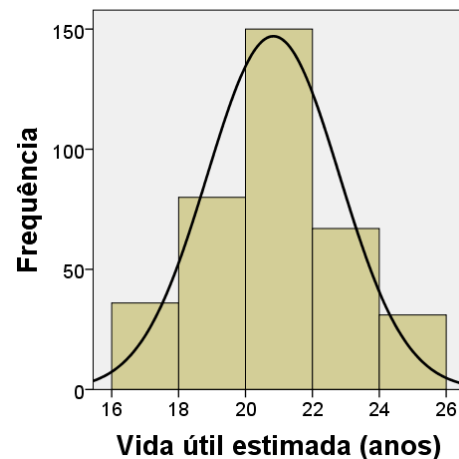


Figura 5.3 - Histograma da vida útil estimada pelo modelo de RML com cinco variáveis

A Figura 5.4 apresenta a variação dos valores estimados de vida útil em função das combinações de variáveis possíveis, para o modelo de RML com três variáveis. É possível constatar que existe coerência entre os resultados fornecidos e a realidade esperada, ou seja: i) a pior associação de classes conduz ao valor mais baixo de vida útil estimada, de 17,5 anos (elevada proximidade ao mar e alta exposição aos agentes poluentes); ii) por oposição, a situação mais favorável conduz ao valor mais elevado de vida útil, de 23,5 anos (elevada distância ao mar e baixa exposição a poluentes); iii) as duas restantes combinações apresentam valores intermédios e com bastante semelhança entre si.

A partir da variação de resultados apresentados pelo modelo de RML com cinco variáveis, é possível referir que: i) a existência de uma maior proximidade ao mar conduz sempre a valores mais baixos de vida útil; ii) o mesmo se passa na situação de uma exposição mais elevada aos agentes poluentes, que produz o mesmo efeito na vida útil estimada; iii) o orientação N/NE conduz a uma vida útil menor na maioria das combinações (11 em 12 possíveis), embora os valores para a orientação O/NO sejam muito semelhantes; iv) a orientação E/SE conduz a uma vida útil superior em todas as combinações possíveis, apesar de a orientação S/SO apresentar valores com elevada semelhança;

v) os tipos de acabamento liso e rugoso originam valores muito próximos de vida útil, sendo sempre inferiores aos originados pela classe de acabamento outro (revestimento cerâmico). Embora exista congruência com a expectativa física na maioria das variáveis, relativamente ao tipo de acabamento seria expectável uma maior diferença de vida útil entre as classes liso e rugoso. A justificação desta evidência pode residir na falta de representatividade que a variável tipo de acabamento apresenta. A relação entre todas as variáveis e respetivos valores estimados pode ser consultada nas figuras do Anexo 3. De acordo com o modelo obtido, o menor valor estimado para a vida útil dos revestimentos ETICS é de 16,8 anos, e corresponde à seguinte combinação de fatores: revestimentos localizados a menos de 5 km do mar, com exposição alta aos poluentes, com acabamento do tipo “liso” e orientação a N/NE. Por oposição, o maior valor estimado para a vida útil dos revestimentos ETICS é de 28,9 anos, e corresponde à seguinte combinação de fatores: revestimentos localizados a mais de 5 km do mar, com baixa exposição aos poluentes, com acabamento do tipo “rugoso” e orientação a E/SE.

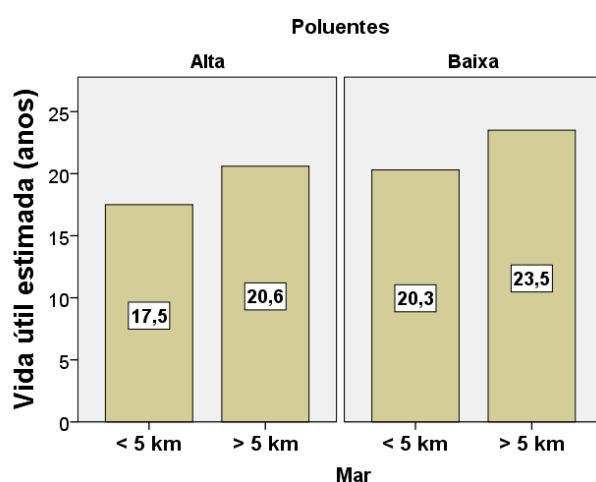


Figura 5.4 - Vidas úteis estimadas pelo modelo de RML de três variáveis

5.3. Redes neuronais artificiais

5.3.1. Considerações gerais

As redes neuronais artificiais (RNAs) inserem-se no ramo da inteligência artificial dedicada ao conexionismo, que defende uma abordagem da modelação dos processos cognitivos segundo os mecanismos de processamento que se acredita ocorrerem no cérebro biológico (Barrow, 1996). As RNAs são formadas por várias unidades de processamento interligadas entre si, denominadas por neurónios, que conferem à rede a capacidade de adquirir e manter conhecimento (Rafiq et al., 2001). As suas características intrínsecas levam à criação de modelos designados como “caixa negra”, que deriva da inexistência de uma explicação clara dos métodos pelos quais a rede obtém as suas conclusões (Dias et al., 2014).

A semelhança com o cérebro biológico reside no facto de o conhecimento ser adquirido a partir do ambiente exterior, através de um processo de aprendizagem, sendo posteriormente armazenado na interligação entre os neurónios (Haykin, 1999; Silva, 2015). Das principais características reconhecidas nas RNAs, salientam-se as seguintes: i) capacidade de aprendizagem (apetência para a extração de relações entre as variáveis fornecidas como *input*); ii) capacidade de generalização (com base no conhecimento adquirido e a partir de novos dados, é possível a estimação de soluções até então desconhecidas); iii) capacidade de organização de informação (que possibilita o reconhecimento de padrões ou características

comuns num grupo de dados) (Silva et al., 2017b). As suas características contribuem para que o âmbito de aplicação das RNAs seja muito vasto, sendo empregues atualmente em áreas tão distintas como a medicina (Agrawal e Agrawal, 2015; Pai e Bader, 2018), a engenharia (Pathirage et al., 2018; Khera e Khan, 2018) ou a economia (Falat e Pancikova, 2015; Hu et al., 2018). A aplicabilidade desta ferramenta ao estudo conduzido nesta dissertação advém da sua capacidade preditiva, que possibilita a estimação de valores futuros de um determinado problema, quando é tido em conta o conhecimento adquirido com a observação de exemplos prévios pertencentes à mesma problemática.

No cérebro, a elevada capacidade de processamento deve-se ao funcionamento paralelo de um número elevado de neurónios, as suas unidades básicas, que se encontram interligados em rede. De um modo simplificado, um neurónio é constituído por um corpo celular do qual deriva vários prolongamentos ramificados curtos ou longos: as dendrites e os axónios, respetivamente (Figura 5.5). A transmissão de informação entre um par de neurónios é efetuada por um processo chamado sinapse, durante o qual são libertados neurotransmissores nas extremidades das dendrites do neurónio recetor (Dias, 2008). Os neurotransmissores são substâncias químicas que, quando em concentração suficiente, têm a capacidade de alterar o potencial elétrico dos neurónios. Quando tal acontece, o neurónio sofre uma ativação que origina um impulso elétrico, o potencial de ação, que se propaga ao longo do axónio. Uma vez atingidas as ramificações, ocorre a libertação de novos neurotransmissores, por sua vez responsáveis pela excitação ou inibição dos neurónios a jusante, continuando ou cessando a ligação sináptica estabelecida (Dias, 2008).

Os neurónios das RNAs são modelados como versões simplificadas dos neurónios presentes nos sistemas neuronais biológicos, inspirados tanto na sua constituição como no seu funcionamento (Silva et al., 2017b). Na Figura 5.6, é feita a sua representação esquemática. As variáveis $\{x_i\}$ simbolizam os *inputs* por si recebidos e as variáveis $\{w_i\}$ os pesos diferenciados que cada *input* tem na ativação do neurónio. A combinação dos *inputs*, devidamente ponderados, juntamente com o desvio do neurónio θ , é designada por potencial de ativação e expressa pela variável u . O *output* y produzido pelo neurónio é o resultado da ação da função de ativação $g(\cdot)$ sobre o potencial de ativação u . Simplificadamente, o funcionamento de um neurónio artificial é uma combinação linear dos *inputs* recebidos, que tem em conta os pesos das ligações, e executa uma operação não linear sobre o resultado obtido.

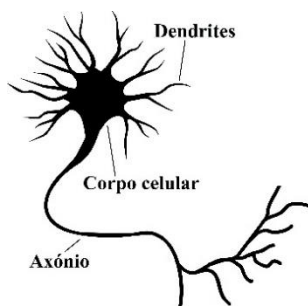


Figura 5.5 - Representação simplificada de um neurónio biológico (iStock, 2012)

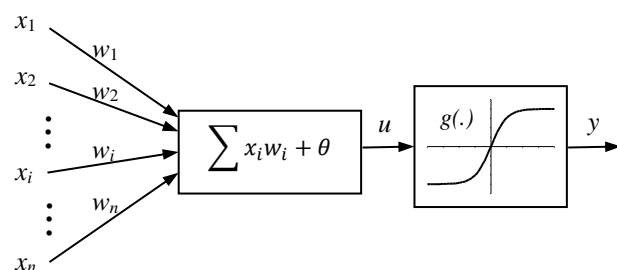


Figura 5.6 - Representação simplificada de um neurónio artificial (adaptado de Dias et al., 2014)

A arquitetura da rede diz respeito à definição da sua organização, ou seja, ao posicionamento de cada neurónio em relação aos restantes, um aspeto condicionante das ligações sinápticas que posteriormente se poderão estabelecer entre os neurónios (Bianchi et al., 2017). Apesar de serem vários os tipos de arquitetura existentes, na constituição de uma RNA genérica podem ser identificados três

camadas distintas: i) entrada, responsável pela receção dos *inputs*; ii) intermédia ou escondida (uma ou várias), onde ocorre o processamento dos dados fornecidos à rede; iii) saída, responsável pela apresentação do *output* resultante do processamento anterior. O perceptron multicamada (PMC) é o tipo de RNA mais comum, graças à sua capacidade de adaptação a uma grande variedade de problemas. O seu funcionamento é unidirecional (alimentado para a frente), o que implica que cada neurónio esteja ligado exclusivamente a todos da camada seguinte e a nenhum outro na rede (Silva, 2015). O número de neurónios na camada de entrada e o número de camadas escondidas, bem como os respetivos números de neurónios, são escolhidos de acordo com a complexidade do problema e a quantidade dos *inputs* fornecidos à rede (Silva et al., 2017b). Embora existam processos para a seleção da melhor arquitetura da rede, habitualmente ela é feita por um processo de tentativa e erro, sendo adotada a configuração que originou melhores resultados (Silva, 2015).

A aprendizagem das RNAs baseia-se na modificação dos pesos da rede, de modo a que apresente um *output* específico quando lhe é fornecido um determinado *input*, e requer as fases de treino e de teste (Siddique e Adeli, 2013). O modo de realização do treino condiciona o funcionamento da rede. Num PMC, a estratégia de treino utilizada é designada por supervisionada, em virtude de se basear na apresentação de exemplos à rede, que constituem o conjunto de treino. Uma vez apresentados, são produzidos padrões de saída que, quando comparados com padrões alvo desejados, permitem a determinação dos erros de estimação, assim como outros indicadores estatísticos que permitem avaliar a precisão do modelo produzido pela rede. O treino consiste na apresentação sucessiva do conjunto de treino à rede, de modo a que ela altere os seus pesos, até que os erros obtidos atinjam valores mínimos satisfatórios (Dias, 2008). A fase posterior de teste permite a avaliação do desempenho da rede na presença de novos dados e requer exemplos não analisados anteriormente, que constituem o conjunto de teste. Relativamente ao processo de aprendizagem, a ideia intuitiva de que mais iterações na fase de treino conduzem a uma rede com um melhor comportamento na fase de teste é falaciosa. Nestas condições, pode-se gerar um fenómeno de sobreajustamento, ou seja, o ajuste ao conjunto de treino em grau demasiado elevado, que põe em causa a sua capacidade de generalização, uma das características mais importantes quando se pretende obter um modelo de previsão (Silva, 2015). A utilização de um outro conjunto de dados, o conjunto de validação cruzada, permite monitorizar o desempenho da rede durante a fase de treino e otimizar a sua capacidade de generalização. Para tal, a medição do erro total em cada iteração é efetuada sobre este conjunto, sendo adotada a configuração que conduz à sua minimização (Dias, 2008).

Na aprendizagem supervisionada, o algoritmo de treino mais popular é o algoritmo de retropropagação (ARP), baseada na técnica de descida do gradiente (ou método do gradiente descendente) para a minimização do erro obtido (Siddique e Adeli, 2013). Como referido, o treino conduz à origem de padrões de saída que, quando comparados com padrões alvo, geram um valor de erro. Segundo este algoritmo, o erro determinado à saída da rede é estabelecido com uma função dos pesos da rede, sendo posteriormente propagado para trás, percorrendo a rede em sentido contrário. Durante este processo, o peso de cada ligação da rede é modificado de acordo com a sua influência no erro total obtido (Dias, 2008).

5.3.2. Metodologia de construção dos modelos

A utilidade das RNAs na modelação de problemas relacionados com a degradação de elementos construtivos, comprovada pelos estudos existentes sobre este tema (Dias et al., 2014; Silva et al.,

2016b), motivou a sua utilização para a previsão da vida útil de ETICS. Os modelos baseados em RNAs foram obtidos com base na seguinte metodologia: i) seleção das variáveis do modelo; ii) seleção da melhor arquitetura; iii) validação dos modelos; iv) estimativa da vida útil dos revestimentos de fachada.

A definição das variáveis dos modelos teve como objetivo a seleção dos fatores de degradação com maior relevância para a explicação da severidade de degradação evidenciada pela amostra global, evitando assim a inclusão de demasiadas variáveis, que tornariam os modelos desnecessariamente complexos e com baixa relevância estatística (Silva, 2015). Esta etapa foi efetuada com base nos modelos de regressão múltipla linear, referidos no subcapítulo anterior. Uma vez que, após as análises de regressão, foram selecionados dois conjuntos de variáveis como as de maior capacidade explicativa do fenómeno de degradação observado, os mesmos conjuntos foram adotados para a criação dos modelos com base nas RNAs. Apesar de existirem procedimentos alternativos, estudos anteriores demonstram que a via adotada (regressão múltipla linear com o método *stepwise*) se revela eficaz para a obtenção das variáveis mais significativas a incluir em modelos de previsão (Basak et al., 2000). A opção pelas mesmas variáveis tem como vantagem adicional a possibilidade da comparação entre os resultados fornecidos por cada tipo de modelos propostos.

Assim, foram definidos dois modelos, com base em RNAs, com três e cinco variáveis. No entanto, tendo em conta a natureza categórica da maioria das variáveis, a sua utilização implicou uma conversão prévia para valores numéricos. Contrariamente ao procedimento utilizado na análise de regressão, onde a quantificação teve por base as várias curvas de degradação identificadas no capítulo 4, na construção das RNAs as variáveis qualitativas foram convertidas em variáveis do tipo *dummy*. As variáveis deste tipo caracterizam-se por possuírem apenas valores de 0 e 1, evidenciando a presença ou ausência de determinada característica (Usman et al., 2015). A modelação de fenómenos com recurso a RNAs é uma abordagem que utiliza frequentemente este tipo de variáveis. A quantificação adotada na presente dissertação é apresentada na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Quantificação das variáveis independentes utilizada nos modelos de RNAs

Proximidade ao mar		Exp. aos poluentes		Tipo de acabamento			Orientação			
< 5 km	> 5 km	Alta	Baixa	Liso	Rugoso	Cerâmico	N/NE	S/SO	E/SE	O/NO
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1

Uma vez que a aprendizagem das RNAs requer a divisão aleatória dos dados em três conjuntos distintos, as percentagens utilizadas para tal foram: 60% para o conjunto de treino; 15% para o conjunto de validação cruzada; e 25% para o conjunto de teste. A produção das redes foi efetuada com recurso ao *software* NeuroSolutions®. Para ambos os modelos, foram adotados PMCs com uma arquitetura do tipo *N-H-1*, constituídos por uma única camada intermédia (*N* é o número de neurónios na camada de entrada, *H* é o número de neurónios na camada intermédia e o algarismo “1” é referente ao único neurónio na camada de saída). Durante a fase de treino, foram testadas várias arquiteturas para cada caso, tendo sido selecionada a que conduziu a um melhor resultado global. No caso do modelo com três variáveis, a arquitetura final adotada foi do tipo 3-5-1 (Figura 5.7), onde as entradas eram a idade, a distância ao mar (< 5 km ou > 5 km) e a exposição aos poluentes (alta ou baixa). Por sua vez, no caso do modelo com cinco variáveis, a arquitetura final adotada foi do tipo 10-4-1 (Figura 5.8), onde as entradas eram a idade, a distância ao mar, a exposição aos poluentes, o tipo de acabamento (liso, rugoso ou outro) e a orientação das fachadas (N/NE, S/SO, E/SE ou O/NO).

