

# **Modelos estocásticos aplicados à previsão de vida útil de ETICS**

**Rui Pedro Viegas Alves**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Civil**

Orientadores: Professor Doutor Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

Doutora Ana Filipa Ferreira da Silva Cigarro Matos

### **Júri**

Presidente: Professor Vítor Faria e Sousa

Orientador: Doutora Ana Filipa Ferreira da Silva Cigarro Matos

Vogais: Professora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

**Dezembro de 2021**

## **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 aos meus orientadores científicos pela disponibilidade demonstrada e por todo o apoio prestado ao longo da dissertação, contribuindo para o meu sucesso na mesma. Ao Professor Jorge de Brito, agradeço o voto de confiança nas minhas capacidades e o rigor científico que incutiu no meu método de trabalho. À Doutora Ana Silva, agradeço a partilha de experiência necessária para elaboração do trabalho de campo e aplicação dos métodos estocásticos.

Agradeço aos meus pais e avós, por todo o apoio que me deram ao longo do meu percurso académico, por todos os sacrifícios que fizeram para suportar a minha educação e por terem estado presentes para partilhar a sua experiência de vida comigo, ajudando-me a mudar de perspetiva e superar os obstáculos que surgiram no meu caminho.

Agradeço à Cátia, por me ter acompanhado ao longo de toda a dissertação e por me ter demonstrado como conciliar o início da atividade profissional com a conclusão da formação académica.

Agradeço ao meu colega, João Tavares, por ter partilhado os resultados da sua investigação, os quais foram úteis para incorporar na amostra estudada. Agradeço ao João e à Jéssica, por me terem providenciado alojamento no Porto, aquando da fase do trabalho de campo na zona Norte do país e, novamente, ao João, por me ter acompanhado em algumas inspeções. Agradeço à Ana por me ter acompanhado em inspeções na área metropolitana, tanto no distrito de Lisboa, como no distrito de Setúbal.

Agradeço a todos aqueles que, de modo direto ou indireto, contribuíram para a realização desta dissertação e estiveram presentes ao longo do meu percurso académico.

## **Resumo**

A presente dissertação insere-se numa linha de investigação na área da análise da durabilidade e evolução da degradação de elementos construtivos, desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, do Instituto Superior Técnico, tendo como objetivo a aplicação de métodos estocásticos à previsão da vida útil de revestimentos de paredes exteriores em sistema ETICS.

A metodologia adotada consiste em recolher dados, em campo, por via de inspeções visuais e registo fotográfico de fachadas pertencentes a edifícios com a solução de revestimento em estudo. Para tal, é considerada uma amostra de 431 fachadas, com idades entre 1 e 31 anos, localizadas em Portugal Continental. Posteriormente, os dados recolhidos são tratados estatisticamente e são aplicados os métodos estocásticos, de modo a construir modelos que possam ser usados na previsão da vida útil, na análise da evolução da degradação ao longo do tempo e em função das características da fachada e do meio envolvente.

Os modelos estocásticos aplicados na presente dissertação são: cadeias de Markov em tempo contínuo; regressão logística multinomial, para a análise probabilística da evolução da degradação em função da idade e das condições do revestimento e meio envolvente; regressão logística binomial, para a análise probabilística de ser atingido o fim da vida útil dos revestimentos.

Os resultados obtidos revelam uma vida útil média estimada de 18,5 anos, quando aplicado o método gráfico, e uma vida útil média entre 18 e 23 anos, quando aplicadas a regressão logística e as cadeias de Markov, respetivamente.

## **Palavras-chave**

ETICS, vida útil, degradação, regressão logística, cadeias de Markov

## **Abstract**

This dissertation is part of a research line in the analysis of the durability and degradation evolution of construction elements, carried out at the Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, of Instituto Superior Técnico, with the objective of applying stochastic methods to the service life prediction of exterior wall claddings with ETICS systems.

The methodology adopted in this study consists of collecting data, in field, through visual inspections and photographs of façades in buildings that use the insulation system under study. For this purpose, a sample of 431 façades, with ages ranging from 1 to 31 years, located in mainland Portugal, is considered. Subsequently, the collected data are statistically treated, and stochastic methods are applied, to build models that can be used in the service life prediction, in the analysis of the evolution of degradation over time and as a function of the characteristics of the facade and of the surrounding environment.

The stochastic models used in this research are: continuous time Markov chains; multinomial logistic regression, for the probabilistic analysis of the evolution of degradation as a function of the ETICS' age and of the conditions of the cladding and its surroundings; and binomial logistic regression, for the probabilistic analysis of the cladding's service life being reached.

The results obtained reveal an estimated average service life of 18.5 years, when applying the graphical method, and an average service life between 18 and 23 years, when applying logistic regression and Markov chains, respectively.

## **Key words**

ETICS, service life, degradation, logistic regression, Markov chains

# Índice

<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>1.1. Considerações iniciais</b> .....	1
<b>1.2. Objetivos da dissertação</b> .....	2
<b>1.3. Previsão da vida útil de elementos construtivos</b> .....	3
1.3.1. Enquadramento da previsão da vida útil .....	3
1.3.2. Métodos existentes.....	4
<b>1.4. Organização da dissertação</b> .....	5
<b>2. ETICS: caracterização e principais anomalias</b> .....	7
<b>2.1. Introdução</b> .....	7
<b>2.2. Considerações gerais sobre revestimentos ETICS</b> .....	7
2.2.1. Características do sistema .....	7
2.2.2. Aplicação do revestimento .....	9
2.2.3. Vantagens e desvantagens .....	10
<b>2.3. Anomalias</b> .....	10
2.3.1. Anomalias de manchas/alterações cromáticas .....	11
2.3.2. Anomalias em juntas .....	12
2.3.3. Anomalias de perda de continuidade/integridade .....	13
2.3.4. Anomalias de perda de aderência .....	14
2.3.5. Causas prováveis .....	15
<b>2.4. Conclusões</b> .....	15
<b>3. Trabalho de campo</b> .....	17
<b>3.1. Introdução</b> .....	17
<b>3.2. Objetivos do trabalho de campo</b> .....	17
<b>3.3. Metodologia de investigação</b> .....	18
3.3.1. Ficha de inspeção.....	18
3.3.2. Classificação das anomalias e níveis de degradação.....	18
3.3.2.1. Anomalias de manchas / alterações cromáticas .....	19
3.3.2.2. Anomalias em juntas .....	19
3.3.2.3. Anomalias de perda de continuidade/integridade .....	20
3.3.2.4. Anomalias de perda de aderência.....	20
<b>3.4. Análise da amostra inicial</b> .....	21
3.4.1. Caracterização da amostra inicial .....	21
3.4.2. Caracterização das anomalias da amostra inicial .....	25
3.4.3. Identificação das oportunidades de melhoria da amostra inicial.....	26
<b>3.5. Análise da amostra final</b> .....	30

3.5.1.	Constituição da amostra adicional.....	30
3.5.2.	Caracterização da amostra final.....	30
3.5.3.	Caracterização das anomalias da amostra final .....	33
<b>3.6.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>35</b>
<b>4.</b>	<b>Modelos de degradação de revestimentos .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2.</b>	<b>Metodologia para a estimativa da vida útil de revestimentos .....</b>	<b>36</b>
4.2.1.	Modelo de degradação de Gaspar (2009) .....	36
4.2.1.1.	Área degradada ponderada, $A_w$ .....	37
4.2.1.2.	Extensão da degradação, $E$ .....	38
4.2.1.3.	Extensão ponderada da degradação, $E_w$ .....	38
4.2.1.4.	Severidade normalizada da degradação, $S_w$ .....	38
4.2.2.	Relação entre a severidade normalizada e a condição de degradação do revestimento ETICS .....	39
<b>4.3.</b>	<b>Curvas da evolução da degradação de revestimentos .....</b>	<b>39</b>
4.3.1.	Curva global de degradação da amostra .....	40
4.3.2.	Influência dos fatores de degradação condicionantes .....	41
<b>4.4.</b>	<b>Análise dos resultados .....</b>	<b>45</b>
<b>4.5.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>46</b>
<b>5.</b>	<b>Modelos estocásticos .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>47</b>
<b>5.2.</b>	<b>Regressão Logística .....</b>	<b>48</b>
5.2.1.	Considerações gerais.....	48
5.2.2.	Metodologia de construção dos modelos .....	50
5.2.3.	Aplicação à previsão de vida útil de revestimentos ETICS .....	52
5.2.3.1.	Análise probabilística da condição de degradação de fachadas de acordo com a sua idade .....	52
5.2.3.2.	Análise probabilística da condição de degradação de fachadas de acordo com as suas características explicativas .....	55
5.2.3.3.	Análise probabilística de se atingir o fim da vida útil .....	59
<b>5.3.</b>	<b>Cadeias de Markov .....</b>	<b>63</b>
5.3.1.	Considerações gerais.....	63
5.3.2.	Metodologia de construção dos modelos .....	63
5.3.3.	Aplicação à previsão de vida útil de revestimentos ETICS .....	65
<b>5.4.</b>	<b>Análise comparativa dos modelos .....</b>	<b>70</b>
<b>5.5.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>73</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>75</b>
<b>6.1.</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>75</b>