A fase de treino consistiu na realização de 10 corridas por cada arquitetura considerada inicialmente, cada uma com uma distribuição aleatória dos dados distinta. Em cada corrida, os dados foram apresentados à rede de forma sucessiva (uma apresentação de dados recebe a designação de época), tendo sido avaliado, em cada época, o erro sobre o conjunto de treino. Através do ARP, este erro permitiu o ajuste progressivo dos pesos da rede. A cada 50 épocas, o mesmo erro foi avaliado sobre o conjunto de validação cruzada. Os dois critérios alternativos admitidos para o término das corridas foram a não verificação da diminuição do erro de validação cruzada após uma sucessão de 50 épocas ou o alcance de um máximo de 65.000 épocas. O erro quadrático médio (*EQM*) foi o estimador de erro adotado para os conjuntos de treino e de validação. De cada arquitetura foi selecionada apenas a melhor corrida, através do critério de minimização do erro sobre o conjunto de validação cruzada.

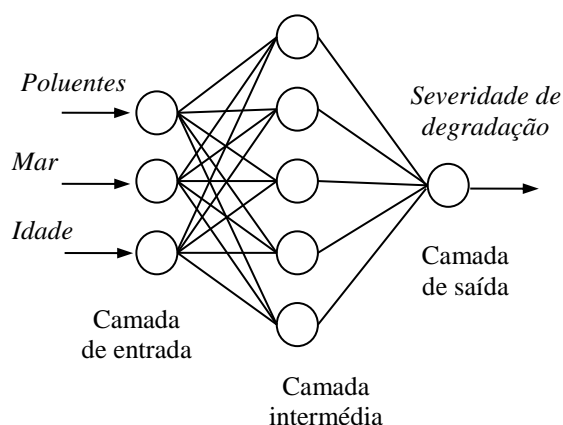


Figura 5.7 - PMC adotado na RNA com três variáveis

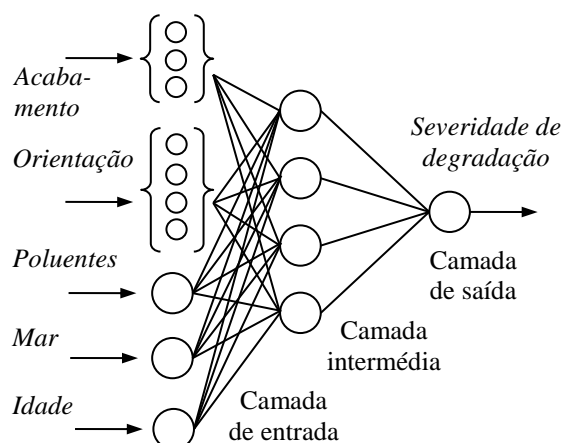


Figura 5.8 - PMC adotado na RNA com cinco variáveis

De seguida, teve lugar a fase de teste, durante a qual foram apresentados às redes os dados pertencentes ao conjunto de teste (91 revestimentos). Esta etapa permitiu a obtenção dos valores de severidade de degradação através de cada um dos PMCs gerados. Cada arquitetura de rede foi avaliada segundo o conjunto de parâmetros estatísticos definidos pelas Equações 5.3 a 5.5. A seleção da melhor arquitetura foi feita por comparação dos parâmetros estatísticos. No entanto, tal como Silva (2015) refere, foi tido em consideração que, para um desempenho da rede semelhante, é sempre preferível a escolha de uma com menos elementos (princípio da parcimónia).

Todos estes procedimentos possibilitaram a formulação das equações matemáticas da severidade de degradação, por meio dos parâmetros fornecidos pelo programa NeuroSolutions®, após a conclusão das corridas (pesos e os desvios das ligações da rede). No modelo de três variáveis, a severidade de degradação é obtida pela equação 5.6 (onde V_1 representa a idade, V_2 a distância ao mar e V_3 a exposição aos poluentes). Os coeficientes utilizados nestas equações encontram-se visíveis na Tabela 5.10. Por sua vez, no modelo de cinco variáveis, a severidade de degradação é obtida através da equação 5.7 (onde V_1 representa a idade, V_2 a distância ao mar, V_3 a exposição aos poluentes, V_4 a orientação N/NE, V_5 a orientação S/SO, V_6 a orientação E/SE, V_7 a orientação O/NO, V_8 o tipo de acabamento liso, V_9 o tipo de acabamento rugoso e V_{10} o tipo de acabamento outro). Os coeficientes utilizados nestas equações encontram-se visíveis na Tabela 5.11. A utilização das equações implica a utilização da quantificação das variáveis independentes adotada na construção dos modelos, visível na Tabela 5.9.

$$S_w = h_0 + \sum_{i=1}^5 h_i H_i, \quad \text{com} \quad H_i = \tanh\left(c_{i0} + \sum_{n=1}^3 c_{in} V_n\right) \quad (5.6)$$

$$S_w = h_0 + \sum_{i=1}^4 h_i H_i, \quad \text{com} \quad H_i = \tanh\left(c_{i0} + \sum_{n=1}^{10} c_{in} V_n\right) \quad (5.7)$$

Tabela 5.10 - Coeficientes da RNA de três variáveis

<i>i</i>	<i>h_i</i>	<i>c_{0i}</i>	<i>c_{1i}</i>	<i>c_{2i}</i>	<i>c_{3i}</i>
0	4,67E-1				
1	2,01E-2	1,53E-1	2,05E-2	-9,64E-1	-0,38223
2	2,47E-2	-2,96E-2	2,14E-3	1,39E0	-0,6572
3	2,09E-1	-2,63E0	8,25E-2	4,08E-1	-7,49E-1
4	-2,26E-1	1,82E0	-8,45E-2	4,8E-1	-7,37E-1
5	5,46E-2	-1,22E0	2,53E-2	-1,19E-1	-2,17E-2

Tabela 5.11 - Coeficientes da RNA de 5 variáveis

<i>i</i>	0	1	2	3	4
<i>h_i</i>	4,84E-1	-2,01E-1	-1,79E-1	-2,04E-1	-1,50E-1
<i>c_{0i}</i>		3,86E0	3,43E0	4,91E0	-2,39E0
<i>c_{1i}</i>		-1,18E-1	-7,77E-2	-1,27E-1	3,40E-2
<i>c_{2i}</i>		-1,39E-1	8,88E-1	5,48E-1	-1,20E0
<i>c_{3i}</i>		1,01E0	-2,03E0	-7,95E-1	6,13E-1
<i>c_{4i}</i>		-9,19E-1	-1,02E0	-9,32E-2	-1,78E-1
<i>c_{5i}</i>		-1,14E-1	-4,21E-1	-1,39E0	2,3E-1
<i>c_{6i}</i>		-8,24E-1	-8,06E-1	-4,87E-1	8,50E-1
<i>c_{7i}</i>		-3,20E-1	-9,50E-1	-1,69E0	1,68E0
<i>c_{8i}</i>		-1,47E-1	-1,49E-1	6,61E-1	-4,29E-1
<i>c_{9i}</i>		-2,10E-1	9,65E-1	-6,72E-1	-6,37E-1
<i>c_{10i}</i>		-6,76E-1	-4,75E-1	-6,37E-1	5,90E-1

A validação dos dois modelos propostos foi efetuada através da análise dos parâmetros estatísticos referidos, calculados em função dos valores reais observados e dos valores previstos pelos modelos, para o conjunto de teste. A Figura 5.9 evidencia a relação entre estes valores, para ambos os modelos propostos. Uma vez mais, a análise gráfica sugere que os modelos tendem a fornecer valores de severidade de degradação mais elevados do que os observados. A Tabela 5.12 expressa os valores destes parâmetros, e pela sua análise, verifica-se que todos os indicadores do modelo com cinco variáveis apresentam percentagens de erro ligeiramente superiores às percentagens associadas ao modelo com três variáveis, sugerindo um pior ajuste aos dados. O argumento referido, da potencial influência negativa do parâmetro textura do acabamento, incluído no modelo com cinco variáveis, poderá estar na origem desta diferença. A par disso, o facto de um modelo que contém mais variáveis nem sempre conduzir a um aumento da capacidade explicativa também pode servir de justificação ao que se verifica. Além disso, as amostras de treino e teste em cada modelo são seleccionadas aleatoriamente, não sendo as mesmas para os dois modelos, o que também pode ajudar na justificação das diferenças observadas. No entanto, apesar das evidências gráficas, a inexistência de valores de erro anormalmente elevados nos dois modelos propostos é uma prova da adequada capacidade explicativa evidenciada por ambos, o que permite a sua validação. O coeficiente de Pearson, superior a 0,8 em ambas as situações, também o confirma, pois sugere a existência de uma boa adaptação dos modelos à realidade observada.

Tabela 5.12 - Parâmetros estatísticos utilizados na análise da validade dos modelos com RNAs

Modelo	$\bar{\epsilon}$	ϵ_{max}	EQMN	PP $\epsilon > 5\%$	PP $\epsilon > 10\%$	PP $\epsilon > 20\%$	PP $\epsilon > 30\%$	<i>r</i>
3 variáveis	8,69%	28,37%	43%	57%	38%	5%	0%	0,903
5 variáveis	11,69%	47,62%	52%	80%	46%	15%	9%	0,846

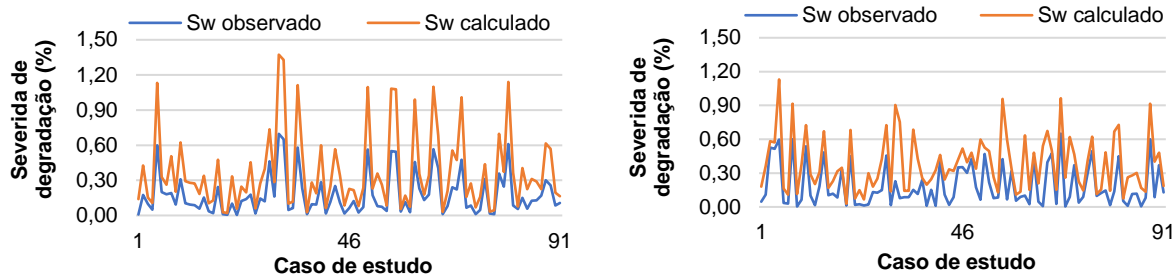


Figura 5.9 - Relação entre os valores observados e previstos pela RNA com três (à esquerda) e com cinco (à direita) variáveis

5.3.3. Aplicação à previsão de vida útil de revestimentos ETICS

Com base nos casos de estudo que constituem a amostra de teste, a determinação da idade associada ao fim da vida útil de cada um deles consistiu na resolução das equações matemáticas 5.6 e 5.7, admitindo uma severidade de degradação de 30% (limite máximo de degradação considerado). Os resultados obtidos possibilitaram a criação dos histogramas representado nas Figuras 5.10 e 5.11, associados aos modelos de RNAs com três e com cinco variáveis, respetivamente.

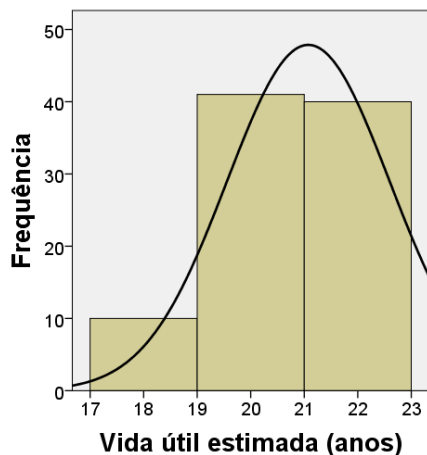


Figura 5.10 - Histograma da vida útil estimada pela RNA de três variáveis

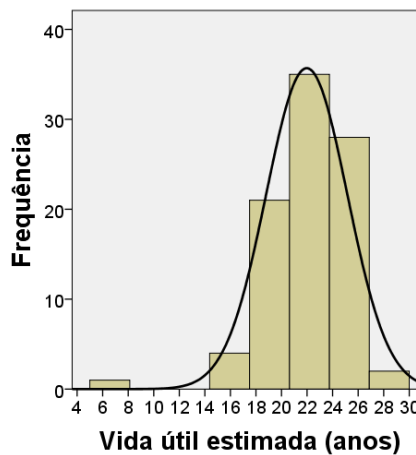


Figura 5.11 - Histograma da vida útil estimada pela RNA de cinco variáveis

O primeiro modelo conduziu a uma média da vida útil estimada de cerca de 21 anos, associado a um desvio padrão de 1,5 anos. A variação dos valores de vida útil está contida num intervalo delimitado entre 17 e 23 anos, com uma moda igual a 21 anos. Por sua vez, o segundo modelo conduziu a uma média da vida útil estimada de cerca de 22 anos, com um desvio padrão de 3,2 anos. A vida útil apresenta uma maior variação de valores, estando contida num intervalo delimitado entre 6 e 29 anos de idade, com uma moda igual a 24 anos. Em cada um dos histogramas, foi ajustada uma curva de distribuição normal; a normalidade dos valores de vida útil estimados por cada um dos modelos foi testada com recurso à análise gráfica dos gráficos de probabilidade normal, que evidenciou o bom ajuste dos dados a uma linha de tendência diagonal, existente em cada gráfico. Este facto constituiu-se como um bom indicador da normalidade da distribuição dos valores, para ambos os casos.

Após a análise da validade estatística dos modelos, é necessária uma avaliação ao sentido físico de cada um. Relativamente ao modelo com três variáveis, todas as evidências são consideradas lógicas do ponto de vista físico e iguais às referidas no modelo de RML com três variáveis. A Figura 5.12 evidencia a relação entre as variáveis e os valores de vida útil estimados por este modelo.

Em relação ao modelo com cinco variáveis, a análise das suas evidências não é tão imediata, em virtude da maior possibilidade de combinações. No entanto, é possível constatar que: i) uma maior proximidade ao mar conduz a valores mais baixos de vida útil; ii) uma exposição elevada aos agentes poluentes reduz o valor da vida útil estimada; iii) a orientação da fachada a N/NE apresenta-se como a que conduz a uma menor vida útil em grande parte das combinações possíveis (8 em 12), sendo que nas restantes combinações são as orientações O/NO e S/SO que assumem este papel; iv) cada uma das orientações da fachada a E/SE e a S/SO, por sua vez, conduzem a uma maior vida útil. O tipo de acabamento não conduz a resultados credíveis, uma vez que, na amostra analisada, a classe relativa ao acabamento cerâmico (“outro” tipo de acabamento) não tem uma amostra estatisticamente relevante que permita obter resultados inequívocos. A relação entre todas as variáveis e respetivos valores de vida útil estimados pode ser consultada no Anexo 4. Os resultados obtidos revelam que o valor mínimo de vida útil estimada pelo modelo é de 6,1 anos e corresponde à seguinte combinação de fatores: revestimentos localizados a menos de 5 km do mar, com exposição alta aos poluentes, acabamento do tipo “outro” e orientação a N/NE. Por oposição, o maior valor estimado pelo modelo para a vida útil é de 28,9 anos, e corresponde à seguinte combinação de fatores: revestimentos a mais de 5 km do mar, com baixa exposição aos poluentes, com acabamento do tipo “liso” e orientação a S/SO.

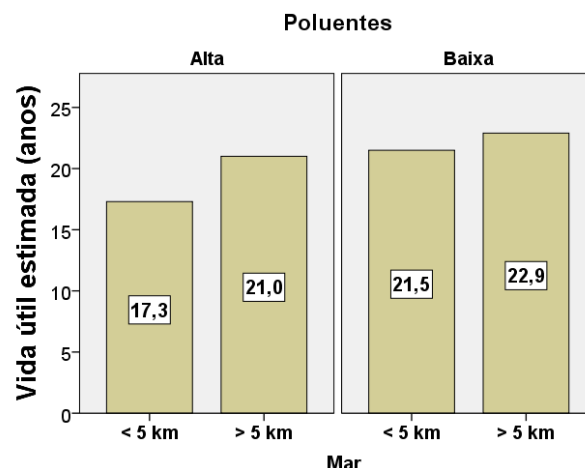


Figura 5.12 - Vidas úteis estimadas em função dos fatores considerados na RNA de três variáveis

5.4. Sistemas de lógica difusa

5.4.1 Considerações gerais

A lógica é a disciplina que analisa o uso do raciocínio, enunciando os princípios que permitem distinguir as situações em que o processo de inferência lógica (indutivo ou dedutivo) é correto ou não (Popkin e Stroll, 1993). O raciocínio é materializado por argumentos, entendidos como combinações de proposições com certos valores de verdade, e que possuem uma estrutura do tipo “se... então...” (Popkin e Stroll, 1993). Num argumento, as proposições antecedentes são designadas por premissas e as proposições consequentes são designadas por conclusões. A lógica não se foca na veracidade das proposições, mas sim no seu encadeamento lógico, avaliando se, a partir da inferência lógica, as premissas conduzem corretamente a conclusões. Deste modo, é possível afirmar que a lógica estuda a forma e não o conteúdo do raciocínio. A lógica matemática dedica-se ao estudo da aplicação da lógica em áreas da matemática (Siddique e Adeli, 2013).

Uma das derivações da lógica é a lógica clássica, que é responsável pelo estudo dos argumentos constituídos por uma estrutura puramente formal e que podem, por este motivo, ser expressos por regras totalmente abstratas (Gabbay et al., 1998). Uma das propriedades que rege a lógica clássica é referente à ambivalência das proposições. Segundo esta propriedade, cada proposição apenas pode admitir um de dois valores de verdade, diametralmente opostos e mutuamente exclusivos: verdadeiro ou falso (0 ou 1, de forma análoga) (Gabbay et al., 1998). Assim, não existe forma de ser englobado nenhum outro valor entre estes extremos. A lógica Booleana, integrante da lógica matemática, desenvolveu-se a partir da linha de pensamento proposta pela lógica clássica, baseando-se também no mesmo princípio de ambivalência das proposições. Esta área providenciou um contributo importante no desenvolvimento da ciência da computação. O facto de os modelos computacionais convencionais funcionarem, ainda nos dias de hoje, segundo este conceito binário deriva precisamente da sua influência (Mendelson, 2010). No entanto, uma das desvantagens dos modelos deste tipo é a incapacidade de representação dos fenómenos reais da forma mais completa possível (Ross, 2017). A explicação da realidade à luz da lógica clássica não é a mais adequada em grande parte das situações, ajustando-se somente aos casos particulares de natureza binária. Existe incerteza associada aos fenómenos do mundo real, que se manifesta de várias formas e os torna difusos (imprecisos), vagos (não específicos), ambíguos (contraditórios) ou aleatórios (com variabilidade natural) (Ross, 2017). Assim, para uma melhor modelação de fenómenos reais, é necessário recorrer a outras formas de representação.

A lógica difusa (LD) insere-se na parte da lógica designada como não clássica (Haack, 1996). A sua existência advém de uma linha de pensamento que rompe com o princípio de ambivalência, estabelecendo que uma proposição pode ser parcialmente falsa e parcialmente verdadeira, com um certo grau de pertença associado a cada uma destas condições (Haack, 1996; Silva, 2015). A explicação da realidade segundo os conceitos da lógica difusa é mais adequada em muitas situações comparativamente com o que ocorreria se tal fosse feito segundo os conceitos da lógica clássica. A tomada de consciência para o facto de que qualquer fenómeno tem incerteza associada, sem a qual a sua descrição é incompleta, foi um fator que promoveu a incorporação destes conceitos no âmbito da modelação de sistemas reais (Siddique e Adeli, 2013). A sua utilização auxilia a modelação de conceitos subjetivos e difíceis de representar por outros modelos clássicos (Silva, 2015).

A modelação de problemas à luz dos conceitos de lógica difusa tem sido aplicada com sucesso na resolução de problemas em variadas áreas (Ali et al., 2016; Iancu, 2018). Em termos computacionais, os modelos que dela derivam são estruturas matemáticas de várias entradas e uma única saída, conhecidos pelas suas propriedades de aproximadores universais a fenómenos não lineares (Ross, 2017). Os modelos de lógica difusa constituem uma combinação entre a modelação de conceitos subjetivos e dados linguísticos e uma análise de regressão matemática (Silva et al., 2016a). A combinação entre precisão numérica e transparência no modo de funcionamento dos modelos de lógica difusa é uma das suas reconhecidas vantagens, sendo também o motivo que conduz à sua classificação como “modelos de caixa cinzenta” (Vieira et al., 2015). A presente dissertação faz uso dos designados *rule-based fuzzy systems*, caracterizados por representarem as relações entre as variáveis através de relações do tipo *if-then* (Babuška, 1998).

5.4.2. Metodologia de modelação difusa

Um conjunto difuso A é caracterizado por uma função $\mu_A(x)$, responsável pela associação a cada

elemento x , pertencente ao universo X , um número real contido no intervalo $[0, 1]$, representativo do grau de pertença do elemento x ao conjunto A (Siddique e Adeli, 2013). A função $\mu_A(x)$ recebe a designação de função de pertença e caracteriza o quão difuso é o conjunto A em X .

Dos vários mecanismos de inferência associados a modelos difusos, um dos mais populares é o utilizado nos modelos *Takagi-Sugeno* (TS). A escolha de modelos deste tipo é particularmente adequada para a modelação de sistemas não lineares, graças à decomposição que promovem em subsistemas lineares, mais fáceis de modelar (Babuška, 1998). A principal particularidade dos modelos TS reside na relação que apresentam entre as variáveis: a parte antecedente é difusa, mas a parte consequente é tradicional (ou *crisp*) (Ross, 2017). Esta característica permite a sua interpretação como uma combinação entre uma modelação linguística e uma análise de regressão matemática (Silva et al., 2016b). Um modelo TS é caracterizado através de um número C de regras difusas do tipo:

$$\text{Regra } R_i: \text{ Se } x_1 \text{ é } A_{i1} \text{ e } \dots x_n \text{ é } A_{in}, \text{ Então } y_i(x) = f_i(x), i = 1, 2, \dots, C.$$

Os *inputs* (variáveis explicativas do modelo) do modelo são definidos pelos vetores x_n , cujos elementos se associam aos conjuntos difusos antecedentes A_{in} através de funções de pertença. As funções consequentes $f_i(x)$ possibilitam a obtenção de *outputs*, definidos pelos elementos $y_i(x)$. Assim, um modelo difuso TS consiste num conjunto de regras difusas que descrevem as relações locais de entrada-saída dos dados (Silva, 2015). Uma outra particularidade destes modelos relaciona-se com a natureza polinomial da função consequente, que permite a concreta obtenção dos *outputs* a partir dos *inputs* (Ross, 2017). Num modelo TS de primeira ordem, por exemplo, esta função é linear, e encontra-se definida na Equação 5.8.

$$f_i(x) = a_i x + b_i, i = 1, 2, \dots, C \quad (5.8)$$

A obtenção dos *outputs* (severidade de degradação, no caso concreto da modelação da degradação de elementos de revestimento) a partir de um modelo TS requer a consideração dos graus de ativação β_i das suas regras R_i . Para cada regra, este valor é obtido com base nas funções de pertença dos conjuntos difusos existentes na sua parte antecedente, através da Equação 5.9 (Silva et al., 2016a). Dado que cada regra origina um *output* distinto, o valor global fornecido pelo modelo apenas é obtido após a consideração de todos os valores parciais, devidamente ponderados pelos seus graus de ativação (Equação 5.10).

$$\beta_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{ij}}(x) \quad (5.9)$$

$$y(x) = \frac{\sum_{i=1}^C \beta_i \cdot y_i(x)}{\sum_{i=1}^C \beta_i}, i = 1, 2, \dots, C \quad (5.10)$$

A definição dos parâmetros de um modelo difuso consiste na determinação do número C regras, na definição dos conjuntos difusos antecedentes A_{ij} e na determinação dos parâmetros consequentes a_i e b_i . A definição dos conjuntos difusos envolve a utilização de uma técnica conhecida como *clustering*, cujo objetivo fundamental é a divisão do conjunto de dados em classes (*clusters*), tendo por base medidas de semelhança (Ross, 2017). O termo semelhança, neste contexto, refere-se a uma similaridade matemática, usualmente avaliada a partir da medição da distância euclidiana entre um determinado dado e o centro de um *cluster* definido (Babuška, 1998). Deste modo, a reunião dos dados em grupos, onde os seus elementos partilham certas afinidades, possibilita a aproximação local através de modelos lineares. Com apenas um único modelo linear, todo o conjunto de dados dificilmente seria bem aproximado.

As técnicas de *clustering* caracterizam-se por serem não supervisionadas, ou seja, por não terem por base nenhuma outra divisão anterior dos dados. Os algoritmos possíveis para o efeito podem ser tradicionais (segundo os quais os dados são atribuídos a um único conjunto) ou difusos (segundo os quais os dados são atribuídos a mais do que um conjunto, com graus de pertença distintos) (Silva, 2015). Neste trabalho, é utilizado o algoritmo *fuzzy c-means* (FCM), que se insere na categoria dos algoritmos difusos. A sua essência passa pela otimização da função objetivo *c-means*, através de um processo iterativo de minimização (Babuška, 1998). A função a otimizar é apresentada na Equação 5.11. A aplicação do algoritmo de *clustering* implica a reunião prévia dos dados na matriz $\mathbf{Z} = [\mathbf{X}, \mathbf{y}]^T$. Admitindo a modelação de um sistema real através de N pares de observações do tipo (\mathbf{x}_k, y_k) , então a componente $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_n]^T$ é uma sub-matriz de \mathbf{Z} , constituída por N vetores-coluna (onde N é o número de casos observados), cada um com n linhas (onde n é o número de variáveis identificadas em cada caso). Por sua vez, a componente $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_N]^T$ é um vetor de saída, associado ao valor alvo observado em cada caso.

$$J(\mathbf{Z}, \mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m \|z_k - v_i\|_A^2 \quad (5.11)$$

Os elementos contidos na equação anterior são: \mathbf{Z} , a matriz que contém os dados a agrupar; $\mathbf{U} = [\mu_{ik}]$, $1 \leq i \leq C$, $1 \leq k \leq N$, a matriz de partição difusa de \mathbf{Z} , que contempla os graus de pertença de cada dado z_k ao *cluster* i ; $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_c]$, o vetor que contempla os centros dos *clusters*, utilizados como referência para a medição das distâncias; $m \in [1, \infty[$, um expoente representante do grau de *fuzziness* da divisão dos dados realizada (e que avaliada o grau de sobreposição dos *clusters*); e $\|z_k - v_i\|_A^2 = (z_k - v_i)^T A (z_k - v_i)$, o produto interno quadrado da distância, utilizado para avaliação da semelhança entre cada dado z_k e o centro do *cluster* v_i (Babuška, 1998).

A minimização da função objetivo representa um problema de otimização não linear e requer, de antemão: i) a matriz de dados \mathbf{Z} ; ii) a escolha do número C de classes que respeite $1 \leq C \leq N$; iii) a escolha do expoente $m > 1$ (Pal e Bezdek (1995) referem que valores fora do intervalo $[1,5; 2,5]$ necessitam de uma avaliação adicional ao agrupamento dos dados gerado pelo algoritmo FCM e que, por esse motivo, o valor geralmente adotado é $m = 2$); iv) a escolha da tolerância $\varepsilon > 0$ (geralmente é adotado o valor $\varepsilon = 0,01$); e v) a definição da matriz \mathbf{A} , uma norma matricial induzida (responsável pela forma atribuída aos *clusters*; geralmente é utilizada a matriz identidade, dando origem a *clusters* circulares) (Babuška, 1998).

A especificação do número C de *clusters* a utilizar no modelo, um requisito para a inicialização do algoritmo, não é realizada aleatoriamente. Pelo contrário, existem procedimentos que fornecem a indicação sobre a adequabilidade do número escolhido para o modelo em questão. Para tal, podem ser utilizadas técnicas de *cluster validity measures* ou de *compatible cluster merging* (Ross, 2017).

Os conjuntos antecedentes A_{ij} são extraídos a partir da matriz de partição \mathbf{U} , após o término do algoritmo FCM. Cada elemento da matriz \mathbf{U} representa o grau de pertença do dado z_k ao *cluster* i , pelo que, com a operação definida na Equação 5.12, são projetados os graus de pertença no espaço das variáveis antecedentes. Os conjuntos A_{ij} são efetivamente obtidos posteriormente, através da aproximação dos valores projetados a funções de parametrização (Babuška, 1998).

$$y_{\mu_{A_{ij}}}(x_{jk}) = \text{proj}_j^{\mathbb{N}^{n+1}}(\mu_{ik}) \quad (5.12)$$

A definição dos parâmetros consequentes a_i e b_i é efetuada através de uma aproximação por mínimos quadrados. Tendo em conta que cada *cluster* representa um subsistema que pode ser aproximado localmente com recurso a um modelo linear, uma abordagem possível passa pela estimação dos parâmetros consequentes de forma independente para cada um dos *clusters* (Babuška, 1998). Para tal, são formuladas os seguintes elementos: i) matriz $X = [x_k^T]$, com $x_k^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ o vetor que reúne as variáveis registadas em cada observação, e $y = [y_k]$, com y_k o valor alvo associado a essa observação, com $1 \leq k \leq N$; ii) matriz $X_e = [X, 1]$; iii) matriz diagonal $W_i = [\mu_{ik}]$, $1 \leq i \leq C$, representante do grau de pertença dos dados, para cada *cluster*. Os parâmetros consequentes são agrupados no vetor $\theta_i = [a_i^T, b_i]^T$. Assumindo a independência linear das colunas de X_e e que $\mu_{ik} > 0$, $1 \leq k \leq N$, a solução do problema de mínimos quadrados $y = X_e \theta + \varepsilon$ (com ε o erro da aproximação) é dada pela Equação 5.13.

$$\theta_i = [X_e^T W_i X_e]^{-1} X_e^T W_i y \quad (5.13)$$

5.4.3. Construção dos modelos

A metodologia apresentada foi utilizada na presente dissertação para estimar a degradação associada ao sistema ETICS. Para tal, foram utilizados os dados oriundos da amostra global, recolhidos durante o trabalho de campo. A definição dos modelos implicou a divisão da amostra em duas partes: amostra de treino (75% da amostra); e amostra de teste (15%). As variáveis incluídas nos modelos de lógica difusa foram escolhidas a partir dos resultados da regressão múltipla linear com o método *step-wise* (subcapítulo 5.2). Tal como nos modelos de RML e com RNAs, também foram criados dois modelos difusos distintos, cada um com base em cada conjunto de variáveis explicativas identificados.

O critério admitido para o término do algoritmo de *clustering* foi a matriz de partição U apresentar uma variação inferior a 0,01 entre duas iterações sucessivas. Este facto revela estabilidade nos *clusters* definidos, não ocorrendo mudanças no agrupamento dos dados após uma nova iteração (Silva, 2015). Todas as variáveis explicativas admitidas em cada modelo foram utilizadas para o agrupamento dos dados (*clustering* multidimensional). Foram adotados dois *clusters*, uma vez que se revelaram suficientes para agrupar os dados de modo adequado. Os parâmetros do modelo, com os quais é calculado o índice S_w , foram obtidos através de uma *toolbox* para Matlab® (*Fuzzy Identification toolbox for Matlab*).

O primeiro modelo de lógica difusa foi construído a partir da amostra de treino (293 revestimentos), com base nas variáveis explicativas idade, mar e poluentes. As regras difusas do modelo são apresentadas nas equações 5.14 e 5.15, onde u_1 representa a idade dos revestimentos, u_2 a proximidade ao mar e u_3 a exposição aos poluentes. Os centros dos *clusters* são visíveis na Tabela 5.13.

Regra 1: Se u_1 é A_{11} e u_2 é A_{12} e u_3 é A_{13} então:

$$y_1(k) = -8,9 \cdot 10^{-3} u_1 - 5,3 \cdot 10^{-2} u_2 - 2,6 \cdot 10^{-2} u_3 + 5,9 \cdot 10^{-2} \quad (5.14)$$

Regra 2: Se u_1 é A_{21} e u_2 é A_{22} e u_3 é A_{23} então:

$$y_2(k) = 1,8 \cdot 10^{-2} u_1 - 2,3 \cdot 10^{-2} u_2 + 2,9 \cdot 10^{-1} u_3 + 5,3 \cdot 10^{-3} \quad (5.15)$$

Tabela 5.13 - Centros dos *clusters* do modelo de lógica difusa com três variáveis

Cluster	u_1	u_2	u_3
1	$1,1 \cdot 10^1$	$7,1 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^0$
2	$1,8 \cdot 10^1$	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$

A Figura 5.13 apresenta as funções de pertença das variáveis incluídas no primeiro modelo difuso.