<b>6.2. Desenvolvimentos futuros e propostas de melhoria.....</b>	<b>78</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>79</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>A</b>
<b>Anexo I - Ficha de inspeção e diagnóstico.....</b>	<b>B</b>
<b>Anexo II - Casos adicionais a inspecionar para garantir cobertura da amostra .....</b>	<b>E</b>
<b>Anexo III - Casos inspecionados em campo para a amostra adicional.....</b>	<b>F</b>
<b>Anexo IV - Caracterização da zona e das construções analisadas .....</b>	<b>G</b>
<b>Anexo V - Exemplo de aplicação da metodologia de análise de degradação a uma fachada com revestimento ETICS.....</b>	<b>K</b>
<b>Anexo VI - Idade para a qual as fachadas com ETICS atingem o fim da vida útil, de acordo com os modelos definidos através da regressão logística binomial.....</b>	<b>L</b>
<b>Anexo VII - Tempo de permanência em cada estado de degradação e transições entre estados</b>	<b>M</b>
<b>Anexo VIII - Erro percentual médio dos modelos de cadeias de Markov .....</b>	<b>N</b>
<b>Anexo IX - Idade para a qual as fachadas com ETICS atingem o fim da vida útil, de acordo com o modelo definido através de cadeias de Markov.....</b>	<b>O</b>

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Grupos de anomalias, segundo Ximenes et al. (2015), e tipos de anomalias segundo Silva et al. (2017).....	11
Tabela 3.1 - Níveis de degradação para anomalias do tipo de manchas ou alterações cromáticas (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018) .....	19
Tabela 3.2 - Níveis de degradação para anomalias em juntas (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018).....	20
Tabela 3.3 - Níveis de degradação para anomalias de perda de continuidade / integridade (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018) .....	20
Tabela 3.4 - Níveis de degradação para anomalias de perda de aderência (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018) .....	21
Tabela 3.5 - Pormenorização da Figura 3.12, relativamente à nomenclatura dos tipos de anomalias consideradas na investigação. ....	26
Tabela 3.6 - Número mínimo de casos adicionais para a orientação das fachadas. ....	27
Tabela 3.7 - Número mínimo de casos adicionais para a proximidade do mar das fachadas. ....	27
Tabela 3.8 - Número mínimo de casos adicionais para a exposição à humidade das fachadas. ....	27
Tabela 3.9 - Número mínimo de casos adicionais para a ação da chuva-vento sobre as fachadas.....	28
Tabela 3.10 - Número mínimo de casos adicionais para a exposição aos agentes poluentes das fachadas. ....	28
Tabela 3.11 - Número mínimo de casos adicionais para os tipos de revestimento das fachadas. ....	29
Tabela 3.12 - Número mínimo de casos adicionais para as cores do revestimento das fachadas. ....	29
Tabela 3.13 - Número mínimo de casos adicionais para as texturas do acabamento das fachadas.....	29
Tabela 3.14 - Número mínimo de casos adicionais para os tipos de remate inferior das fachadas. ....	29
Tabela 4.1 - Relação entre a condição de degradação das fachadas e o valor da severidade normalizada da degradação (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018).....	39
Tabela 5.1 - Associação entre variáveis independentes e a variável dependente. (adaptado de Hosmer e Lemeshow, 2000, e Silva et al., 2016) .....	49
Tabela 5.2 - Distribuição da amostra em função do nível de degradação.....	52
Tabela 5.3 - Informação sobre o ajuste do modelo.....	53
Tabela 5.4 - Adequação do ajuste do modelo.....	53
Tabela 5.5 - Informação sobre o teste de verosimilhança. ....	53
Tabela 5.6 - Estimação dos parâmetros do modelo. ....	54
Tabela 5.7 - Probabilidade de um revestimento pertencer a cada um dos níveis de degradação, em função da idade. ....	54
Tabela 5.8 - Classificação do modelo. ....	55
Tabela 5.9 - Distribuição da amostra em função do nível de degradação.....	56
Tabela 5.10 - Informação sobre o ajuste do modelo.....	56

Tabela 5.11 - Adequação do ajuste do modelo.....	56
Tabela 5.12 - Informação sobre o teste de verosimilhança. ....	57
Tabela 5.13 - Estimação dos parâmetros do modelo. ....	58
Tabela 5.14 - Probabilidade de um revestimento pertencer a cada um dos níveis de degradação, em função da sua textura e cor.....	59
Tabela 5.15 - Classificação do modelo. ....	59
Tabela 5.16 - Teste aos coeficientes do modelo. ....	60
Tabela 5.17 - Sumário do modelo e teste de Hosmer e Lemeshow.....	60
Tabela 5.18 - Classificação do modelo. ....	60
Tabela 5.19 - Estimação dos parâmetros do modelo. ....	60
Tabela 5.20 - Teste aos coeficientes do modelo. ....	61
Tabela 5.21 - Sumário do modelo e teste de Hosmer e Lemeshow.....	61
Tabela 5.22 - Classificação do modelo. ....	62
Tabela 5.23 - Estimação dos parâmetros do modelo. ....	62
Tabela 5.24 - Probabilidade de um revestimento pertencer a cada um dos níveis de degradação, em função da idade.....	66
Tabela 5.25 - Capacidade classificativa do modelo.....	67
Tabela 5.26 - Probabilidade de um revestimento pertencer a cada um dos níveis de degradação, em função da sua exposição à chuva-vento e da sua exposição aos agentes poluentes. ....	69
Tabela 5.27 - Capacidade classificativa do modelo.....	70

## Lista de figuras

Figura 1.1- Evolução natural do desempenho dos elementos construtivos ao longo do tempo, até ser atingido o fim da vida útil (adaptado de Moser, 1999). .....	4
Figura 2.1 - Elementos típicos constituintes de um revestimento em ETICS (adaptado de APFAC (2018)). .....	8
Figura 2.2 - Anomalia A-A2 - humidade superficial.....	12
Figura 2.3 - Anomalia A-B2 - vegetação parasitária. ....	12
Figura 2.4 - Anomalia A-C7 - empeno, inchamento, deformações e outras deficiências de planeza. ....	13
Figura 2.5 - Anomalia A-C2 - fissuração orientada. ....	14
Figura 2.6 - Anomalia A-C8 - lacuna de material / perfuração.....	14
Figura 3.1 - Histograma com a distribuição da idade das fachadas da amostra inicial. ....	22
Figura 3.2 - Histograma com a distribuição da proximidade ao mar das fachadas da amostra inicial.....	22
Figura 3.3 - Histograma com a distribuição da orientação das fachadas da amostra inicial. ....	23
Figura 3.4 - Histograma com a distribuição da exposição à humidade das fachadas da amostra inicial. .	23
Figura 3.5 - Histograma com distribuição da ação combinada da chuva e vento sobre fachadas da amostra inicial.....	23
Figura 3.6 - Histograma com a distribuição da exposição aos agentes poluentes das fachadas da amostra inicial.....	24
Figura 3.7 - Histograma com a distribuição do tipo de revestimento das fachadas da amostra inicial. ....	24
Figura 3.8 - Histograma com a distribuição das cores do revestimento das fachadas da amostra inicial. ....	25
Figura 3.9 - Histograma com a distribuição das texturas do acabamento das fachadas da amostra inicial. .....	25
Figura 3.10 - Histograma com a distribuição dos tipos de remate inferior das fachadas da amostra inicial. .....	25
Figura 3.11 - Histograma com a distribuição dos grupos de anomalias nas fachadas da amostra inicial. ....	25
Figura 3.12 - Histograma com a distribuição dos tipos de anomalia nas fachadas da amostra inicial. ....	26
Figura 3.13 - Histograma com tipo de utilização dos edifícios da amostra adicional. ....	31
Figura 3.14 - Histograma com número de pisos acima do solo dos edifícios da amostra adicional. ....	31
Figura 3.15 - Histograma com configuração volumétrica dos edifícios da amostra adicional. ....	31
Figura 3.16 - Histograma com resumo da idade dos edifícios da amostra final. ....	31
Figura 3.17 - Histograma com distribuição da orientação dos edifícios da amostra final.....	31
Figura 3.18 - Histograma com distribuição da proximidade do mar dos edifícios da amostra final.....	32
Figura 3.19 - Histograma com distribuição da exposição à humidade dos edifícios da amostra final. ....	32
Figura 3.20 - Histograma com distribuição da ação da chuva e do vento sobre os edifícios da amostra final. .....	32
Figura 3.21 - Histograma com distribuição da exposição aos agentes poluentes dos edifícios da amostra final. ....	32