A influência que cada uma exerce na degradação dos revestimentos com ETICS pode ser interpretada a partir da análise gráfica destas funções. A primeira regra é assinalada a azul e a segunda a laranja. A variável idade revela elevada contribuição para a explicação da degradação, em virtude de apresentar funções de pertença bem definidas graficamente. A função da primeira regra sugere que revestimentos com idade inferior a 20 anos pertencem fortemente ao primeiro conjunto (grau de pertença superior a 0,5), influenciando negativamente o valor da severidade de degradação (u_1 associa-se a um coeficiente negativo, na primeira regra). Por sua vez, a função da segunda regra sugere que revestimentos com idades superiores a 10 anos pertencem fortemente ao segundo conjunto (grau de pertença superior a 0,5), influenciando positivamente o valor da severidade de degradação (u_1 associa-se a um coeficiente positivo, na segunda regra). No que diz respeito a esta variável, ambas as regras evidenciam concordância com o padrão de degradação fisicamente esperado. Em relação à proximidade ao mar, a análise gráfica das funções de pertença não revela qualquer distinção na forma de como cada classe desta variável influencia cada uma das regras (não existe uma definição clara de qualquer conjunto). Por fim, em relação à exposição aos poluentes, a função da primeira regra sugere que os revestimentos sujeitos a uma exposição elevada aos poluentes têm maior influência na severidade de degradação.

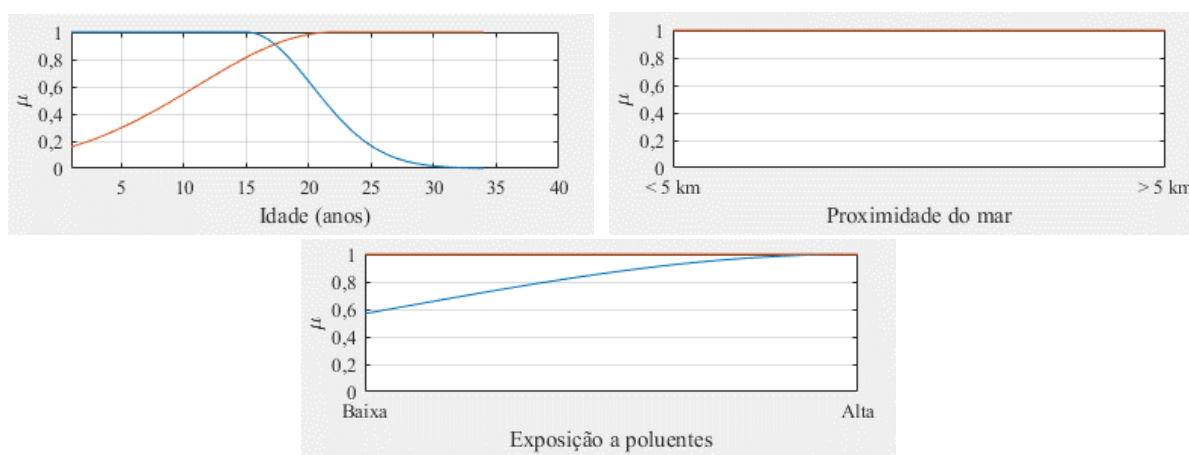


Figura 5.13 - Funções de pertença das variáveis incluídas no primeiro modelo difuso

Apesar de, nos modelos de RML e RNAs, os segundos modelos propostos terem sido criados com base no conjunto de cinco variáveis explicativas, o mesmo não se passou no segundo modelo construído a partir da lógica difusa. Uma tentativa inicial da inclusão do conjunto de cinco variáveis conduziu a resultados inadequados, pois o modelo revelou-se instável para uma amostra de apenas 91 casos de estudo (amostra de teste), tendo em conta o elevado número de variáveis. Silva et al. (2016b) refere que o aumento do número de variáveis incluídas num modelo difuso conduz ao aumento da sua complexidade, o que causa dificuldades na obtenção de resultados apropriados para uma aplicação prática se a amostra não for suficientemente significativa. Assim sendo, a variável "tipo de acabamento" foi retirada do modelo, uma vez que já tinha sido verificado que os poucos casos de estudo com "outro" tipo de acabamento implicavam um enviesamento dos resultados obtidos. As regras difusas do modelo obtido com quatro variáveis são apresentadas nas equações 5.16 e 5.17, onde u_1 representa a idade dos revestimentos, u_2 a proximidade ao mar, u_3 a exposição aos agentes poluentes e u_4 a orientação das fachadas. Os centros dos *clusters* são apresentados na Tabela 5.14.

A Figura 5.14 apresenta as funções de pertença das variáveis incluídas no segundo modelo de

lógica difusa. A influência que cada variável exerce na degradação dos revestimentos com ETICS pode ser interpretada a partir da análise gráfica destas funções. Tal como no caso anterior, a primeira regra é identificada a azul e a segunda a laranja. No diz respeito à varável idade, conclusões semelhantes às anteriores podem ser retiradas a partir do gráfico. A única diferença reside nos valores a partir dos quais os revestimentos se associam a cada um dos conjuntos com elevados graus de pertença (superior a 0,5). Assim, o gráfico evidencia que tal se verifica para idades inferiores a 20 anos, no primeiro conjunto, e para idades superiores a 15 anos, no segundo. Relativamente à proximidade do mar, as duas regras não são capazes de discriminar a influência desta variável na evolução da severidade de degradação de ETICS (não existem conjuntos definidos). Por sua vez, em relação à exposição aos poluentes, as evidências sugerem que, na primeira regra, o valor da severidade de degradação não sofre variação por causa desta variável (qualquer classe de exposição exerce igual influência negativa). A segunda regra sugere que o aumento do grau de exposição conduz ao aumento da contribuição desta variável no valor da severidade de degradação. Como a contribuição é positiva (u_3 apresenta um coeficiente positivo), a expectativa física é respeitada. Em relação à orientação das fachadas, a função da primeira regra revela uma inclusão mais forte de fachadas orientadas a S/SO e E/SE no primeiro conjunto e uma inclusão mais forte de fachadas orientadas a O/NO e E/NE no segundo conjunto.

Regra 1: Se u_1 é A_{11} e u_2 é A_{12} e u_3 é A_{13} e u_4 é A_{14} então:

$$y_1(k) = -7,6 \cdot 10^{-4}u_1 - 3,1 \cdot 10^{-2}u_2 - 4,4 \cdot 10^{-2}u_3 + 7,6 \cdot 10^{-3}u_4 + 3,9 \cdot 10^{-2} \quad (5.16)$$

Regra 2: Se u_1 é A_{21} e u_2 é A_{22} e u_3 é A_{23} e u_4 é A_{24} então:

$$y_2(k) = 1,8 \cdot 10^{-2}u_1 + 3,6 \cdot 10^{-3}u_2 + 1,9 \cdot 10^{-1}u_3 + 6,2 \cdot 10^{-3}u_4 - 4,5 \cdot 10^{-3} \quad (5.17)$$

Tabela 5.14 - Centros dos *clusters* do modelo de lógica difusa com quatro variáveis

Cluster	u_1	u_2	u_3	u_3
1	$1,2 \cdot 10^1$	$7,7 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^0$
2	$2,0 \cdot 10^1$	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^0$

Após a definição da estrutura dos modelos de lógica difusa, através da amostra de treino, ambos os modelos foram utilizados para a determinação do valor da severidade de degradação associado a cada caso de estudo pertencente à amostra de teste. A comparação entre os valores obtidos e os valores observados, através de indicadores estatísticos e de forma gráfica, permitiu a validação dos modelos. O valor da severidade de degradação foi obtido a partir da resolução da Equação 5.18. Os graus de ativação β_i foram determinados através da *toolbox* para o Matlab®, referida acima.

$$S_w = \sum_{i=1}^C \beta_i \cdot y_i(x) / \sum_{i=1}^C \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, C. \quad (5.18)$$

A Figura 5.15 evidencia a relação entre os valores de degradação observados e os valores fornecidos pelos modelos. Tal como nos métodos anteriores, também neste caso se verifica uma tendência, por parte dos modelos, da sobrestimação dos valores de severidade de degradação. A Tabela 5.15 permite uma visualização dos indicadores estatísticos calculados para a validação dos modelos. Os mesmos parâmetros estatísticos foram já utilizados para validar os dois tipos de modelos anteriores, pelo que as suas fórmulas estão identificadas (Equações 5.3 a 5.5). Através da sua análise, é possível concluir que os valores de erro apresentados pelos modelos são reduzidos, o que comprova a existência de uma boa capacidade preditiva e permite a validação dos dois modelos propostos. A percentagem de

padrões revela valores baixos para os valores de erro mais elevados, comprovando também a eficácia dos modelos. Por sua vez, um coeficiente de Pearson elevado em ambos os casos (de aproximadamente 0,9) evidencia uma boa correspondência entre os valores observados e os valores previstos.

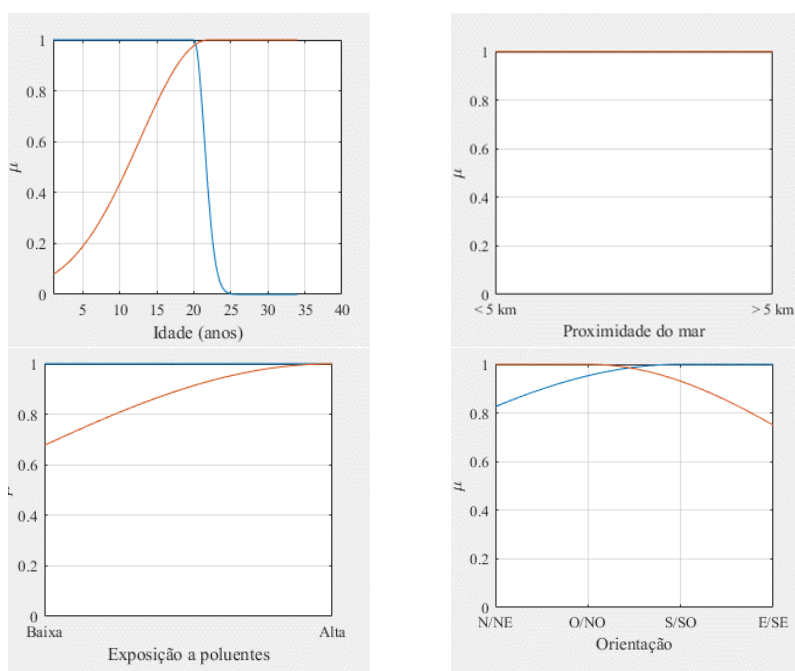


Figura 5.14 - Funções de pertinência das variáveis incluídas no segundo modelo de lógica difusa

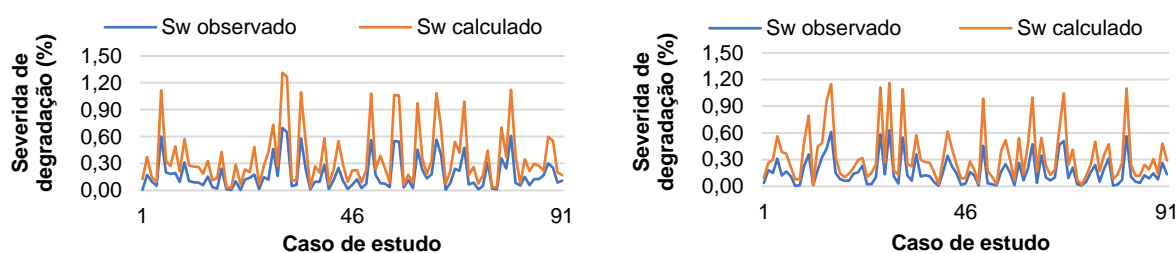


Figura 5.15 - Relação entre os valores observados e previstos pelo modelo de lógica difusa com três (à esquerda) e com quatro (à direita) variáveis

Tabela 5.15 - Parâmetros estatísticos utilizados na análise da validade dos modelos de lógica difusa

Modelo	$\bar{\epsilon}$	ϵ_{max}	EQMN	PP $\epsilon > 5\%$	PP $\epsilon > 10\%$	PP $\epsilon > 20\%$	PP $\epsilon > 30\%$	r
3 variáveis	8,72%	32,37%	43%	68%	34%	6%	2%	0,902
4 variáveis	8,27%	57,14%	42%	57%	34%	8%	1%	0,894

5.4.4. Aplicação à previsão da vida útil de revestimentos ETICS

Tal como nos métodos anteriores, a estimativa da vida útil para os revestimentos do tipo ETICS é efetuada com base no limite de severidade de degradação associado ao fim de vida útil ($S_w = 30\%$). Em cada modelo, para cada caso de estudo da amostra de teste, é determinada a idade para a qual este valor de degradação é obtido, em função das suas características. Com este procedimento, são determinados todas as estimativas da vida útil e é possível a obtenção dos histogramas representados nas Figuras 5.16 e 5.17, associados respetivamente ao primeiro e ao segundo modelos de lógica difusa. A cada histograma foi ajustada uma distribuição normal. Os resultados obtidos indicam valores médios de vida útil estimada de aproximadamente 21 anos, no primeiro modelo, com um desvio padrão de 1,4

anos, e de 21,5 anos, no segundo modelo, com um desvio padrão de 0,8 anos. Estes resultados apresentam concordância com outros valores obtidos com os métodos anteriores.

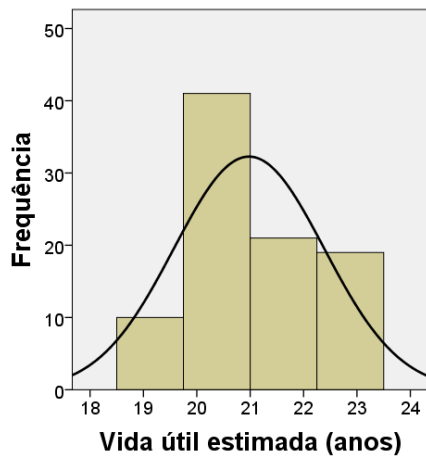


Figura 5.16 - Histograma de VUE pelo primeiro modelo (com três variáveis)

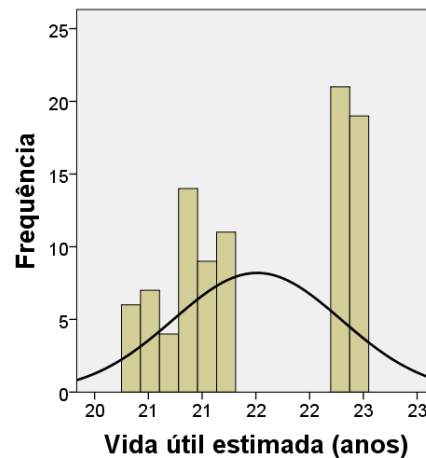


Figura 5.17 - Histograma da VUE pelo segundo modelo (com quatro variáveis)

A Figura 5.18 permite uma comparação dos valores de vida útil estimados com base no primeiro modelo de lógica difusa. A partir dela é possível concluir que o modelo conduz a resultados coerentes, podendo ser retiradas conclusões análogas às que foram observadas nos modelos anteriores com três variáveis, construídos a partir da RML e das RNAs. A Figura 5.19 permite que o mesmo tipo de comparação possa ser efetuada, desta vez em relação ao segundo modelo de lógica difusa. A partir da figura conclui-se que: i) a diferença entre os valores de vida útil associados a uma baixa ou elevada distância ao mar é pouco significativa; ii) existe uma diferença notória entre as vidas úteis estimadas relativamente à exposição aos poluentes, que são sempre mais baixas se a classe de exposição for alta; iii) relativamente à orientação das fachadas, as orientações segundo N/NE são as que apresentam valores de vida útil mais baixos em todas as combinações, ao passo que as orientações segundo E/SE são as que apresentam valores mais elevados; as restantes orientações apresentam valores intermédios e semelhantes entre si; no entanto, os valores fornecidos por todas as orientações são globalmente semelhantes. Neste modelo baseado em lógica difusa verifica-se uma menor dispersão nos resultados obtidos, tendo sido obtido um valor mínimo de vida útil estimada de 20,3 anos, que corresponde à seguinte combinação de fatores: revestimentos a menos de 5 km do mar, com exposição alta aos poluentes e orientação a N/NE. Por oposição, o maior valor estimado para a vida útil dos sistemas ETICS é de 22,5 anos e corresponde à seguinte combinação de fatores: revestimentos a mais de 5 km do mar, com baixa exposição aos poluentes e orientação a E/SE.

5.4. Análise comparativa dos modelos

Ao longo do presente capítulo, foram utilizadas três abordagens distintas para a modelação da degradação de revestimentos com ETICS. Todas as técnicas permitiram a formulação de uma equação matemática que permite calcular a severidade de degradação, em função das características e das condições de exposição dos revestimentos. Uma vez definido um nível máximo de degradação, a partir das equações matemáticas foi possível estimar o valor da vida útil previsto para um determinado caso.

O uso de diferentes técnicas conduziu à obtenção de modelos distintos. No entanto, todos eles

apresentam características comuns, entre as quais se salientam: i) a dependência dos modelos ao rigor nos processos de recolha dos dados; ii) a sensibilidade dos mesmos a alterações nos dados; iii) o grau de incerteza sempre inerente aos modelos (Silva et al., 2016c). Apesar de o processo de modelação ter admitido as mesmas assunções, as amostras utilizadas na construção dos modelos foram distintas na maioria das situações. Por este motivo, a comparação entre os modelos propostos deve ser realizada de forma cautelosa (Silva et al., 2016c).