Figura 3.22 - Histograma com distribuição dos tipos de revestimento dos edifícios da amostra final. ....	33
Figura 3.23 - Histograma com distribuição das cores do revestimento dos edifícios da amostra final. ....	33
Figura 3.24 - Histograma com distribuição das texturas do acabamento dos edifícios da amostra final. ...	33
Figura 3.25 - Histograma com distribuição dos tipos de remate inferior dos edifícios da amostra final. ....	33
Figura 3.26 - Histograma com a distribuição dos grupos de anomalias nas fachadas da amostra final. ...	33
Figura 3.27 - Histograma com a distribuição dos tipos de anomalia nas fachadas da amostra final. ....	34
Figura 3.28 - Distribuição da severidade das anomalias das fachadas da amostra final. ....	34
Figura 3.29 - Histograma com a distribuição percentual das anomalias por grupo de anomalia, para cada nível de degradação. ....	34
Figura 3.30 - Histograma com a distribuição das anomalias por nível de degradação, para cada grupo de anomalias. ....	35
Figura 4.1 - Curva de evolução da degradação da amostra inicial em função da idade. ....	41
Figura 4.2 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade. ....	41
Figura 4.3 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da média das idades. ....	41
Figura 4.4 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da orientação das fachadas. ....	42
Figura 4.5 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da proximidade das fachadas ao mar. ....	43
Figura 4.6 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da exposição das fachadas à humidade. ....	43
Figura 4.7 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da ação combinada da chuva e do vento sobre as fachadas. ....	43
Figura 4.8 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da exposição das fachadas a agentes poluentes. ....	43
Figura 4.9 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e do tipo de revestimento das fachadas. ....	44
Figura 4.10 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da cor do revestimento das fachadas. ....	44
Figura 4.11 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da textura das fachadas. ....	45
Figura 4.12 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e do remate inferior das fachadas. ....	45
Figura 5.1 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade dos revestimentos da amostra em estudo. ....	54
Figura 5.2 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade, da textura e da exposição à humidade dos revestimentos da amostra em estudo. ....	57
Figura 5.3 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade, da textura e da exposição à humidade dos revestimentos da amostra em estudo, para os níveis 2 e 3 de degradação. ....	58

Figura 5.4 - Distribuição da probabilidade de se atingir o fim da vida útil, em função da idade das fachadas. .....	61
Figura 5.5 - Distribuição da probabilidade de se atingir o fim da vida útil, em função da idade das fachadas, da exposição à ação da chuva-vento e da exposição aos agentes poluentes. ....	62
Figura 5.6 - Tempo médio de permanência em cada nível da condição de degradação. ....	66
Figura 5.7 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade dos revestimentos da amostra em estudo. ....	66
Figura 5.8 - Distribuição da probabilidade de se atingir o fim da vida útil, em função da idade das fachadas. .....	67
Figura 5.9 - Tempo médio de permanência em cada nível da condição de degradação, em função da exposição à humidade e da distância ao mar. ....	68
Figura 5.10 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade e distância ao mar, dos revestimentos da amostra em estudo. ....	68
Figura 5.11 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade e exposição à humidade, dos revestimentos da amostra em estudo. ....	69
Figura 5.12 - Distribuição da probabilidade de se atingir o fim da vida útil, em função da idade das fachadas, da exposição à ação da chuva-vento e da exposição aos agentes poluentes. ....	70

## **Lista de abreviaturas e símbolos**

ETICS - External Thermal Insulation Composite Systems.

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações iniciais

Nas últimas décadas, o consumo energético dos edifícios tem sido alvo de forte discussão (Pérez-Lombard et al., 2008). Em paralelo, a temática da sustentabilidade tem-se tornado cada vez mais relevante na indústria da construção (Khatib, 2016). A fachada é o elemento com maior impacto no desempenho energético de um edifício, devido a uma grande área exposta aos agentes atmosféricos e, devido à possibilidade de existirem pontes térmicas, que comprometem o desempenho térmico dos edifícios e podem promover a ocorrência de anomalias. Como tal, uma melhoria no isolamento deste elemento construtivo traduz-se numa melhoria significativa do comportamento térmico do edifício, contribuindo para uma melhoria do desempenho energético (Asdrubali et al., 2012).

A fim de satisfazer requisitos energéticos cada vez mais exigentes, foram desenvolvidas diversas soluções tecnológicas que podem ser utilizadas, tanto na construção de edifícios novos, como na reabilitação de edifícios existentes (Jelle, 2011). No caso concreto das fachadas, foram desenvolvidos os sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior, designados como *External Thermal Insulation Composite Systems*, abreviados para ETICS, na Europa, e *External Insulation and Finishing Systems*, abreviados para EIFS, nos Estados Unidos da América.

Este revestimento tem um bom desempenho ao nível do isolamento térmico pois, sendo aplicada pelo exterior da parede, permite diminuir o efeito das pontes térmicas durante o ano inteiro. Por um lado, é conservada a energia térmica no interior do edifício durante o inverno e, por outro, é bloqueada a entrada de calor excessivo durante o verão. Assim, embora este revestimento esteja associado a um elevado custo inicial, quando comparado com soluções tradicionais, é possível obter uma boa viabilidade económica a longo prazo, considerando o potencial de poupança na climatização do edifício (Collina, 2007).

A utilização desta solução de isolamento térmico, quer no caso da construção nova quer no da reabilitação de edifícios existentes, pressupõe que haja experiência prévia na sua aplicação, para garantir condições adequadas de desempenho térmico, por via da eliminação das pontes térmicas e não provocando danos no material, de modo a não comprometer a sua durabilidade (Amaro et al., 2013).

Ao longo do tempo, a durabilidade de um elemento construtivo tende a diminuir, à medida que surgem anomalias diversas. Estas estão associadas a vários fatores que afetam o desempenho desse elemento e comprometem a sua capacidade de cumprir os requisitos existentes (ISO 15686-1, 2000). Adiante, será apresentado o conceito de vida útil, o qual está diretamente relacionado com a capacidade de cumprimento de requisitos de desempenho por parte de um elemento construtivo. No caso particular desta investigação, são tiradas conclusões sobre a vida útil dos sistemas ETICS, considerando a sua degradação física.

De modo a avaliar o estado da construção e saber quando realizar as ações de manutenção necessárias para garantir o desempenho exigido para os edifícios, são necessárias metodologias objetivas. Da sua aplicação, é possível fazer um acompanhamento continuado do estado do edifício, otimizando a

durabilidade, pelo menor custo das intervenções ao longo de todo o ciclo de vida do edifício, ou seja, durante a fase de construção, durante a fase de operação ou exploração e durante a fase de demolição (Chanter e Swallow, 2008).

## 1.2. Objetivos da dissertação

A presente dissertação de Mestrado visa dar continuidade à linha de investigação desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, no âmbito da previsão de vida útil de elementos de construção, mais concretamente os revestimentos de fachadas que recorrem à solução de revestimento ETICS. Assim, os trabalhos existentes para o elemento em estudo são os de Amaro et al. (2013), Ximenes et al. (2015), Marques et al. (2018) e Tavares et al. (2020). Nestes estudos, é apresentado o elemento considerado, a sua tecnologia construtiva e técnicas de reabilitação; identificadas as anomalias que afetam esta solução de revestimento térmico e que contribuem para a diminuição da durabilidade da solução; definido o sistema de inspeção e diagnóstico a utilizar para a classificação destas anomalias; apresentado o modelo de degradação a considerar para os ETICS; e aplicados métodos determinísticos e computacionais à previsão de vida útil das fachadas.

O presente estudo pretende complementar a investigação existente, por via do aumento da dimensão e representatividade da amostra analisada e por via da aplicação de métodos estocásticos, nomeadamente, a regressão logística e as cadeias de Markov, à previsão da vida útil de fachadas com revestimentos ETICS.

Deste modo, a investigação realizada consiste: i) na pesquisa de bibliografia diversa, com o intuito de recolher informação de suporte aos temas discutidos; ii) na identificação de edifícios com características de interesse para a investigação em curso; iii) na realização de uma campanha de trabalho de campo, com visitas aos edifícios previamente selecionados, para realização de inspeções visuais e recolha *in situ* de dados sobre cada uma das novas fachadas acrescentadas à amostra; iv) no tratamento dos dados recolhidos, de modo a avaliar as condições de degradação das fachadas; v) na definição e aplicação dos métodos estocásticos à amostra em estudo, para obter resultados e efetuar a sua análise, chegando a conclusões sobre a evolução da vida útil dos revestimentos ETICS e sobre a influência dos diversos fatores considerados nesta linha de investigação.