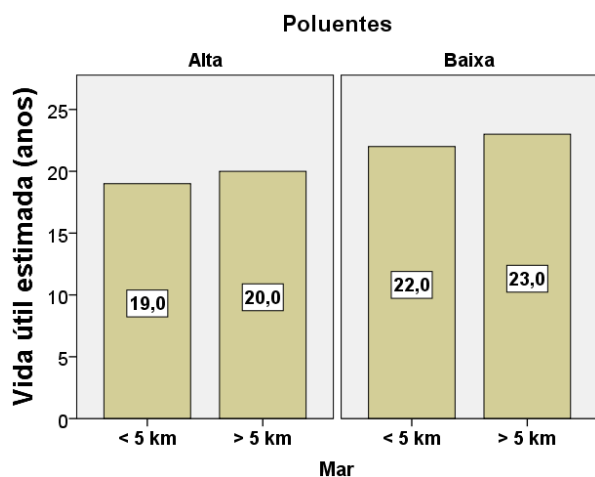


Figura 5.18 - Vidas úteis estimadas a partir do primeiro modelo de lógica difusa

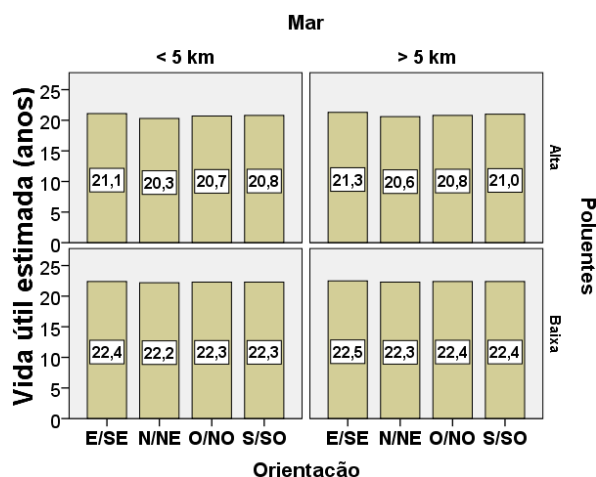


Figura 5.19 - Vidas úteis estimadas a partir do segundo modelo de lógica difusa

Em relação aos aspetos de cada técnica implementada, é de salientar que (Silva et al., 2016a): i) os modelos de regressão múltipla linear (modelos determinísticos) estão associados a formulações matemáticas menos complexas do que os dois restantes tipos (modelos computacionais), pelo que exigem menos tempo de aprendizagem dos seus fundamentos teóricos e menos tempo de processamento durante a fase de construção; ii) os modelos computacionais adquirem conhecimento diretamente dos dados e utilizam-no, posteriormente, para gerar modelos constituídos por funções não lineares, com boa capacidade de generalização; requerem, no entanto, algum procedimento prévio para a determinação das variáveis a incluir; iii) os modelos de regressão baseiam-se no ajuste de uma função linear aos dados, e permitem a seleção e inclusão das variáveis estatisticamente significativas; iv) os modelos computacionais exigem *software* específico com custos associados, pelo que a sua utilização é condicionada por este fator; em contrapartida, os modelos de regressão múltipla podem ser gerados por *softwares* de análise estatística mais acessíveis (apesar de neste estudo ter sido utilizado o SPSS®, de utilização mais restrita por também ter custos associados). Apesar da qualidade dos modelos não ser comprometida por causa dos aspetos referidos (a quantidade e a qualidade dos dados são os fatores que mais condicionam a qualidade dos resultados, em qualquer modelo), a adoção de uma abordagem de modelação, em detrimento de outra, pode ser afetada por estes aspetos. As entidades que pretendam realizar estudos sobre a previsão da vida útil de elementos construtivos tenderão a optar pelas técnicas que melhor se ajustam às suas capacidades ou limitações, por exemplo. Assim, a implementação de uma determinada técnica requer, de antemão, o conhecimento das suas características e exigências.

Nos subcapítulos anteriores, todas as técnicas usadas na modelação do fenómeno de degradação conduziram à obtenção de modelos que se revelaram adequados, tanto em termos do seu ajuste à realidade observada como da sua capacidade preditiva. A inexistência de indicadores estatísticos de erro com

valores muito elevados permitiu a validação dos modelos. No entanto, todos eles aparentaram prever valores de severidade de degradação ligeiramente mais elevados do que os reais, o que evidenciou, deste modo, um carácter conservativo associado a todos modelos propostos.

Em relação aos resultados obtidos, em particular a vida útil dos revestimentos ETICS, a Figura 5.20 permite uma comparação dos valores estimados pelos modelos, com base nas suas amostras.

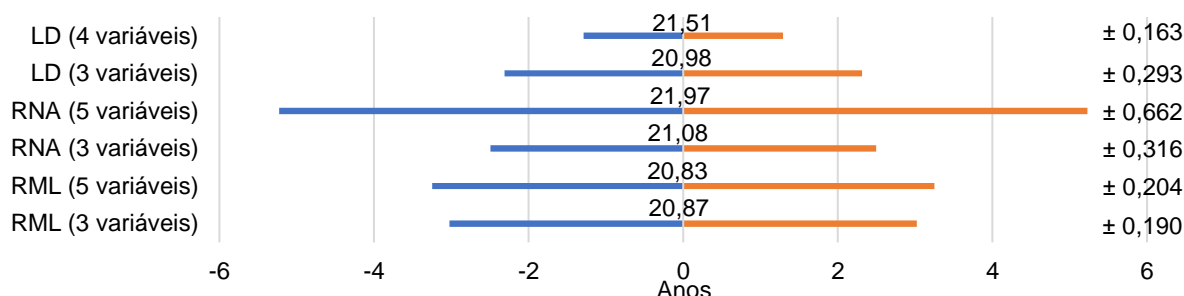


Figura 5.20 - Valores de vida útil média estimados por cada modelo e respetivos intervalos de 95% de confiança, com a representação do intervalo de valores com uma probabilidade superior a 95% e a 5% de serem excedidos (admitindo a distribuição normal dos dados)

A partir da figura, é evidente a similaridade da ordem de grandeza dos resultados obtidos, verificando-se que a vida útil estimada para o sistema ETICS varia entre 21 e 22 anos, de acordo com os modelos propostos. A sua análise permite referir que: i) em todos os modelos baseados no conjunto de três variáveis explicativas, a vida útil média estimada foi de 21 anos; ii) nos modelos baseados no conjunto de quatro ou cinco variáveis, construídos a partir das técnicas computacionais, a vida útil média estimada foi de 22 anos; iii) no modelo baseado no conjunto de cinco variáveis e construído a partir da RML, a vida útil média estimada foi ligeiramente mais baixa, de 21 anos. Estes resultados apresentam concordância com a vida útil de 20 anos estimada a partir do método gráfico (capítulo 4), através da curva de degradação global. Esta similaridade de valores evidencia a adequabilidade manifestada por todos os modelos no fornecimento de um valor de vida útil associada a revestimentos ETICS, a partir do conhecimento das suas características próprias e das condições às quais estão sujeitos. Os valores estimados estão ainda de acordo com o conhecimento empírico e com a literatura sobre o tema, tal como discutido anteriormente no subcapítulo 4.4.

A comparação direta dos resultados obtidos apenas é possível segundo os modelos que tiveram por base as mesmas amostras. Nestas condições encontram-se os modelos de RML de três e cinco variáveis (ambos construídos a partir dos mesmos 364 casos de estudo) e os modelos com base em RNAs e em lógica difusa de três variáveis (ambos construídos a partir dos mesmos 91 casos de estudo). A análise dos erros de estimação destes modelos permite referir que o acréscimo de complexidade dos modelos associado à inclusão de mais variáveis explicativas não se traduz na obtenção de melhores resultados. Apesar de os erros diminuírem, a diferença é residual, e os consequentes valores de vida útil estimados por cada modelo (e respetivos intervalos de confiança) apresentam valores praticamente idênticos. Assim, as evidências sugerem que é mais vantajosa a utilização de modelos mais simples.

O impacto dos diferentes fatores de degradação (ou variáveis explicativas) na vida útil estimada do sistema ETICS, em cada modelo, é descrito no Anexo 5. Esta análise permite verificar que: i) nos modelos de RML, a distância ao mar é a variável responsável pelas maiores variações no valor de vida útil estimada, conduzindo a acréscimos de 5,3% e de 12,5% para distâncias superiores a 5 km e a decréscimos de 9,6%

e de 1,4% para distâncias inferiores a 5 km, respetivamente nos modelos de três e cinco variáveis; ii) nos modelos com base em RNAs, a exposição aos agentes poluentes é a variável que assume o papel mais relevante, com incrementos de 5,2% e de 5,0% para uma exposição baixa e decréscimos de 9,0% e de 20,9%, para uma exposição alta respetivamente nos modelos de três e cinco variáveis; iii) nos modelos de lógica difusa, a exposição aos poluentes é mais uma vez a variável com maior influência na variação dos valores de vida útil estimada, com incrementos de 7,1% e de 4,0% para uma exposição baixa e decréscimos de 7,1% e de 3,3% para uma exposição alta, respetivamente nos modelos de três e quatro variáveis.

A análise anterior conduziu à identificação das variáveis proximidade ao mar e exposição aos agentes poluentes como as que mais influenciam os valores de vida útil fornecidos pelos modelos. De facto, a proximidade ao mar condiciona o grau de exposição dos edifícios à brisa marítima, de elevado teor em humidade e em sais dissolvidos. A condensação do vapor de água e a cristalização dos sais, no interior ou no exterior dos sistemas, conduz ao aparecimento ou ao agravamento de anomalias, o que aumenta a degradação das fachadas. Por exemplo, a humidade propicia o desenvolvimento biológico e a cristalização de sais origina tensões que podem gerar anomalias de perda de integridade (Magos et al., 2016; Barreira e Freitas, 2013). Em relação à exposição aos agentes poluentes, a presença destas substâncias na atmosfera, onde se encontram em suspensão, pode induzir a sua fixação na superfície dos revestimentos, em função do seu grau de concentração ou da rugosidade e porosidade dos revestimentos, por exemplo. Para além do aparecimento de eventuais anomalias de carácter estético, os poluentes podem reagir quimicamente com os materiais de revestimento, causando a sua dissolução ou a criação de novas substâncias, o que aumenta a degradação dos sistemas ao longo do tempo (Norvaišienė et al., 2003).

Em suma, a análise dos diferentes modelos propostos garante a validade de todos para a modelação do fenómeno de degradação associado a revestimentos do tipo ETICS. Todos as tipologias de modelos apresentam vantagens e limitações, pelo que não é possível designar uma como sendo a melhor. No entanto, em todas é reconhecida uma boa capacidade preditiva, pelo que a sua aplicação na previsão da vida útil de revestimentos ETICS conduziu a resultados fiáveis. Cabe às entidades com responsabilidade nos processo de tomada de decisão, a escolha dos modelos ou dos resultados que melhor se ajustam às suas necessidades, de acordo com as características distintas que apresentam.

5.5. Conclusões

O objetivo do presente capítulo consistiu na aplicação de diferentes técnicas para a construção de modelos destinados à previsão da vida útil de revestimentos ETICS. O foco foi dado aos modelos gerados com base em redes neuronais artificiais e em sistemas de lógica difusa. Estas duas abordagens têm sido aplicadas com sucesso, em diversas áreas e para diversos fins, dadas as suas características próprias que se adequam particularmente bem à representação de situações de complexidade elevada.

Os resultados obtidos verificam esta tendência, uma vez que todos os modelos permitiram uma descrição adequada da degradação observada nos revestimentos analisados durante o trabalho de campo. De acordo com eles, a vida útil estimada para o sistema ETICS varia entre 21 e 22 anos. Este intervalo de valores revela-se realista e concordante com os valores obtidos por investigações do mesmo âmbito, também sobre o mesmo tipo de solução de revestimento. Assim, a utilidade das técnicas de modelação adotadas para o objetivo da sua aplicação é confirmado.

6. Conclusões

6.1. Considerações finais

As preocupações crescentes com o setor da construção têm motivado a criação e a adoção de medidas promotoras de uma maior sustentabilidade, sobretudo aos níveis ambiental e económico. As evidências sugerem que, num futuro próximo, esta tendência se mantenha ou se verifique, inclusivamente, uma implementação ainda mais holística e integradora de medidas neste sector. Neste sentido, as atividades relacionadas com a previsão da vida útil das construções e dos seus elementos revelam uma elevada importância, cada vez mais reconhecida pelos intervenientes nos processos de conceção e gestão das construções, uma vez que permitem (Serralheiro, 2016): i) o reconhecimento dos fatores que influenciam a degradação dos materiais; ii) a previsão dos fenómenos de degradação; iii) a minimização das consequências associadas a esses fenómenos, através da otimização das ações de manutenção a realizar; iv) a redução de eventuais custos de reparação e impactes ambientais. A aplicação prática de ações de previsão de vida útil garante a conceção de edifícios de um modo mais sustentável.

Apesar da existência de investigações com aplicabilidade prática para a previsão da vida útil dos elementos das construções e dos desenvolvimentos recentes nesta área, na maioria dos casos, a informação disponível baseia-se na experiência empírica ou no comportamento dos materiais quando sujeitos a ensaios laboratoriais, sob a ação de um conjunto de condições controladas (Silva, 2015). A complexidade associada ao fenómeno de degradação (resultante da especificidade de cada construção, em termos das suas características próprias e do modo de interação dos vários fatores de degradação que sobre si atuam) exige o desenvolvimento de novas abordagens, capazes de fornecer respostas adequadas a esta solicitação, mesmo perante um ambiente de elevada variabilidade e incerteza.

A incontornável influência das fachadas no desempenho global dos edifícios (no que diz respeito às questões energéticas ou à defesa contra os agentes de deterioração, entre outros aspetos) suscita a necessidade da criação de metodologias especificamente orientadas para estes elementos não estruturais. A constatação deste facto tem sido a motivação da linha de investigação na qual a presente dissertação se insere, relacionada com a previsão da vida útil de elementos utilizados como revestimentos de fachada de edifícios correntes. Todo o trabalho de investigação desenvolvido neste âmbito teve como foco os revestimentos do tipo ETICS, uma solução recente e com popularidade crescente no setor da construção, graças às suas diversas vantagens, que se revelam compatíveis com os preceitos de sustentabilidade em vigor. Os trabalhos e os resultados anteriores da autoria de Ximenes et al. (2014) e de Marques et al. (2018), também relacionados com esta solução de revestimento de edifícios, foram tidos como principal referência.

O método de investigação adotado nesta dissertação teve por base uma extensa pesquisa bibliográfica, destinada à recolha de informação relacionada com as temáticas abordadas. Os conhecimentos adquiridos nesta etapa permitiram uma boa sustentação de todo o trabalho posterior. Esta fase foi sucedida pelo trabalho de campo que, para além das atividades de levantamento de dados, também envolveu um conjunto de trabalhos complementares, prévios e posteriores. Inicialmente, foi efetuada uma caracterização da amostra utilizada na investigação anterior, salientando os aspetos que a nova amostra deveria colmatar. Após a identificação e seleção dos novos casos de estudo, tendo por base os aspetos identificados no passo anterior, foram realizadas as inspeções visuais às fachadas dos edifícios selecionados,

segundo uma metodologia bem especificada. O objetivo foi o levantamento *in situ* das anomalias evidenciadas por cada caso de estudo, nas suas condições reais de ocupação e utilização, a par de outros aspetos relevantes para a modelação do fenómeno de degradação associado aos sistemas em estudo. Após o tratamento estatístico da informação recolhida nesta fase e da exclusão dos casos de estudo com tendências de degradação anormalmente distintas das restantes, foi possível a constituição de uma amostra global formada por 364 revestimentos.

Com os dados recolhidos durante o trabalho de campo, tornou-se possível a aplicação da metodologia proposta por Gaspar (2009) para a determinação do índice de severidade de degradação (S_w), o indicador numérico que traduz o estado de degradação global evidenciado por cada caso de estudo. Estes índices permitiram a utilização do método gráfico para a análise do padrão da evolução da degradação evidenciado pelos revestimentos ETICS ao longo do tempo. A implementação deste método consistiu na aplicação de uma técnica de regressão simples para a obtenção de curvas de degradação, geradas pelo ajuste de uma função não linear ao conjunto de pontos formados pelas idade dos revestimentos e pela respetiva severidade de degradação. Através da curva de degradação global, foi obtida uma vida útil da amostra de 20 anos. O valor elevado do coeficiente de determinação (0,77) sugere uma adequada tradução da realidade observada com este modelo. Através das curvas de degradação parciais, associadas a cada característica destes revestimentos, foram obtidas vidas úteis estimadas com valores desta ordem de grandeza (apenas se excetuam as curvas associadas a revestimentos do tipo reforçado ou cerâmico, a revestimentos com acabamento do tipo cerâmico e a revestimentos de cores escuras, onde a falta de representatividade da amostra, segundo estas categorias, conduziu a valores muito superiores). Embora os coeficientes de determinação não possuam sempre valores significativos, na maioria dos casos as curvas revelam uma adequada tradução da realidade observada. Assim, os resultados obtidos com o método gráfico revelaram-se apropriados.