Com a aplicação dos métodos estocásticos, pretende-se responder a um conjunto de questões, às quais não é possível dar resposta recorrendo apenas à aplicação de métodos determinísticos. No caso concreto da investigação efetuada, são três as questões a considerar. Em primeiro lugar, interessa determinar qual a probabilidade de um revestimento possuir uma dada condição de degradação em função da idade da fachada, das características do revestimento e das condições ambientais a que essa fachada se encontra sujeita. Em segundo lugar, pretende-se determinar em que intervalos de tempo é que há uma maior probabilidade de um revestimento transitar de uma condição de degradação para a do nível seguinte. Em terceiro lugar, há interesse na determinação da probabilidade de ser atingido o fim da vida útil de um revestimento ao longo de um dado período de tempo e em função das características dos revestimentos.

Com esta informação, é possível utilizar o modelo para auxiliar a tomada de decisões informadas, relativamente à periodicidade a considerar para as ações de inspeção, de manutenção e de reparação, acompanhando a evolução da degradação ao longo do tempo de forma controlada (Chanter e Swallow, 2008).

### **1.3. Previsão da vida útil de elementos construtivos**

#### **1.3.1. Enquadramento da previsão da vida útil**

A monitorização do estado de degradação de um edifício e dos seus componentes é necessária para permitir o planeamento adequado e atempado das ações de manutenção, com vista a prolongar a vida útil desses elementos (Horner et al., 1997). Contudo, existe alguma subjetividade associada ao conceito de vida útil de um elemento construtivo ou material de construção e a quando é que esta atinge o seu fim, devido às diferentes expectativas de desempenho que os diferentes utilizadores têm para os edifícios. Além disso, deve ser considerada a variabilidade introduzida pelos diferentes tipos de material utilizados, diferentes cenários de operação do edifício e diferentes climas a que os edifícios estão expostos, no desempenho das suas funções (Nik et al., 2012). Para homogeneizar o conceito de vida útil, existem normas e outros documentos que o apresentam e definem formalmente. Um exemplo é a norma ISO 15686-1 (2011), que define o conceito de vida útil como “o período de tempo após a instalação, durante o qual um edifício ou os seus componentes cumprem ou excedem os requisitos de desempenho”.

Para além desta norma, existem outros documentos em diversos países, tais como o *Principal guide for service life planning of buildings*, no Japão, o *British guide to durability of building elements, products and components*, no Reino Unido, entre outros.

Com o passar do tempo, e à medida que as fachadas e restantes elementos exteriores são expostos às ações climáticas, o material inicia um processo de degradação. Este ocorre continuamente, iniciando-se imediatamente no instante em que o material é colocado em serviço (Hovde e Moser, 2004). De modo a ter modelos adequados para a modelação e análise da evolução da degradação, é preciso conhecer a sua taxa de variação ao longo do tempo, a partir da evolução real da condição dos elementos construtivos. Além disso, é imperativo considerar a evolução das leis e critérios aplicáveis na definição da vida útil a considerar para os elementos construtivos em estudo.

Para manter o nível de desempenho dos elementos construtivos acima do valor para o qual se atinge a vida útil, é necessário realizar intervenções, sejam elas ações de manutenção ou de reabilitação, as quais podem ter uma periodicidade fixa ou ser realizadas pontualmente, consoante o estado do edifício e o orçamento disponível para despender com as intervenções.

No contexto da durabilidade dos elementos construtivos, afirmar que um elemento atinge o fim da sua vida útil não significa que seja necessário retirá-lo imediatamente de serviço. Gaspar (2009) indica três modos de atingir o fim da vida útil: **i)** por um lado, pode ocorrer a obsolescência funcional ou estética, quando o elemento deixa de cumprir os requisitos de desempenho para os quais foi dimensionado, ou quando deixa de respeitar os requisitos estéticos; **ii)** pode ocorrer a perda da rentabilidade económica, o que significa que as ações de manutenção ou reparação incorrem em custos superiores aos benefícios

retirados da operação do edifício; **iii**) finalmente, pode ocorrer o fim da vida útil física, por via da ação continuada de mecanismos de degradação sobre o elemento, o que pode levar a que a segurança da construção seja colocada em causa.

Na Figura 1.1, é possível observar a evolução contínua da degradação de um elemento ao longo do tempo, até ser atingido o fim da sua vida útil, quando o limite mínimo de desempenho é ultrapassado. Neste caso, o desempenho estético é o fator condicionante, sendo que a sua perda ocorre antes de ocorrer a degradação da funcionalidade do elemento. O nível mínimo de segurança é superior ao nível mínimo de desempenho estético e funcional, o que significa que este indicador é o mais relevante para a durabilidade de um elemento construtivo.

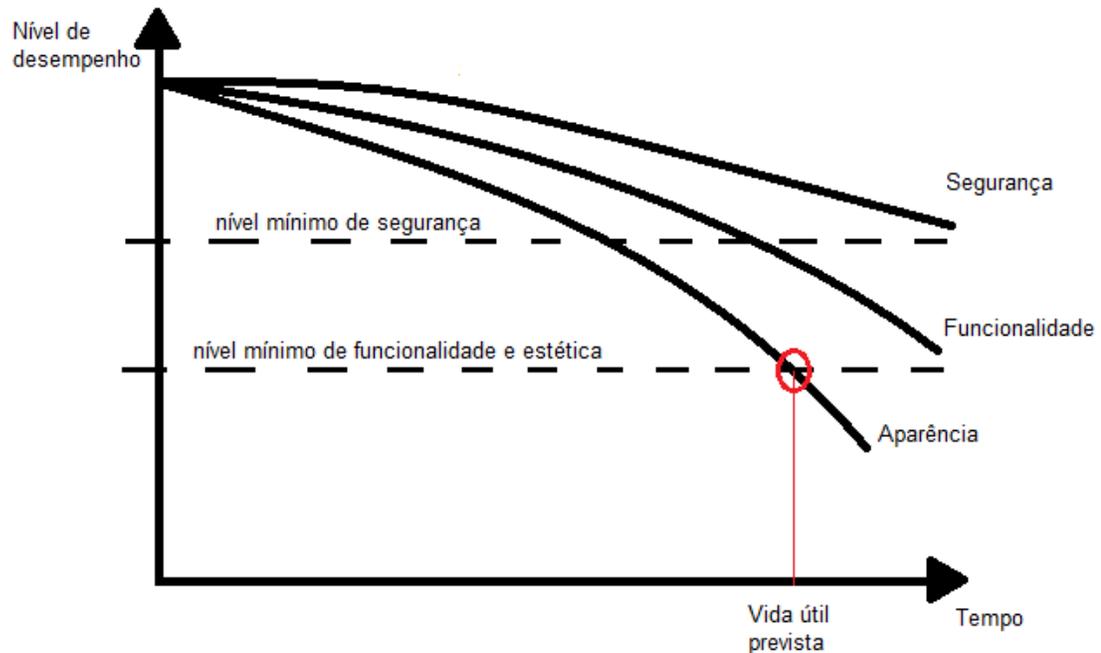


Figura 1.1- Evolução natural do desempenho dos elementos construtivos ao longo do tempo, até ser atingido o fim da vida útil (adaptado de Moser, 1999).

### 1.3.2. Métodos existentes

Tendo em consideração a importância da previsão da vida útil para a inspeção e manutenção das construções, existe literatura diversa sobre o tema. De um modo geral, os métodos considerados na previsão da vida útil dividem-se em: **i**) métodos determinísticos, os quais indicam valores determinísticos ou absolutos para a idade expectável em que é atingida a vida útil dos elementos construtivos; **ii**) métodos estocásticos ou probabilísticos, os quais têm em conta a influência de fatores aleatórios no comportamento dos materiais, dos elementos construtivos e das condições de utilização dos edifícios, apresentando valores da idade em que é máxima a probabilidade de ser atingido o fim da vida útil; **iii**) métodos de engenharia, os quais partem de metodologias determinísticas para estimar a vida útil dos elementos construtivos, permitindo posteriormente considerar o efeito da variabilidade inerente às condições reais de utilização, mas não sendo tão complexos como os métodos estocásticos.

Relativamente aos métodos **determinísticos**, estes têm como maior vantagem o facto de serem de aplicação bastante expedita, conduzindo a valores que podem ser utilizados para determinar se um dado elemento construtivo atingiu a vida útil. No entanto, estes métodos apresentam a desvantagem de serem demasiado simplistas, face a outras metodologias mais sofisticadas.

Os métodos gráfico e fatorial são dois exemplos de métodos determinísticos. No contexto da investigação previamente realizada para o sistema ETICS, ambos os métodos foram aplicados com sucesso e encontram-se documentados por Ximenes et al. (2015) e por Marques et al. (2018), respetivamente.

No caso dos métodos de **engenharia**, o facto de se recorrer a metodologias determinísticas como ponto de partida para a estimativa da degradação dos elementos construtivos constitui-se como uma vantagem, pois isto permite simplificar a elaboração dos modelos. Embora a variabilidade inerente à evolução da degradação seja considerada nestes modelos, não se consegue o mesmo grau aprofundado de inclusão da aleatoriedade do que com os métodos estocásticos. Não obstante, estes métodos apresentam um bom compromisso entre simplicidade de aplicação e aplicabilidade dos resultados obtidos a cenários realistas.

Relativamente à investigação existente para fachadas com o sistema ETICS, Tavares et al. (2020) aplicaram os métodos de regressão múltipla linear, redes neuronais artificiais e sistemas de lógica difusa à análise da evolução da degradação e determinação da idade para a qual se atinge o fim da vida útil de revestimentos por ETICS.

Por último, no caso dos métodos **estocásticos ou probabilísticos**, a sua maior vantagem é permitir a consideração do efeito da variabilidade dos processos de degradação na modelação da evolução da degradação dos elementos construtivos, possibilitando obter resultados o mais realistas possível. No entanto, estes métodos são de aplicação mais complexa do que os restantes, necessitando de um maior número de dados, estatisticamente representativos, para fornecer resultados que façam sentido do ponto de vista físico.

A presente investigação recorre à aplicação dos métodos estocásticos da regressão logística e das cadeias de Markov, para analisar a durabilidade e evolução da degradação de fachadas com sistemas ETICS, indicando também a gama de idades em que é máxima a probabilidade de ser atingido o fim da vida útil para fachadas com esta solução de revestimento térmico pelo exterior.

#### **1.4. Organização da dissertação**

O presente documento é composto por seis capítulos, referências bibliográficas e anexos. De seguida, procede-se à explicação resumida do seu conteúdo.

No Capítulo **1. Introdução**, é feita a apresentação do tema da presente dissertação, introduzido o conceito de vida útil, explicada a necessidade da sua previsão e são referidos alguns dos métodos existentes, os quais podem ser utilizados para efetuar essa previsão.

No Capítulo **2. ETICS: caracterização e principais anomalias**, é feito o enquadramento dos sistemas ETICS no domínio dos revestimentos de fachadas e são descritas as anomalias consideradas na investigação existente para este material.

No Capítulo **3. Trabalho de campo**, é feito o enquadramento do trabalho de campo no contexto

geral da dissertação, tendo em conta a metodologia utilizada na recolha de dados, a amostra de fachadas a considerar na análise da degradação dos revestimentos ETICS, e a subsequente aplicação dos métodos estocásticos.

No Capítulo **4. Modelos de degradação de revestimentos**, é apresentado o modelo considerado na análise de degradação de fachadas com sistemas ETICS, bem como a sua aplicação à amostra resultante do trabalho de campo. Adicionalmente, recorre-se ao método gráfico para obter as curvas da evolução da degradação em função da idade, características físicas e condições ambientais de exposição dos revestimentos das fachadas analisadas.

No Capítulo **5. Modelos estocásticos**, são apresentados os métodos estocásticos aplicados no contexto da investigação realizada, é feita a sua aplicação à amostra em estudo e são traçadas comparações entre os métodos usados, ou seja, a Regressão Logística e as Cadeias de Markov.

No Capítulo **6. Conclusão**, são apresentadas as conclusões retiradas da investigação realizada, fazendo o contraponto com as considerações iniciais apresentadas no presente capítulo. Adicionalmente, são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros na temática da previsão da vida útil de revestimentos, em particular, para o caso dos sistemas com ETICS.

Nas **Referências bibliográficas**, são listadas todas as fontes consultadas durante a investigação realizada.

Nos **Anexos**, encontram-se Figuras e Tabelas diversas, cujo propósito é complementar a informação apresentada no corpo do texto, permitindo uma melhor compreensão do tema.

## **2. ETICS: caracterização e principais anomalias**

### **2.1. Introdução**

No presente capítulo, é feito o enquadramento dos sistemas ETICS no domínio dos revestimentos de fachadas e são descritas as anomalias consideradas na investigação existente para este material.

Os revestimentos ETICS, *External Thermal Insulation Composite Systems*, são usados em vez dos revestimentos de reboco tradicionais, pois permitem diminuir a ação das pontes térmicas, contribuindo assim para uma melhoria do desempenho energético do edifício e para o conforto do ambiente interior (Collina e Lignola, 2010). Além disso, estes revestimentos permitem um desempenho estético equivalente aos rebocos tradicionais, pelo que a sua aplicação em fachadas resulta num acabamento semelhante ao conseguido com essa solução (Amaro et al., 2013).

No entanto, por se tratar de um elemento permanentemente exposto aos agentes de degradação ambientais, o revestimento exterior de um edifício degrada-se continuamente ao longo do tempo (Ximenes et al., 2015). Segundo Sulakatko et al. (2017), esta degradação é consequência: das anomalias do próprio revestimento, decorrentes da fase de aplicação e do material utilizado; das condições de exposição, impostas pela localização do edifício, e.g. da orientação das fachadas e proximidade a fontes de poluição; ações de origem humana; entre outros fatores.

### **2.2. Considerações gerais sobre revestimentos ETICS**

Os revestimentos ETICS são usados tanto na construção de edifícios novos, como na reabilitação de edifícios antigos. A escolha deste material deve-se, principalmente, ao seu melhor desempenho térmico, quando comparado com revestimentos de reboco tradicional (Malanho, 2011). Ao conferir um melhor desempenho térmico, quer em períodos de verão, a nível da proteção contra o calor proveniente do ambiente exterior, quer em períodos de inverno, diminuindo as perdas térmicas do interior do edifício para o exterior, este sistema contribui para uma melhoria da classe energética do edifício onde é aplicado, o que explica a sua seleção para ações de reabilitação, onde é necessário que os edifícios intervencionados passem a cumprir a regulamentação existente que, sendo mais moderna do que a que se encontrava em vigor aquando da construção do edifício, se apresenta tendencialmente mais exigente (Fernandes e Brito, 2012).

#### **2.2.1. Características do sistema**

Este sistema de revestimento exterior é composto por diversos elementos, cada um com funções específicas, para garantir o desempenho adequado do conjunto. De acordo com Marques et al. (2018), a composição mais comum para um revestimento tradicional de ETICS considera a existência de: um suporte, no qual será aplicado um primário de regularização; uma camada de isolamento, fixada ao suporte por via de fixadores mecânicos ou recorrendo a um produto de colagem; uma camada de base; uma armadura de reforço; uma camada de acabamento; e acessórios diversos, para compatibilizar o revestimento com a geometria da fachada do edifício. Uma vez que cada componente tem características

próprias, a ordem de aplicação dos mesmos é relevante para conseguir garantir o desempenho funcional pretendido para o conjunto. A Figura 2.1 apresenta uma descrição mais pormenorizada de cada um destes componentes, clarificando a sua finalidade e interação com os restantes.

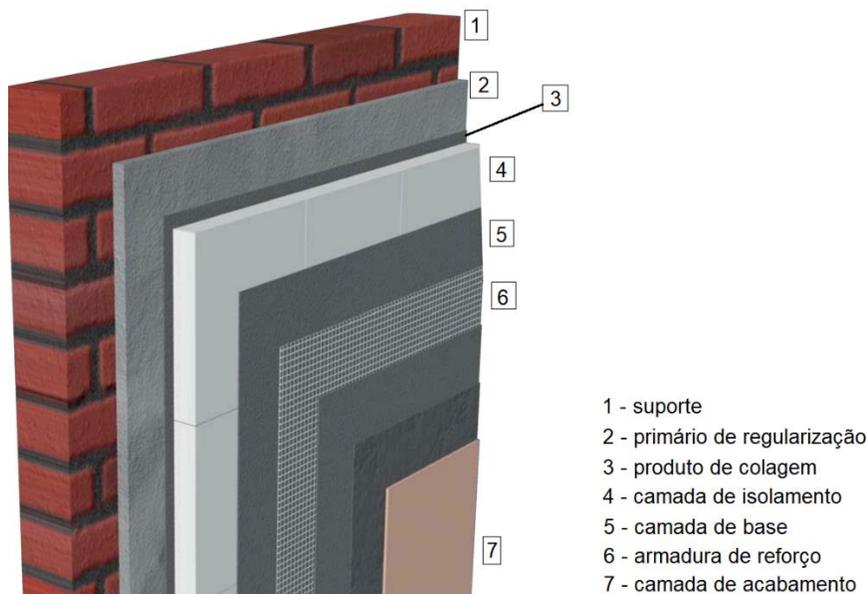


Figura 2.1 - Elementos típicos constituintes de um revestimento em ETICS (adaptado de APFAC (2018)).