Uma vez concluídas todas as etapas anteriores, tornou-se possível o desenvolvimento dos modelos computacionais, com vista à previsão da vida útil dos revestimentos ETICS. Antes da sua construção, no entanto, foi efetuada uma análise de regressão múltipla, que permitiu identificar as variáveis estatisticamente relevantes para a descrição da degradação sofrida por estes sistemas. As variáveis explicativas foram agrupadas: i) num conjunto de três variáveis - idade dos revestimentos, proximidade ao mar e exposição aos agentes poluentes; e ii) num conjunto de cinco variáveis - idade dos revestimentos, proximidade ao mar, exposição aos agentes poluentes, textura do acabamento e orientação das fachadas. A partir de cada um destes conjuntos, foram criados os modelos computacionais, com base em redes neuronais artificiais e em lógica difusa. Nesta fase, foram ainda construídos dois outros modelos de uma tipologia distinta, a partir de uma análise de regressão (múltipla linear). Todos os modelos foram verificados em termos da sua significância estatística (através do grau de correlação entre os valores observados e previstos pelos modelos), validados em termos da sua capacidade preditiva (através de um conjunto de diferentes parâmetros estatísticos) e avaliados em termos do sentido físico dos resultados fornecidos. Estas verificações garantiram a adequabilidade dos modelos ao fornecimento de estimativas fiáveis da vida útil esperada das soluções de revestimento em estudo.

Os resultados obtidos pelos diferentes modelos revelaram uma elevada similaridade entre si. Relativamente às redes neuronais artificiais, os valores de vida útil estimados variaram entre 21 e 22

anos, respetivamente para os modelos com base nos conjuntos de três e cinco variáveis. Os mesmo resultados foram obtidos com os modelos baseados em lógica difusa, ou seja, vidas úteis estimadas de 21 e 22 anos para os modelos com base nos conjuntos de três e quatro variáveis, respetivamente. Ambos os modelos de regressão múltipla linear, com três e cinco variáveis, forneceram uma vida útil estimada de 21 anos. Os valores de vida útil estimados apresentam coerência com os valores existentes na bibliografia. Esta evidência apoia a afirmação de que todos os modelos manifestam eficácia na modelação da degradação sofrida por estes elementos da envolvente.

Contudo, mais do que o mero fornecimento da vida útil associada aos revestimentos ETICS, a presente dissertação pretendeu apresentar e salientar a utilidade de diferentes abordagens na previsão da vida útil, aplicáveis também a outros tipos de elementos construtivos. Apesar de complexas em termos conceptuais, de exigirem *software* específico e de necessitarem de mais tempo de processamento, as técnicas de modelação utilizadas apresentam vantagens relativamente a outras abordagens mais simples. De modo particular, as técnicas computacionais têm por base algoritmos com capacidade de aprendizagem diretamente a partir de observações de um fenómeno real (mesmo se sujeitas a qualquer tipo de imprecisão) e utilizam o conhecimento adquirido para a formulação de equações não-lineares complexas, que permitem uma modelação eficaz do fenómeno em causa. A degradação dos elementos é uma manifestação física inevitável, mas à qual estão associadas incertezas de várias origens, das quais se salientam (Silva, 2015): i) falta de conhecimento de todos os fatores que causam degradação ao longo do tempo, bem como da interação possível entre eles; ii) falta de conhecimento pleno sobre as propriedades dos materiais quando afetados pelos fatores anteriores, de forma isolada ou combinados; iii) falta de capacidade de previsão sobre a influência que eventuais erros de projeto, construção e utilização têm no desempenho dos elementos; iv) subjetividade associada ao limite máximo de degradação aceitável (nível mínimo de desempenho). Tendo em conta que o fenómeno de degradação se caracteriza por todos estes tipos de incerteza, assume-se pertinente o usufruto das potencialidades referidas, reconhecidas nos métodos computacionais.

6.2. Propostas de melhoria e de desenvolvimentos futuros

Apesar de a presente dissertação não se assumir como a primeira abordagem à previsão da vida útil de revestimentos com recurso a ETICS e de ter tentado colmatar algumas limitações evidenciadas pelas investigações anteriores, ainda existem aspetos que continuam a poder ser melhorados. As propostas de melhoria à investigação realizada dizem respeito, de modo fundamental, a aspetos relativos aos processos de recolha de informação e a aspetos relacionados com os modelos e a sua calibração.

A metodologia adotada na modelação do fenómeno de degradação, baseada na realização de inspeções visuais *in situ* a diferentes casos de estudo, reunidos numa amostra global, conduz a modelos que apresentam elevada sensibilidade aos dados a partir dos quais foram gerados. A existência de poucos casos de estudo ou a presença de fatores estatisticamente pouco significativos na amostra condiciona, deste modo, os resultados obtidos. A própria natureza computacional das técnicas utilizadas implica a existência de um número elevado de dados, que permite a obtenção de modelos tanto mais eficazes quanto maior for. Os modelos baseados em lógica difusa são muito condicionados por este fator, em particular quanto maior o número de variáveis envolvidas. Assim, uma das propostas relaciona-se com a inclusão de um maior número de revestimentos, em particular os que se insiram nas categorias

que apresentaram mais défice de casos. As categorias onde o acréscimo de casos é mais pertinente são: i) revestimentos com idades superiores a 20 anos; ii) revestimentos dos tipos reforçado ou cerâmico; iii) revestimentos de textura lisa. No entanto, tal como refere Silva (2015), também é pertinente a seleção de casos noutras zonas do país (em particular no interior e a maiores altitudes), sujeitos a outras condições de exposição ambiental (ciclos gelo-degelo, por exemplo).

Uma das fragilidades reconhecidas no processo de recolha de dados adotado refere-se à subjetividade associada à identificação e classificação das anomalias detetadas nos revestimentos. Diferentes inspetores apresentam sensibilidades diferentes às anomalias e aos respetivos níveis de degradação, o que conduz a modelos distintos, mesmo com base na mesma amostra. Tal como Marques (2016) sugere, com base em investigações anteriores, uma das formas de minimizar os erros de leitura ou de interpretação da degradação apresentada pelas fachadas seria a criação de um sistema de compilação de dados, que apresentasse exemplos ilustrativos claros das manifestações anómalas associadas aos diferentes níveis de degradação possíveis. No fundo, trata-se de uma melhoria às escalas de degradação propostas no subcapítulo 3.6, que visa a criação de escalas mais completas e integradoras, que auxiliem e simplifiquem os processos de inspeção.

Ainda em relação ao processo de recolha de dados, a inclusão das anomalias associadas a fenómenos discretos é também uma melhoria sugerida. Apesar de não permitirem a modelação da degradação com o tempo, uma vez que conduzem ao seu agravamento e propiciam o surgimento de outras anomalias, a sua consideração iria permitir a obtenção de modelos mais completos. Tal como refere Emídio (2012), a solução poderia passar pela adoção de um coeficiente de ponderação.

Como desenvolvimentos futuros, tal como identificado por outros autores de investigações relacionadas com a previsão da vida útil de revestimentos de fachadas, é proposta a extensão das técnicas de modelação adotadas a outros tipo de elementos construtivos. Apesar de Silva et al. (2016a) já terem aplicado, com sucesso, todos os métodos aos revestimentos de edifícios correntes mais tradicionais (reboco, pedra natural, cerâmico e pintura), os revestimentos em betão à vista são uma possibilidade ainda não explorada e que podem ser alvo de um estudo futuro. Contudo, o âmbito de aplicação vasto das técnicas empregues possibilita a sua aplicação a qualquer outro elemento. No que respeita aos revestimentos de fachada do tipo ETICS, uma vez que já foram avaliados em termos de vida útil segundo métodos de natureza determinística, fatorial e computacional, uma possibilidade que se segue é a aplicação de métodos de natureza estocástica. Estes métodos revelam vantagens relativamente aos métodos anteriores, uma vez que a sua aplicação neste contexto permite a análise da vida útil de elementos construtivos através de funções de distribuição, com a quais é possível a associação de diferentes probabilidades a diferentes condições dos revestimentos. A aplicação, bem sucedida, desta tipologia de métodos a outros revestimentos de edifícios, também pode conduzir a bons resultados associadas aos sistemas ETICS, aumentando o leque de alternativas existentes.

Bibliografia

A

- Adamczyk, J. e Dylewski, R., *The impact of thermal insulation investments on sustainability in the construction sector*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, pp. 421-429, 2017.
- Agrawal, S. e Agrawal, J., *Neural network techniques for cancer prediction: a survey*, Procedia Computer Science, 60, pp. 769-774, 2015.
- AIJ (Architectural Institute of Japan), *The English version of the principal guide for service life planning of buildings*, Tokyo, Japan, 1993.
- Ali, A. e Rahmat, I., *The performance measurement of construction projects managed by ISO-certified contractors in Malaysia*, Journal of Retail & Leisure Property, 9, pp. 25-35, 2010.
- Ali, D., Yohanna, M., Puwu, B. e Garkida, B., *Long-term forecast modelling using a fuzzy logic approach*, Pacific Science Review: Natural Science and Engineering, 18(2), pp. 123-127, 2016.
- Amaro, B., *Sistemas de inspeção e diagnóstico de ETICS em paredes*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- Amaro, B., Saraiva, D., Brito, J. e Flores-Colen, I., *Inspection and diagnosis system of ETICS on walls*, Construction and Building Materials, 47, pp 1257-1267, 2013.
- Amaro, B., Saraiva, D., Brito, J. e Flores-Colen, I., *Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of ETICS in walls*, Journal of Civil Engineering and Management, 20 (4), pp 511-526, 2014.
- ASTM E632-82, *Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials*, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, 1996.

B

- Babuška, R., *Fuzzy modeling for control*, Springer Science + Business Media, Netherlands, 1998, ISBN: 978-94-010-6040-0.
- Balaras, C., Droutsas, K., Dascalaki, E. e Kontoyiannidis, S., *Deterioration of Europe apartment buildings*, Energy and Buildings, 37, pp. 515-527, 2005.
- Barreira, E., e Freitas, V., *Experimental study of the hygrothermal behaviour of external thermal insulation composite systems (ETICS)*, Building and Environment, 63, pp. 31-39, 2013.
- Barreira, E., e Freitas, V., *External thermal insulation composite systems (ETICS) - An evaluation of hygrothermal behaviour*, Springer, 2016, ISBN: 978-3-319-20381-2.
- Barrow, H., *Connectionism and neural networks*, Academic Press, 1996, ISBN: 978-0-12-161964-0.
- Basak, S., Grunwald, G., Balasubramanian, K. e Opitz, D., *Use of statistical and neural net approaches in predicting the toxicity of chemicals*, Journal of Chemical Information and Computer Sciences, 40, pp. 885-890, 2000.
- Bianchi, F., Maiorino, E., Kampffmeyer, M., Rizzi, A. e Jenssen, R., *Recurrent neural networks for short-term load forecasting - an overview and comparative analysis*, Springer, 2017, ISBN: 978-3-319-70338-1.
- Brand, S., *How buildings learn. What happens after they are built?* Penguin Books, EUA, 1994, ISBN: 978-1-101-56264-2.

Bordalo, R., Brito, J., Gaspar, P. e Silva, A., *Service life prediction modelling of adhesive ceramic tiling systems*, Building Research & Information, 39, pp. 66-78, 2011.

C

Carretero-Ayuso, M., Moreno-Cansado, Al. e Brito, J., *Study of the prevalence of critical and conflict-prone points in façades*, Engineering Failure Analysis, 2016.

Cecconi, F., *Performance leads the way to service life prediction*, 9th International Conference on Durability of Buildings Materials and Components, Brisbane, Australia, pp. 570-582, 2002.

Chai, C., Brito, J., Gaspar, P. e Silva, A., *Statistical modelling of the service life prediction of painted surfaces*, International Journal of Strategic Property Management, 19, pp. 173-185, 2015.

CSA S478-95, *Guideline on durability in buildings*, Canadian Standards Association, Ontario, Canada, 1995.

Cole, I. e Corrigan, P., *Development of a range of methods for estimating the service life of buildings and engineered structures*, 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia, pp. 310-316, 2009.

D

Dias, J., *Aplicação de redes neuronais em engenharia sísmica*, Dissertação Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2008.

Dias, J., Silva, A., Chai, C., Gaspar e Brito, J., *Neural networks applied to service life prediction of exterior painted surfaces*, Building Research & Information, 42:3, pp. 371-380, 2014.

Durão, V., Caixinha, J., Osório-Peters, S., Boer, E., Williams, I., Curran, T. e Pertl, A., *Zero-waste networks in construction and demolition in Portugal*, Waste and Resource Management, 167, pp. 153-168, 2014.

Dylewski, R. e Adamczyk, J., *Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls*, Building and Environment, 46, pp. 2645-2623, 2011.

E

Emídio, F., *Aplicação do método factorial à previsão da vida útil de revestimentos de pedra natural*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2012.

ETAG 004, *Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering*, European Organisation for Technical Approvals, Brussels, 2013.

F

Falat, L. e Pancikova, L., *Quantitative modelling economics with advanced artificial neural networks*, Procedia Economics and Finance, 34, pp. 194-201, 2015.

Freitas, V., Corvacho, H., Sá, A. e Quintela, M., *Discussing the durability Assessment of Cement Mortars - a Contribution for a Prediction Model*, 11th International Conference on Durability of Building Material and Components, Istanbul, Turkey, 2008.

G

Gabbay, D., Hogger, C. e Robinson, J., *Handbook of logic in artificial intelligence and logic programming - Volume 5: logic programming*, Oxford University Press, 1998, ISBN: 0-19-853792-1.

Galbusera, M., Brito, J. e Silva, A., *The importance of the quality of sampling in service life prediction*, Construction and Building Materials, 66, pp. 19-29, 2014.

Gaspar, P., *Metodologia para o cálculo da durabilidade de rebocos exteriores correntes*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2002.

Gaspar, P., *Vida útil das construções: Desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa da durabilidade de elementos da construção - Aplicação a rebocos de edifícios correntes*, Dissertação de Doutoramento em Ciências de Engenharia, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

Gaspar, P. e de Brito, J., *Modelo de degradação de rebocos*, Engenharia Civil, 24, pp. 17-27, 2005.

Gonzalez, E., Sarkis, J., Huisingh, D., Huatuco, L., Maculan, N., Montoya-Torres, J. e Almeida, C., *Making real progress toward more sustainable societies using decision support models and tools: introduction to the special volume*, Journal of Cleaner Production, pp. 1-13, 2015.

Grant, A., Ries, R. e Kilbert, C., *Life cycle assessment and service life prediction - a case study of building envelope materials*, Journal of Industrial Ecology, 18, 2014.

H

Haack, S., *Deviant Logic, fuzzy logic: beyond the formalism*, University of Chicago Press, 1996, ISBN: 0-226-31134-1.

Haykin, S., *Neural networks: a comprehensive foundation*, Prentice Hall Inc., 2ª edição, New Jersey, 1999, ISBN: 0132733501.

Hovde, P. e Moser, K., *Performance based methods for service life prediction - State of the art report*, CIB W080 / RILEM 175 SLM Service Life Methodologies Prediction of Service Life for Buildings and Components, Norway, 2004, ISBN: 90-6363-040-9.

Hu, H., Tang, L., Zhang, S. e Wang, H., *Predicting the direction of stock markets using optimized neural networks with Google Trends*, Neurocomputing, pp. 1-8, 2018.

I

ISO, *ISO 15686-1: Buildings - Service life planning - Part 1: general principals*. International Organization for Standardization, 2000.

Iancu, I., *Heart disease diagnosis based on mediative fuzzy logic*, Artificial Intelligence in Medicine, 89, pp. 51-60, 2018.

K

Khera, N. e Khan, S., *Prognostics of aluminium electrolytic capacitors using artificial neural network approach*, Microelectronics Reliability, 2018.

Künzel, H., Künzel, H. e Sedbauer, K., *Long-term performance of external thermal insulation systems (ETICS)*, Architectura, 5, pp. 11-24, 2006.

L

Lam, E., Chan, A. e Chan, D., *Benchmarking success of building maintenance projects*, Facilities, 28, pp. 290-305, 2010.

Liisma, E., Raado, L., Lumil, S. Lill, I. e Sulakatko, V., *The effect of moisture content of insulation boards on the adhesion strength of ETICS*, Proceedings of the 5th European Conference of Civil Engineering, Florence, Italy, pp. 103-108, 2014.

M

Madureira, S., Flores-Colen, I., Brito, J. e Pereira, C., *Maintenance planning of façades in current buildings*, Construction and Building Materials, 147, pp. 790-802, 2017.