O **suporte** é constituído pela superfície exterior da parede e tem a função de receber os restantes elementos do sistema. Tipicamente, este é constituído por elementos rígidos, de modo a conferir estabilidade ao conjunto. O suporte pode ser constituído por diversos tipos de material, nomeadamente paredes de alvenaria de tijolo, paredes de betão ou painéis pré-fabricados de betão. No caso da reabilitação de edifícios, o suporte pode ainda ser constituído por alvenaria com reboco de ligantes hidráulicos (Saraiva, 2011).

De modo que a aplicação das camadas exteriores ao suporte se processe adequadamente, é necessário recorrer a um **primário de regularização**, que tem como função colmatar as falhas do suporte, permitindo uma melhor aderência entre este e a camada de isolamento (APFAC, 2018).

Os sistemas ETICS podem ter dois tipos de fixação das placas ao suporte: fixadores mecânicos ou colagem. No primeiro caso, os **fixadores mecânicos** permitem a ligação entre as placas de material isolante e o suporte, recorrendo a um conjunto de anilha, parafuso e bucha. No entanto, este tipo de fixação pode não ser o mais indicado, pois introduz uma fragilidade mecânica nas placas da camada de isolamento, devido à necessidade de perfurá-las (Sulakatko et al., 2016). Por outro lado, a **fixação por colagem** recorre a argamassas, pastas ou pós que podem ser misturados com água, e que permitem a colagem integral das duas superfícies em contacto, conduzindo a uma melhor distribuição das tensões, o que diminui o impacto negativo no comportamento mecânico do conjunto (Fernandes e Brito, 2012), mas é menos redundante.

A **camada de isolamento** tem a principal função do sistema, isolar termicamente o interior do edifício. Para tal, é possível optar por instalar placas isolantes, sendo as mais comuns: o poliestireno expandido moldado (EPS); o poliestireno expandido extrudido (XPS); a lã mineral; e o aglomerado de cortiça expandida (ICB). De acordo com Tavares et al. (2020), destes, o EPS é o mais utilizado a nível nacional.

A **camada de base** serve para embeber a armadura de reforço, garantindo a sua ligação à camada de isolamento. Geralmente, a camada de base é conseguida através da utilização do próprio produto de colagem (Saraiva, 2011). Esta tem influência no comportamento higratérmico do revestimento, pois é o material imediatamente exterior à camada de isolamento. Além disso, tem também uma grande importância na resistência à fendilhação, por estar a envolver a armadura de reforço.

A **armadura de reforço** tem como objetivo fornecer resistência mecânica ao conjunto, quer ao nível da resistência a impactos externos, quer a nível da restrição das variações dimensionais da camada de base, com o intuito de controlar a fissuração do revestimento na zona das juntas entre placas de material isolante (APFAC, 2018).

A **camada de acabamento** desempenha a função estética do conjunto, garantindo ainda a estanqueidade do revestimento. Esta camada pode apresentar textura lisa ou rugosa e pode estar pintada de várias cores. No entanto, a escolha da cor da camada de acabamento deve ter em conta a exposição solar e o impacto da mesma nos ganhos térmicos do edifício (Saraiva, 2011).

Os **acessórios** têm como função principal compatibilizar os restantes elementos do sistema com o suporte, reforçando as zonas singulares, como, por exemplo, juntas, cantos, remates com janelas, zona de arranque do sistema. Estes acessórios podem ser: perfis de reforço; elementos para aplicar em juntas; e elementos de recobrimento (Ximenes et al., 2015).

Os componentes apresentados na Figura 2.1 dizem respeito ao caso dos revestimentos tradicionais de ETICS; no entanto, consoante as condições do meio envolvente à fachada onde se aplica este material e as condições de funcionamento, é possível recorrer a soluções diferentes. Marques et al. (2018) distinguem quatro tipos de revestimento: tradicional; reforçado, em que há uma camada adicional de armadura de reforço; resistente, quando a armadura de reforço é fabricada num material com maior resistência mecânica; cerâmico, em que a camada de acabamento é composta por ladrilhos cerâmicos.

## 2.2.2. Aplicação do revestimento

Os sistemas ETICS podem ser aplicados em suportes de alvenaria de pedra, de blocos, ou de tijolo, em betão armado e em suportes cerâmicos. Consoante o suporte existente, assim se pode realizar fixação ou colagem do revestimento, desde que se garanta que a parede não esteja sujeita a humidade ascensional, que colocaria em risco a eficácia do produto de colagem. O sistema apenas pode ser aplicado em suportes devidamente estabilizados e em situações de condições atmosféricas compatíveis com a secagem do produto de colagem (APFAC, 2018).

No caso da aplicação por colagem, devem ser adotadas regras de boa prática na aplicação da argamassa de colagem, para garantir uma camada uniforme, assegurando assim uma ligação adequada entre o suporte e a camada de isolamento (Malanho et al., 2010). Uma vez aplicada a camada de produto de colagem, é necessário pressionar a placa de material isolante contra o suporte, para assegurar a aderência entre as várias camadas do sistema.

No caso da aplicação por fixação mecânica, de acordo com a APFAC (2018), esta deve ser usada como complemento à aplicação por colagem, recorrendo a fixações na zona do perímetro e centro das placas do material da camada de isolamento.

### 2.2.3. Vantagens e desvantagens

A aplicação de revestimentos ETICS tem inerentes algumas vantagens em relação a outras soluções de revestimento de paredes exteriores, nomeadamente os rebocos tradicionais, sendo as seguintes as mais relevantes, segundo a APFAC (2018):

- redução das pontes térmicas, devido à camada isolante existente no lado exterior da parede, que leva a que o fluxo térmico a atravesse obrigatoriamente. Como esta camada tem um coeficiente de transmissão térmica menor do que o de um reboco tradicional, o efeito das pontes térmicas é significativamente reduzido;
- diminuição do risco de condensações, como consequência direta da menor prevalência de pontes térmicas;
- aumento da inércia térmica interior dos edifícios, contribuindo para melhoria do conforto térmico; no inverno, conserva o calor no interior e, no verão, mitiga a entrada de calor do exterior;
- consideráveis reduções nos consumos de energia, devido ao conforto térmico melhorado que confere ao interior das habitações;
- redução do peso das paredes e das cargas permanentes, pois o isolamento térmico é mais leve do que uma solução de parede dupla com reboco tradicional e isolamento na caixa de ar, e maior área interior, pois é colocado no lado exterior da parede;
- melhoria da impermeabilidade das paredes.

Como se pode constatar pela análise da lista acima, as vantagens estão relacionadas entre si, sendo que advêm, maioritariamente, da redução do fluxo térmico na envolvente do edifício.

No entanto, para além das vantagens, há também algumas desvantagens associadas ao sistema, sendo as seguintes consideradas as mais importantes por Saraiva (2011):

- necessidade de pormenorização bastante detalhada, para apoiar a fase de aplicação;
- elevada sensibilidade aos erros de aplicação, mesmo quando existe um projeto adequado;
- vulnerabilidade a vandalismo, a choques, a arrancamento por ação do vento;
- o custo inicial é consideravelmente mais alto do que o de uma solução de revestimento tradicional.

### 2.3. Anomalias

Qualquer material usado para cumprir a função de revestimento exterior de um edifício está sujeito à ocorrência de anomalias. No caso particular dos ETICS, estas anomalias podem ser estéticas ou mecânicas (Malanho, 2011). As primeiras relacionam-se com a ocorrência de manchas ou de alterações cromáticas na superfície do revestimento. As segundas advêm de falhas no desempenho mecânico do revestimento, devidas à perda de continuidade do material que, em paralelo com anomalias nas juntas

entre as placas da camada de isolamento, podem causar anomalias de perda de aderência, levando ao término da capacidade de isolamento do revestimento, por perda de material.

Tendo em conta esta distinção entre as duas tipologias de anomalias, foram desenvolvidos sistemas para classificá-las, em particular: Amaro et al. (2013), Ximenes et al. (2015) e Marques et al. (2018). Além disso, foi também desenvolvida a Tarefa 3 (Silva et al., 2017) 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)”, que se baseia nos trabalhos anteriores e cria uma metodologia para compatibilizar o sistema de inspeção e diagnóstico com os modelos de previsão de vida útil.

Como tal, apresenta-se, na Tabela 2.1, a correspondência entre os grupos de anomalias propostos por Ximenes et al. (2015) e o sistema de classificação de anomalias da Tarefa 3 (Silva et al., 2017).

*Tabela 2.1 - Grupos de anomalias, segundo Ximenes et al. (2015), e tipos de anomalias segundo Silva et al. (2017).*

<b>Grupo de anomalias</b>	<b>Tipo de anomalia</b>
<b>Manchas / alterações cromáticas</b>	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
<b>Em juntas</b>	A-C7 - empeno, inchamento, deformações e outras deficiências de planeza
<b>Perda de continuidade / integridade</b>	A-C2 - fissuração orientada
	A-C1 - fissuração mapeada
	A-D1 - defeitos nos remates
<b>Perda de aderência</b>	A-B4 - empolamento/abaulamento e bolhas
	A-C5 - desgaste ou destacamento do acabamento
	A-C10 - descolamento
	A-C8 - lacuna de material / perfuração

No trabalho da presente dissertação, as anomalias identificadas em campo foram classificadas de acordo com o sistema de Silva et al. (2017).

### 2.3.1. Anomalias de manchas/alterações cromáticas

As anomalias deste grupo são predominantemente estéticas e relacionam-se com mudanças de cor devido a diversas ações, tanto de origem biológica, no caso da biodeterioração, como mineral, no caso das eflorescências. Segundo Silva et al. (2017), embora estas anomalias não sejam excessivamente graves quando ocorrem isoladamente, se surgirem em simultâneo com fissuras, podem dar origem a infiltrações, potenciando uma degradação mais acelerada do revestimento.



Figura 2.2 - Anomalia A-A2 - humidade superficial.

Figura 2.3 - Anomalia A-B2 - vegetação parasitária.

Os tipos de anomalia pertencentes a este grupo são os seguintes (Silva et al., 2017):

- A-A2 - humidade superficial: o escoamento de água origina manchas, que permitem a acumulação de sujidade e manchas de escorrência, com proliferação de micro-organismos no ambiente húmido. É apresentado um exemplo desta anomalia na Figura 2.2;
- A-A3 - sujidade e acumulação de detritos: acumulação de partículas na superfície do revestimento, em função da rugosidade do acabamento, provenientes de atividades antropogénicas e da ação do vento;
- A-A4 - alterações cromáticas: manchas que surgem no revestimento, sob a forma de alteração da coloração, fruto da ação solar, de oxidação ou do envelhecimento do material;
- A-B1 - biodeterioração / colonização biológica: acumulação de micro-organismos, formando manchas na presença de humidade e da radiação UV, que potenciam o desenvolvimento de diferentes micro-organismos;
- A-B2 - vegetação parasitária: fixação de plantas de pequeno porte em fissuras ou outras discontinuidades do sistema. A sua permanência prolongada pode causar danos mecânicos no revestimento, à medida que as raízes das plantas crescem. Na Figura 2.3, é possível observar uma fachada afetada por este tipo de anomalia;
- A-B3 - eflorescências / criptoflorescências e carbonatação: cristalização de sais provenientes do interior do revestimento, transportados por água, que pode ter origem em ascensão capilar, infiltrações ou água constituinte da argamassa. A deposição dos sais pode causar perda de aderência entre camadas, devido à variação volumétrica dos cristais durante o processo de cristalização.

### 2.3.2. Anomalias em juntas

As anomalias deste grupo são aquelas que ocorrem especificamente nas juntas entre placas (Ximenes et al., 2013), as quais podem permitir a entrada de água e conseqüente degradação do revestimento.



*Figura 2.4 - Anomalia A-C7 - empeno, inchamento, deformações e outras deficiências de planeza.*

Este grupo apenas tem um tipo de anomalia, segundo Silva et al. (2017):

- A-C7 - empeno, inchamento, deformações e outras deficiências de planeza (Figura 2.4): as alterações da forma das placas, seja por deformações impostas pelo suporte ou por via de um choque, levam ao aparecimento de danos nas juntas entre as placas, o que pode potenciar outros problemas, nomeadamente aqueles relacionados com a penetração de água e futuro dano das camadas interiores do sistema.

### 2.3.3. Anomalias de perda de continuidade/integridade

As anomalias deste grupo são as mais graves, em conjunto com as de perda de aderência, pois suscitam danos mecânicos no material, o que pode comprometer a segurança do mesmo, para além de comprometer o adequado desempenho de isolamento térmico do conjunto (Amaro et al., 2013).

Segundo Silva et al. (2017), os tipos de anomalia pertencentes a este grupo são os seguintes:

- A-C1 - fissuração mapeada: este tipo de fissura é distribuído ao longo do revestimento, sem orientação preferencial. Tipicamente, estas fissuras resultam de uma armadura de reforço insuficiente, em que o revestimento é submetido à radiação solar ao longo do tempo, ocorrendo movimentos térmicos do suporte, incompatíveis com as características da camada de acabamento;
- A-C2 - fissuração orientada: por oposição, este padrão de fissuração segue linhas demarcadas, tipicamente relacionadas com movimentos estruturais do suporte, os quais ultrapassam o limite admissível da camada de acabamento. Na Figura 2.5, é apresentada uma fachada em que este tipo de anomalia se manifesta, por meio de uma zona de fissuração orientada horizontal e outra de fissuração orientada vertical;
- A-D1 - defeitos nos remates: resultantes de erros de execução ou de choques com os remates do sistema. Tendencialmente, ocorrem nas cantoneiras metálicas, nos remates do revestimento.



*Figura 2.5 - Anomalia A-C2 - fissuração orientada.*

#### 2.3.4. Anomalias de perda de aderência

As anomalias deste grupo podem ter consequências graves, pois uma falha deste tipo implica perda de material (Ximenes et al., 2015), o que pode ser extremamente perigoso, por exemplo, no caso de uma fachada elevada, da qual se soltem painéis, que coloquem em risco os utilizadores e transeuntes.

Por último, de acordo com Silva et al. (2017), os tipos de anomalia pertencentes a este grupo:

- A-B4 - empolamento / abaulamento e bolhas: a infiltração de humidade na camada de acabamento do revestimento conduz ao aparecimento de bolhas e empolamento da camada, o que potencia outras anomalias;
- A-C5 - desgaste ou destacamento do acabamento: devido ao desgaste das camadas do revestimento, ocorre o destacamento pontual do mesmo, podendo causar danos materiais ou humanos aquando da queda;
- A-C8 - lacuna de material / perfuração: ocorrem devido a choques de objetos externos com a camada de acabamento do sistema, sendo que comprometem a proteção contra a entrada de água. A Figura 2.6 mostra o exemplo de uma fachada em que este tipo de anomalia se manifesta;



*Figura 2.6 - Anomalia A-C8 - lacuna de material / perfuração.*

- A-C10 - descolamento: ocorre quando o produto de colagem não é eficaz, sendo que pode ter localização pontual, ou ocorrer ao longo de grandes áreas de fachada.

### 2.3.5. Causas prováveis

Embora as causas das anomalias estejam bem documentadas, é difícil determinar com certeza quais os fatores que desencadearam cada anomalia. Amaro et al. (2013) separam as causas em três grupos, na fase inicial da vida do elemento construtivo: derivadas da seleção inadequada dos materiais de construção; derivadas da conceção do sistema; derivadas da execução do sistema. A estas causas, Tavares (2018), citando Marques (2016), adiciona as seguintes, que ocorrem durante a fase de serviço: ação ambiental da envolvente do edifício; características de utilização e manutenção do edifício.

Relativamente às anomalias causadas pela seleção dos materiais de construção, estas manifestam-se sob a forma de defeitos de planeza, maior propensão para o aparecimento de fendas ou outras interrupções do material e dificuldade em manter as camadas adequadamente coladas (Amaro et al., 2013).

No caso das anomalias derivadas da conceção do sistema, estas decorrem da má pormenorização dos elementos singulares da fachada ou do fraco nível de detalhe da pormenorização na zona junto ao solo, ficando a fachada submetida a salpicos da água da chuva ou a humidade ascensional (Amaro et al., 2013).

As anomalias decorrentes da execução do sistema incidem em particular sobre aspetos de aplicação deficiente do sistema, seja por técnica desadequada, seja por material danificado, ou ainda por desrespeito pelas especificações do projetista e pelas especificações do fabricante (Amaro et al., 2013).