Magos, M., Brito, J., Gaspar, P. e Silva, A., *Application of the factor method to the prediction of the service life of external paint finishes on façades*, Materials and Structures, 2016.

Marques, C., *Aplicação do método factorial à previsão da vida útil de ETICS*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2016.

Marques, C., Brito, J. e Silva, A., *Application of the factor method to the service life prediction of ETICS*, International Journal of Strategic Property Management, 22, pp. 204-221, 2018.

Mata, J., *Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models*, Engineering Structures, 33, pp. 903-910, 2011.

Mendelson, E., *Introduction to mathematical logic*, Taylor & Francis Group, 2010, ISBN: 978-1-58488-876-5.

Montgomery, D. e Ruger, G., *Applied statistics and probability for engineers*, John Wiley & Sons, Inc., 3^a edição, EUA, 2003.

Morcous, G. e Akhnouk, A., *Stochastic modelling of infrastructure deterioration: an application to concrete bridge decks*, Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montréal, Canada, pp. 104-113, 2005.

Moser, K., *Towards the practical evaluation of service life - Illustrative application of the probabilistic approach*, 8th International Conference on Durability of Buildings Materials and Components, Vancouver, pp. 1319-1329, 1999.

N

Nadoushani, Z., Ali, A. e Jornet, J., *Multi-criteria selection of façade systems based on sustainability criteria*, Building and environment, 2017.

Nakashima, S., André, D. e Franco, B., *Revisão: Aspectos básicos da microbiologia preditiva*, Brazilian Journal of Food and Technology, 3, pp. 41-51, 2000.

Nireki, T., *Service life design*, Construction and Building Materials, 10(5), pp. 403-406, 1996.

Norvaišienė, R., Miniotait, R. e Stankevičius, V., *Climatic and air pollution effects on building facades*, Materials Science, 9, pp. 102-105, 2003.

P

Paczkowski, N., *External Thermal Insulation Composite System (ETICS) for the refurbishment of an existing detached house in Germany*, ICCA-WBCSD Avoided Emissions Guidance Case Study, BASF SE, pp. 1-9, 2013.

Pai, S. e Bader, G., *Patient similarity networks for precision medicine*, Journal of Molecular Biology, 430, pp. 2924-2938, 2018.

Pal, N. e Bezdek, J., *On cluster validity for the fuzzy c-means model*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 3(3), pp. 370-379, 1995.

Pathirage, C., Li, J., Li, L., Hao, H., Liu, W. e Ni, P., *Structural damage identification based on autoencoder neural networks and deep learning*, Engineering Structures, 172, pp. 13-28, 2018.

Popkin, R. e Stroll, A., *Philosophy made simple*, Made Simple Books, 1993, ISBN: 0-7506-0942-7.

R

Rafiq, M., Bugmann, G. e Easterbrook, D., *Neural network design for engineering applications*, Computers & Structures, 79, pp. 1541-1552, 2001.

Ramos, R., Silva, A., Brito, J. e Gaspar, P., *Methodology for the service life prediction of ceramic claddings in pitched roofs*, Construction and Building Materials, 166, pp. 386-399, 2018.

Rodrigues, M., Teixeira, J., Cardoso, J. e Anjos, A., *Envelope index evaluation model of existing buildings*, Civil Engineering and Environmental Systems, 30, pp. 26-39, 2013.

Ross, T., *Fuzzy logic with engineering applications*, John Wiley & Sons, 2017, ISBN: 9781119235859.

S

Santos, M., *Metodologias de previsão da vida útil de materiais, sistemas ou componentes da construção - Revisão bibliográfica*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Construções, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

Saraiva, D., *Tecnologia e reabilitação de ETICS em paredes*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.

Schmidt, A. e Finan, C., *Linear regression and the normality assumption*, Journal of Clinical Epidemiology, 98, pp. 146-151, 2018.

Serralheiro, I., *Previsão da vida útil de superfícies de betão à vista*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2016.

Serralheiro, M., Brito, J. e Silva, A., *Methodology for service life prediction of architectural concrete facades*, Construction and Building Materials, 133, pp. 267-274, 2017.

Shohet, I., Rosenfeld, Y., Puterman, M. e Gilboa, E., *Deterioration patterns for maintenance management - A methodological approach*, 8th DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Ottawa, pp. 1666-1678, 1999.

Shohet, I., Puterman, M. e Gilboa, E., *Deterioration patterns of building cladding components for maintenance management*, Construction Management and Economics, 20, pp. 305-314, 2002.

Siddique, N. e Adeli, H., *Computational intelligence - Synergies of fuzzy logic, neural networks and evolutionary computing*, John Wiley & Sons, 2013, ISBN: 9781118337844.

Silva, J. e Falorca, J., *A model plan for buildings maintenance with application in the performance analysis of a composite facade cover*, Construction and Building Materials, 23, pp. 3248-3257, 2009.

Silva, A., *Previsão da vida útil de revestimentos de pedra natural de paredes*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

Silva, A., Brito, J. e Gaspar, P., *Service life prediction model applied to natural stone wall claddings (directly adhered to the substrate)*, *Construction and Building Materials*, 25, pp. 3764-3684, 2011.

Silva, A., Dias, J., Gaspar, P. e de Brito, J., *Statistical models applied to service life prediction of rendered façades*, *Automation in Construction*, 30, pp. 151-160, 2013.

Silva, A., *Modelação estatística da previsão da vida útil dos revestimentos de fachada*, Dissertação Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2015.

Silva, A., Brito, J. e Gaspar, P., *Methodologies for service life prediction of buildings - With focus on façade claddings*, Springer, 2016a, ISBN: 978-3-319-33288-8.

Silva, A., Vieira, S., de Brito, J. e Gaspar, P., *Fuzzy systems in the service life prediction of exterior natural stone claddings*, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016b.

Silva, A., Brito, J. e Gaspar, P., *Comparative analysis of service life prediction methods applied to rendered façades*, *Materials and Structures*, 49(11), pp. 4839-4910, 2016c.

Silva, A., Pereira, C., Brito, J. e Gaspar, P., *Tarefa 3: Desenvolvimento de uma metodologia para incorporar os dados de inspeção visual como input dos métodos de previsão da vida útil - Compatibilização entre o sistema de inspeção e diagnóstico de revestimentos exteriores e os respectivos modelos de previsão da vida útil*, Relatório do Projeto FCT PTDC / ECM - COM / 5772 / 2014, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2017a.

Silva, I., Spatti, D., Flauzino, R., Liboni, L. e Alves, S., *Artificial neural networks - a practical course*, Springer, 2017b, ISBN: 978-3-319-43161-1.

Simona, P., Spiru, P. e Ion, I., *Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation*, International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", Riga, Latvia, pp. 393-399, 2017.

Sulakatko, V., Liisma, E. e Soekov, E., *Increasing construction quality of external thermal insulation composite system (ETICS) by revealing on-site degradation factors*, *Procedia Environmental Sciences*, 38, pp. 765-772, 2017.

T

Tingley, D., Hathway, A. e Davison, B., *An environmental impact comparison of external wall insulation*, *Building and Environment*, 85, pp. 182-189, 2015.

Thomsen, A. e van der Flier, K., *Understanding obsolescence: a conceptual model for buildings*, *Building Research & Information*, 39, 352-362, 2011.

Tůmová, E., Rostislav, D., Černý, V. e Čada, P., *Development of organic and biodegradable insulating material for ETICS*, *Procedia Engineering*, 195, pp. 81-87, 2017.

U

Usman, A., Abdulkadir, H. e Tukur, K., *Application of dummy variables in multiple regression analysis*, International Journal of Recent Scientific Research, 6, pp. 7440-7442, 2015.

V

Veiga, M. e Santos, C., *Revestimentos de isolamento térmico de fachada: eficiência, durabilidade e comprovação de qualidade*, Construção Magazine, 32, pp. 12-18, 2009.

Vieira, S., Silva, A., Sousa, J., Brito, J. e Gaspar, P., *Modelling the service life of rendered facades using fuzzy systems*, Automation in Construction, 51, pp. 1-7, 2015.

W

Wooldridge, J., *Introductory econometrics: a modern approach*, South-Western College Publishing, 4ª edição, EUA, 2009, ISBN: 978-0-324-58162.

X

Ximenes, S., *Previsão da vida útil de ETICS em paredes exteriores*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

Ximenes, S., Brito, J. e Gaspar, P., *Modelling the degradation and service life of ETICS*, Materials and Structures, 2014.

Websites consultados

APFAC, *Patologias de Sistemas de Isolamento Térmico pelo Exterior*, 2014, <http://www.apfac.pt/patologias/lfc-ic-282a-2014.pdf>, consultado em Março de 2018.

Fabrica Food Truck, *Materiales*, 2016, <http://fabricafoodtruck.com/materiales>, consultado em Março de 2018.

Global Escolha, *Sistema ETICS Capoto*, 2015, <http://globalescolha.pt/servicos/sistema-etics>, consultado em Março de 2018.

ISO, *ISO 15686 - Service life planning*, 2011, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:15686:-1:ed-2:v1:en>, consultado em Março de 2018.

iStock, *Neurônio - ilustração*, 2012, <https://www.istockphoto.com/br/vetor/neur%C3%B4nio-gm153059902-310265>, consultado em Maio de 2018.

Anexos

Anexo 1 - Ficha de inspeção e diagnóstico

Ficha de inspeção						
Ficha de inspeção N.º			Data da inspeção			
Código do edifício:			Código da fachada:			
Responsável / função						
Objetivo da inspeção						
I - Condições climatéricas na altura da inspeção						
I.1 - Temperatura	< 5°		entre 5° e 15°		> 15°	
I.2 - Pluviosidade	Nula		Aguaceiros		Chuva	
I.3 - Humidade	Baixa		Média		Alta	
II - Edifício						
II.1 - Localização (Morada / localidade)					II.2 - Número	
II.3 - Tipo de utilização			II.4 - Ano de construção			
II.5 - N.º de pisos acima do solo			II.6 - Volumetria		Compacta	Irregular
II.7 - Área da fachada (m ²)			II.8 - Área do revestimento (m ²)			
II.9 - Caracterização do tipo de revestimento	Tradicional	Cerâmico	Reforçado	Outro:		
II.10 - Cor			II.11 - Tipo de acabamento		Liso	Rugoso
II.12 - Tipo de suporte			II.13 - Tipo de remate inferior			
II.14 - Pingadeiras nos peitoris	Sim	Não	II.15 - Pingadeiras nas varandas		Sim	Não
II.16 - Platibandas	Não		Sim, com capeamento		Sim, sem capeamento	
II.17 - Varandas	Não		Sim, com capeamento		Sim, sem capeamento	
II.18 - Beirados ou proteção superior	Sim	Não	II.19 - Proteção inferior		Sim	Não
II.20 - Canteiros e elementos salientes	Sim	Não	II.21 - Janelas		Sim	Não
II.22 - Orientação da fachada	N	S	E	O	Outra:	
III - Características de exposição ambiental						
III.1 - Tipo de envolvente	Rural		Urbana		Marítima	
III.2 - Proximidade do mar	< 1 km		< 5 km		> 5 km	
III.3 - Exposição à humidade	Alta		Baixa			
III.4 - Ação vento-chuva	Severa		Moderada		Suave	
III.5 - Agentes poluentes	Alta		Corrente		Baixa	
III.6 - Altitude	0 - 300		300 - 600		> 600	
IV - Manutenção						
IV.1 - Intervenções anteriores	Não		Sim		Data:	
IV.2 - Tipologia implementada						
IV.3 - Periodicidade das inspeções e / ou das intervenções						
IV.4 - Características das intervenções efetuadas						
IV.5 - Técnicas utilizadas / Materiais aplicados						
V - Observações						

Ficha de inspeção

VI - Anomalias		Nível B			Nível C			Nível D			Nível E		
		Área afetada	% área	Largura	Área afetada	% área	Largura	Área afetada	% área	Largura	Área afetada	% área	Largura
Perda de integridade	A-C1 - fissuração mapeada												
	A-C2 - fissuração orientada na superfície corrente												
	A-D1 - defeitos nos remanescentes			-			-			-			-

		Nível B		Nível C		Nível D		Nível E		Notas:
		Área afetada	% área	Área afetada	% área	Área afetada	% área	Área afetada	% área	
Manchas / alterações cromáticas	A-A3 - sujidade e acumulação de detritos									
	A-A2 - humidade superficial									
	A-A4 - alterações cromáticas									
	A-B3 - eflorescências / criptoflorescências									
	A-B1 - biodeterioração / colonização biológica									
	A-B2 - vegetação parasitária									
Em juntas	A-C7 - empeno, inchamento, deformações e outras deficiências de planeza									
Perda de aderência	A-B4 - empolamento/abaulamento e bolhas									
	A-C5 - desgaste ou descolamento do acabamento									
	A-C10 - descolamento									
	A-C8 - lacuna de material/perfuração									

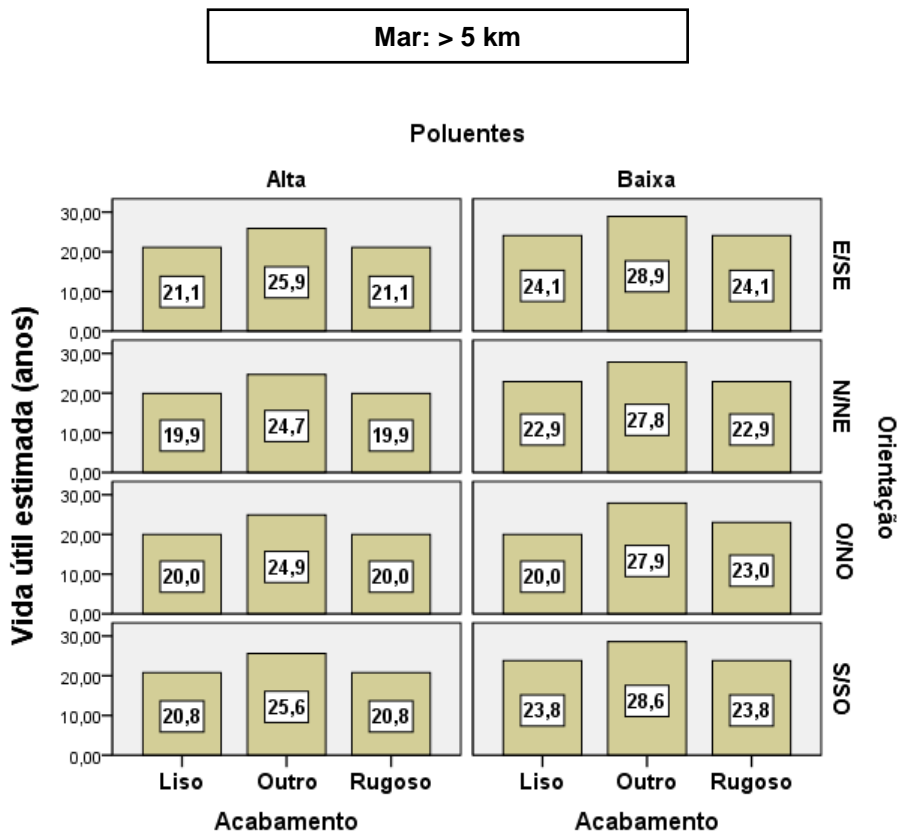
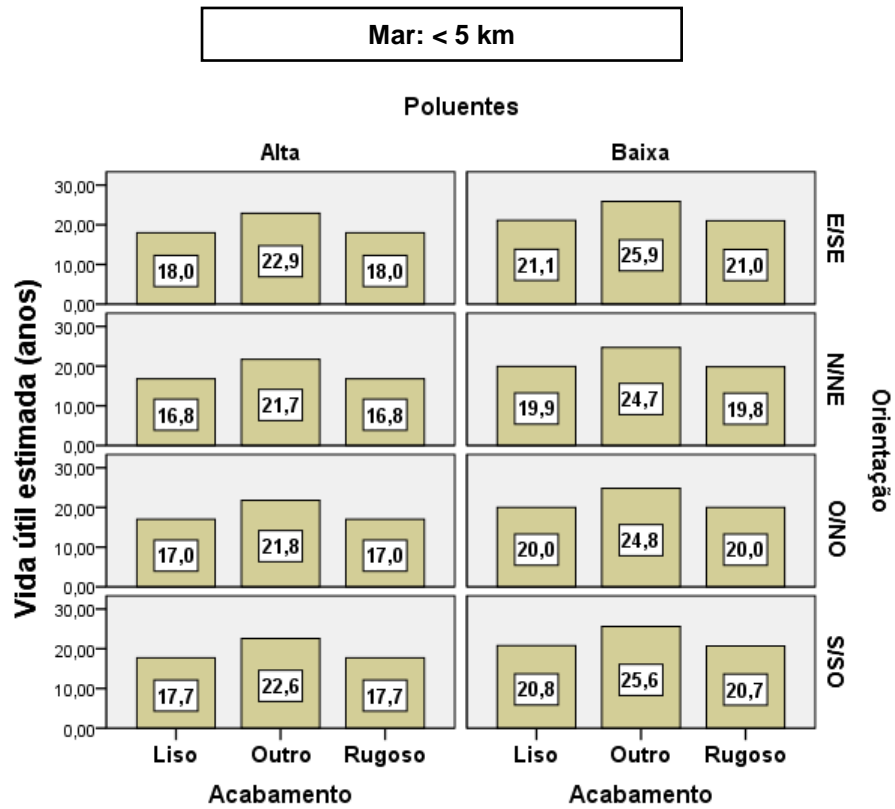
Observações										

Anexo 2 - Caracterização da zona e das construções analisadas

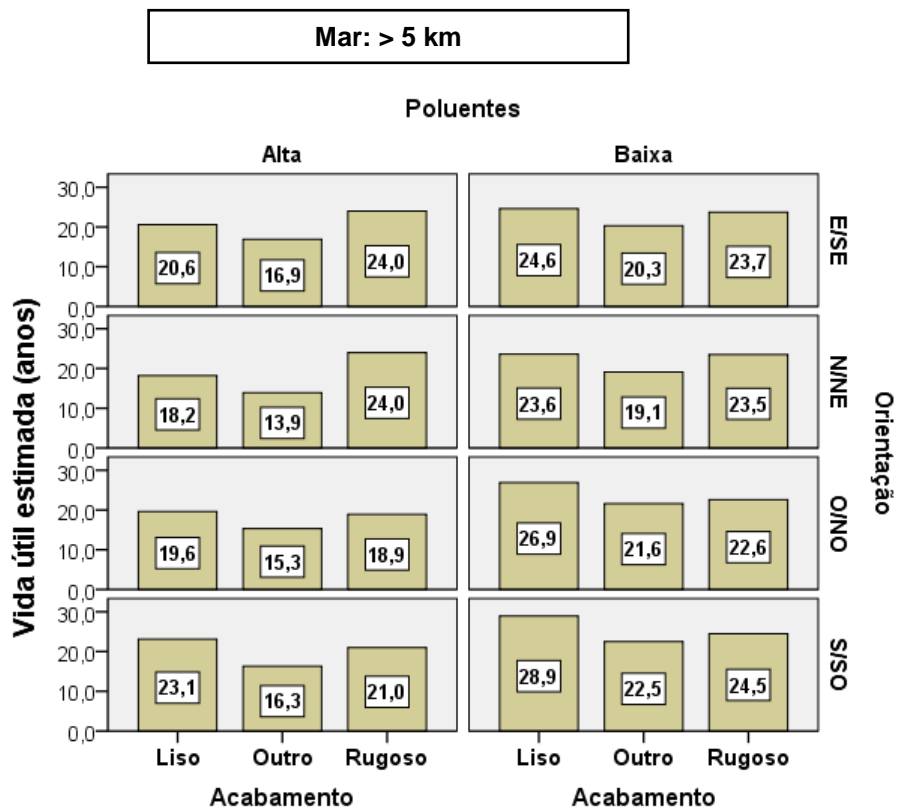
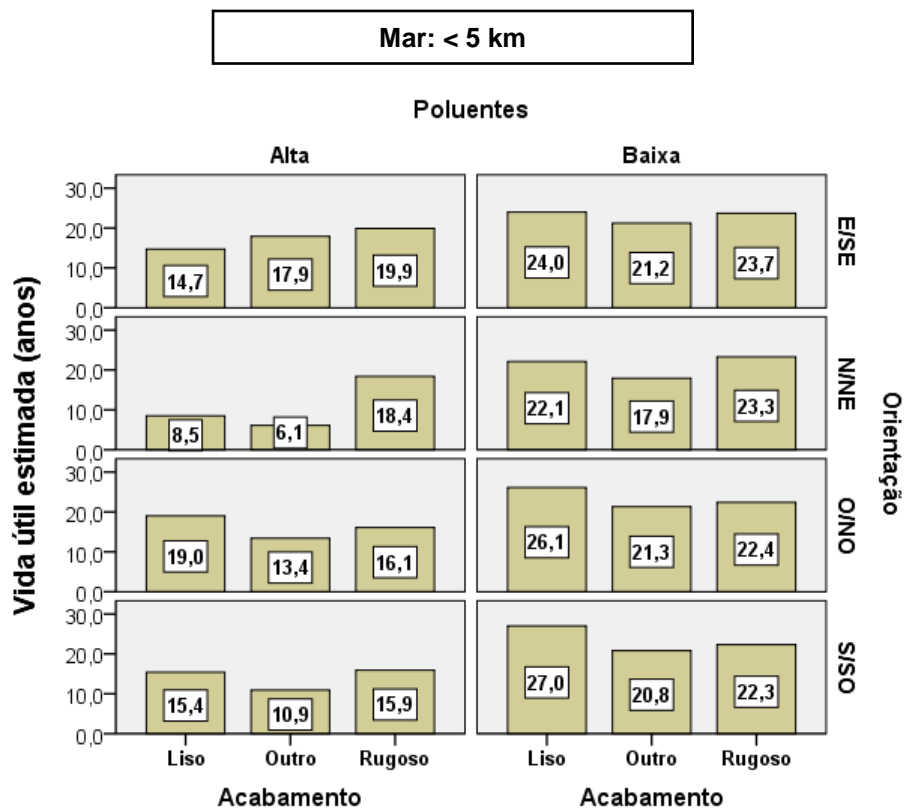
Designação	Endereço	Data da última intervenção	Tipo de envolvente	Tipo de utilização	N.º de pisos acima do solo	Configuração volumétrica
Ed. 1	Avenida Mouzinho de Albuquerque, Lisboa	2003	Urbana	Habitação	5 ou mais	Compacta
Ed. 2	Avenida José Malhoa, Lisboa (Hotel IBIS Lisboa José Malhoa)	2002	Urbana	Serviços	5 ou mais	Compacta
Ed. 3	Tagus Park, Oeiras	2008	Outra	Outros	3 ou 4	Compacta
Ed. 4	Rua Sílvio Lima, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Polo II (Dep. Eng. Eletrónica e de Computadores)	1996	Rural	Serviços	2 ou menos	Irregular
Ed. 5	Rua Sílvio Lima, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Polo II (Dep. Eng. Informática)	1994	Rural	Serviços	Entre 2 e 5	Irregular
Ed. 6	Rua Sílvio Lima, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Polo II (Dep. Eng. Civil)	2000	Rural	Serviços	Entre 1 e 4	Irregular
Ed. 7	Via panorâmica s/ nº, Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, Porto	1989	Rural	Serviços	Entre 1 e 4	Irregular
Ed. 8	Rua do Mondego, Porto (Bairro do Outeiro)	2007	Urbana	Habitação	5 ou mais	Compacta
Ed. 9	Rua de Capitão Salgueiro Maia, Porto (Cooperativa habitacional de Massarelos)	2009	Urbana	Habitação	3 ou 4	Compacta
Ed. 10	Rua Dr. Plácido da Costa, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Dep. De Engenharia)	1999	Urbana	Serviços	Entre 1 e 5	Irregular
Ed. 11	Rua Dr. Roberto Frias, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (INESC Porto - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto)	2002	Urbana	Serviços	5 ou mais	Compacta
Ed. 12	Rua do Dr. Plácido da Costa, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Cantina)	2002	Urbana	Serviços	2 ou menos	Compacta
Ed. 13	Quinta Verde, São Martinho, Sintra (Urbanização Quinta Verde)	1996	Rural	Habitação	2 ou menos	Irregular
Ed. 14	Rua Alves Redol, 45, Vila Franca de Xira (Museu do Neo-Realismo)	2007	Urbana	Serviços	3 ou 4	Compacta
Ed. 15	Av. D. João II, Lote 4.70.02, Residência Universitária Eng.º Duarte Pacheco, Parque das Nações Norte	1998	Urbana	Habitação	3 ou 4	Compacta
Ed. 16	Empreendimento Alto da Mira, Amadora	2005	Urbana	Habitação	3 ou 4	Compacta
Ed. 17	Av. D José I, nº65, Amadora	2011	Urbana	Habitação	5 ou mais	Compacta
Ed. 18	Urbanização Encosta do Mosteiro, Restelo	2006	Urbana	Habitação	5 ou mais	Irregular
Ed. 19	Escola Básica e Jardim de Infância de São Silvestre do Gradil, pavilhão principal, Mafra	2010	Rural	Serviços	2 ou menos	Compacta
Ed. 20	Escola Básica e Jardim de Infância de São Silvestre do Gradil, bloco da receção, Mafra	2010	Rural	Serviços	2 ou menos	Compacta
Ed. 21	Escola Básica e Jardim de Infância de São Miguel de Alcainça, Mafra	2010	Rural	Serviços	2 ou menos	Compacta
Ed. 22	Lar Casa Alapraia, lote 190 A, São João do Estoril	2009	Urbano	Habitação	2 ou menos	Compacta
Ed. 23	Lar Casa Alapraia, Lote 190 B, São João do Estoril	2009	Urbano	Habitação	2 ou menos	Compacta
Ed. 24	Posto de abastecimento da Galp, Bucelas	2011	Urbana	Outro	2 ou menos	Compacta

Ed. 25	Rua Madre Maria Clara, nº 33, Queijas	2010	Rural	Habitação	2 ou menos	Compacta
Ed. 26	Rua Beatriz Costa, nº18, Alfragide	2011	Urbana	Outro	3 ou 4	Compacta
Ed. 27	"Casa - Laboratório Termicamente Otimizada", Porto	1984	Urbana	Outro	2 ou menos	Compacta
Ed. 28	Conjunto Habitacional de Bouça, Rua da Boavista, Porto	2006	Urbana	Habitação	3 ou 4	Irregular
Ed. 29	Moradia de habitação unifamiliar - Rua 20, 4500-805, Espinho	2015	Marítima	Habitação	2 ou menos	Compacta
Ed. 30	Torres Alto da Eira - Rua Frei Manuel do Cernáculo, 1170-150, Penha de França, Lisboa	2015	Urbana	Habitação	5 ou mais	Compacta
Ed. 31	Hotel Just Stay - Rua Gonçalo Cristóvão, 4000-408, Porto	2017	Urbana	Serviços	5 ou mais	Compacta
Ed. 32	Escola Secundária Filipa de Vilhena - Rua do Covelo, 4200-239, Porto	2010	Urbana	Serviços	3 ou 4	Compacta
Ed. 33	Edifícios de habitação multifamiliar - Rua Vitorino Nemésio, 4050-060, Porto	2009	Urbana	Habitação	5 ou mais	Irregular
Ed. 34	Edifício da Liga Portuguesa Contra o Cancro - Estrada Interior da Circunvalação, 4200-107, Porto	2010	Urbana	Serviços	5 ou mais	Irregular
Ed. 35	Biblioteca no ISEP - Rua Doutor António Bernardino de Almeida, 4200-072, Porto	2007	Urbana	Serviços	3 ou 4	Compacta
Ed. 36	Edifício no ISEP - Rua Doutor António Bernardino de Almeida, 4200-072, Porto	2005	Urbana	Serviços	3 ou 4	Compacta
Ed. 37	Escola Secundária Aurélia de Sousa - Rua Aurélia de Sousa, 4000-099, Porto	2009	Urbana	Serviços	3 ou 4	Compacta
Ed. 38	Bairro de Guifões - Avenida Joaquim Neves dos Santos, 4460-125, Guifões, Matosinhos	2017	Urbana	Habitação	3 ou 4	Irregular
Ed. 39	Aquário Sea Life - Rua Particular Nº1 Castelo do Queijo, 4100-379, Porto	2009	Marítima	Serviços	2 ou menos	Compacta
Ed. 40	Edifício de habitação multifamiliar - Rua do Pinheiro Manso, 4100-052, Porto	2009	Urbana	Outro	5 ou mais	Compacta
Ed. 41	Bairro Social - Rua Alberto Sampaio, 4490-152, Póvoa de Varzim	2004	Urbana	Habitação	3 ou 4	Irregular
Ed. 42	Posto de combustível Galp - Avenida do Mar, 4490-406, Póvoa de Varzim	2003	Urbana	Comércio	2 ou menos	Compacta
Ed. 43	Edifício de habitação multifamiliar - Rua Aristides Sousa Mendes, 4480-732, Vila do Conde	2000	Urbana	Habitação	3 ou 4	Irregular
Ed. 44	Bairro do Farol - Avenida Cmde. Coutinho Lanhoso, 4480-759, Vila do Conde	2003	Urbana	Habitação	3 ou 4	Irregular
Ed. 45	Escola Superior de Saúde - Rua Valente Perfeito, 4400-330, Vila Nova de Gaia	2008	Urbana	Serviços	3 ou 4	Compacta
Ed. 46	Centro Social - Rua Actor Carlos Daniel, 4510-501, Fânzeres, Gondomar	2009	Urbana	Serviços	2 ou menos	Compacta
Ed. 47	Edifício na Igreja de Santa Clara - Avenida Avelino Teixeira da Mota, 1950-035, Marvila, Lisboa	2014	Urbana	Serviços	2 ou menos	Compacta
Ed. 48	Residência Universitária - Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1950-063, Chelas, Lisboa	2008	Urbana	Serviços	3 ou 4	Compacta
Ed. 49	Empreendimento Alto da Mira, Amadora	2005	Urbana	Habitação	3 ou 4	Compacta
Ed. 50	Av. D. João II, Lote 4.70.02, Residência Universitária Eng.º Duarte Pacheco, Parque das Nações Norte	1998	Urbana	Habitação	3 ou 4	Compacta

Anexo 3 - Relação entre os valores de vida útil estimados pelo modelo de RML com 5 variáveis



Anexo 4 - Relação entre os valores de vida útil estimados pelo modelo com RNAs, com 5 variáveis



Anexo 5 - Valores de vida útil em função das variáveis explicativas admitidas em cada modelo proposto

(1) Modelos de regressão múltipla linear

Modelo de regressão múltipla linear com três variáveis		
Variável explicativa	Vida útil média (anos)	Rácio entre a vida útil média e a vida útil média global do modelo
Distância ao mar		
< 5 km	18,9	0,904
> 5 km	22,0	1,053
Exposição aos poluentes		
Alta	19,0	0,909
Baixa	21,9	1,048

Modelo de regressão múltipla linear com cinco variáveis		
Variável explicativa	Vida útil média (anos)	Rácio entre a vida útil média e a vida útil média global do modelo
Distância ao mar		
< 5 km	20,5	0,986
> 5 km	23,4	1,125
Exposição aos poluentes		
Alta	21,0	1,010
Baixa	23,3	1,120
Tipo de acabamento		
Liso	20,2	0,971
Rugoso	20,4	0,981
Outro	25,3	1,216
Orientação		
N/NE	21,5	1,034
S/SO	22,4	1,077
E/SE	22,7	1,091
O/NO	21,7	1,043

(2) Modelos com base em redes neurais artificiais

Modelo com base em redes neurais artificiais de três variáveis		
Variável explicativa	Vida útil média (anos)	Rácio entre a vida útil média e a vida útil média global do modelo
Distância ao mar		
< 5 km	19,4	0,919
> 5 km	22,0	1,043
Exposição aos poluentes		
Alta	19,2	0,910
Baixa	22,2	1,052

Modelo com base em redes neurais artificiais de cinco variáveis		
Variável explicativa	Vida útil média (anos)	Rácio entre a vida útil média e a vida útil média global do modelo
Distância ao mar		
< 5 km	18,7	0,850
> 5 km	23,8	1,082
Exposição aos poluentes		
Alta	17,4	0,791
Baixa	23,1	1,050
Tipo de acabamento		
Liso	21,4	0,973
Rugoso	21,5	0,977
Outro	17,2	0,782
Orientação		
N/NE	18,2	0,827
S/SO	20,7	0,941
E/SE	21,0	0,955
O/NO	20,3	0,923

(3) Modelos de lógica difusa

Modelo de lógica difusa com três variáveis		
Variável explicativa	Vida útil média (anos)	Rácio entre a vida útil média e a vida útil média global do modelo
Distância ao mar		
< 5 km	20,5	0,976
> 5 km	21,5	1,024
Exposição aos poluentes		
Alta	19,5	0,929
Baixa	22,5	1,071

Modelo de lógica difusa com cinco variáveis		
Variável explicativa	Vida útil média (anos)	Rácio entre a vida útil média e a vida útil média global do modelo
Distância ao mar		
< 5 km	21,5	1,000
> 5 km	21,7	1,009
Exposição aos poluentes		
Alta	20,8	0,967
Baixa	22,4	1,009
Orientação		
N/NE	16,9	0,786
S/SO	21,6	1,005
E/SE	21,8	1,014
O/NO	21,6	1,005