No que diz respeito às anomalias causadas pela ação ambiental da envolvente do edifício, segundo Tavares (2018), salientam-se como principais as seguintes: ação da água, proveniente de chuva ou infiltrações; ação da radiação solar, que provoca descoloração e desgaste da camada de acabamento; ação da temperatura, que se manifesta sob a forma de tensões que provocam rotura de algumas superfícies, tensões essas geradas por gradientes térmicos; ação do vento, que contribui para o transporte de partículas para a camada de acabamento e que pode provocar dano se houver demasiada sucção.

Finalmente, segundo Tavares et al. (2020), as anomalias causadas pelas características do edifício prendem-se, em particular, com as características da zona envolvente do edifício, ou seja, se é uma zona urbana, industrial, marítima ou rural; com a orientação das fachadas, devido à exposição solar diferenciada e ao seu impacto na acumulação de humidade ou adequada secagem das fachadas; com as condições de utilização e manutenção que influenciam o processo natural de degradação destes sistemas.

Tendo em conta todas as causas possíveis apresentadas, convém salientar que a presente dissertação apenas tem em conta as causas que estão relacionadas com a envolvente ambiental do edifício e as que estão diretamente relacionadas com as características do próprio edifício, pois são aquelas que permitem fazer uma análise contínua da degradação ao longo do tempo (isto é, que são modeláveis nos modelos de previsão da vida útil propostos).

## 2.4. Conclusões

Os revestimentos ETICS apresentam-se como uma solução de revestimento térmico bastante competitiva, fruto da versatilidade de aplicações em que é possível recorrer a esta tecnologia, desde a reabilitação de construções existentes, à construção nova. Esta versatilidade é conferida pelas

características apresentadas acima, ao nível dos elementos constituintes e ao nível das vantagens face a soluções tradicionais. No entanto, para que se verifique um elevado desempenho do revestimento, é fundamental garantir condições adequadas de aplicação do mesmo e o seu correto dimensionamento, nomeadamente a espessura das placas da camada de isolamento, que é a principal responsável pelo desempenho térmico, e na compatibilidade com o suporte disponível, no caso da adoção do sistema para uma intervenção de reabilitação.

Além do dimensionamento, também a manutenção periódica do sistema é importante, pois permite prolongar a vida útil do mesmo. Uma manutenção inexistente ou inadequada deixa o revestimento vulnerável à ação dos agentes atmosféricos, acelerando o processo de degradação, o que conduz ao aumento de custos relacionados com a reparação da fachada, após atingido o fim de vida útil do revestimento, altura em que é necessário proceder à substituição do material degradado, substituição essa que é maioritariamente localizada, embora possa ser total em casos de degradação generalizada do sistema.

### 3. Trabalho de campo

#### 3.1. Introdução

No presente capítulo, é feito o enquadramento do trabalho de campo no contexto geral da dissertação, tendo em conta a metodologia utilizada na recolha de dados, a amostra de fachadas a considerar na análise da degradação dos ETICS, feita no Capítulo 4, e a subsequente aplicação dos métodos estocásticos, no Capítulo 5.

Para efetuar uma adequada modelação da evolução da degradação dos revestimentos ETICS, é necessário recolher dados fiáveis, sendo, para isso, relevante garantir a aplicação correta das técnicas de inspeção existentes (Flores-Colen et al., 2010).

Tendo isso em consideração, foi efetuada uma campanha de inspeções a diversos edifícios, distribuídos por Portugal Continental, recorrendo a inspeções visuais às suas fachadas. Para suportar a recolha dos dados a ser posteriormente tratados, foram feitas medições geométricas, registadas evidências fotográficas e preenchidas fichas de inspeção e diagnóstico, conforme explicado em maior detalhe ao longo do presente capítulo.

Para facilitar a organização dos dados recolhidos, bem como para possibilitar a análise do incremento da amostra ocorrido na presente dissertação, face à amostra existente em trabalhos anteriores (Amaro et al., 2014; Ximenes et al., 2015; Marques et al., 2018; Tavares et al., 2020), a amostra final é decomposta nas componentes de: amostra inicial, ou seja, aquela que existia previamente, e amostra adicional - aquela que resulta do trabalho de campo realizado nesta dissertação.

#### 3.2. Objetivos do trabalho de campo

O trabalho de campo tem como objetivo principal a obtenção de dados, necessários para a análise da evolução da degradação dos revestimentos em ETICS e poder prosseguir com a aplicação dos métodos estocásticos.

As três principais etapas a considerar na fase de trabalho de campo são: **preparação**, **execução** e **processamento dos dados**. Ao nível da **preparação**, de modo a perceber quais os edifícios a inspeccionar, foram recolhidos dados na investigação prévia sobre edifícios, relativamente aos quais fosse conhecida, ou a data da aplicação de revestimentos em ETICS, ou a última intervenção sobre as fachadas com este material. Também foram contactadas diversas empresas, que aplicam esta solução de isolamento térmico pelo exterior. Tendo em conta a representatividade da amostra inicial, foram selecionados os edifícios que permitiam complementar a amostra adicional. Ao nível da **execução**, foram feitas visitas aos edifícios selecionados, para recolha dos dados necessários. Ao nível do **processamento**, foi calculada a representatividade da amostra adicional, para perceber a utilidade dos dados recolhidos em campo e permitir ignorar as fachadas que não conduziram a ganhos de representatividade da amostra.

De acordo com Ximenes et al. (2015), apenas se considera as fachadas submetidas a uma degradação natural e não aquelas submetidas a acidentes ou fenómenos de degradação cuja evolução ao

longo do tempo não apresente variação, ou seja, não modeláveis do ponto de vista da evolução da degradação (por exemplo, ações de vandalismo).

### **3.3. Metodologia de investigação**

A metodologia de investigação adotada relaciona-se com as diversas fases do trabalho de campo previamente mencionadas. Mais concretamente, tendo em conta a fase de execução, foram realizadas inspeções visuais, para avaliar detalhadamente o estado de degradação de cada fachada, registando os dados levantados numa ficha de inspeção (apresentada na secção 3.3.1.), fazendo um desenho representativo das dimensões da fachada e anomalias detetadas e tirando fotografias das mesmas, de modo a preparar um suporte gráfico para aplicação da metodologia geral de degradação de fachadas, cuja explicação é um dos objetivos do Capítulo 4. Foram tiradas fotografias com uma perspetiva o mais perpendicular possível ao plano da fachada, minimizando a distorção das imagens e facilitando o seu tratamento.

Relativamente à fase de **processamento dos dados**, uma vez estando as fichas de inspeção preenchidas com todas as informações de cada fachada, é possível comparar os dados da amostra inicial com os da amostra final, para perceber qual a melhoria da cobertura das características a estudar e dos níveis de degradação das anomalias, apresentados na secção 3.3.2. Por um lado, as características de cada fachada dependem dos seus atributos físicos e das condições do meio envolvente (Amaro et al., 2013). Conforme Ximenes et al. (2015) referem, os níveis de degradação são definidos por comparação com imagens de referência para cada tipo de anomalia, em função da sua extensão e gravidade.

#### **3.3.1. Ficha de inspeção**

A ficha de inspeção tem como propósito organizar e homogeneizar a informação recolhida sobre os edifícios inspecionados e sobre as suas fachadas, de modo a facilitar o posterior tratamento dos dados (Galbusera et al., 2014). A ficha é constituída por duas partes: a primeira, que contém a informação sobre o edifício, seus elementos e materiais constituintes, a manutenção realizada, o meio envolvente e as condições de inspeção; a segunda, que contém informação sobre a presença de anomalias nos diferentes grupos considerados, seu nível de degradação e respetiva área afetada.

Esta ficha de inspeção teve origem na Tarefa 3 (Silva et al., 2017), referida no Capítulo 2, onde é desenvolvida uma metodologia de compatibilização entre o sistema de inspeção e diagnóstico (Amaro et al., 2013) e os modelos de previsão de vida útil (Ximenes et al., 2015).

A ficha de inspeção e diagnóstico é apresentada no Anexo I, onde é possível ver todos os campos a preencher no decorrer duma inspeção.

#### **3.3.2. Classificação das anomalias e níveis de degradação**

A classificação das anomalias é feita tendo em conta os grupos, e respetivos tipos de anomalia, que foram apresentados em 2.3., sendo a determinação do seu nível de degradação realizada por comparação com

os exemplos de referência propostos por Ximenes et al. (2015), sistematizados na Tarefa 3 (Silva et al., 2017) e apresentados de seguida, para cada grupo de anomalias considerado no decurso da presente investigação.

Relativamente aos níveis de degradação, Ximenes et al. (2015), basearam-se em Gaspar (2002) e em Gaspar e Brito (2005b), para aplicar um modelo de classificação das anomalias, tendo sido definida a existência de cinco níveis de degradação, começando no Nível 0 (zero) e terminando no Nível 4 (quatro), sendo que a intensidade da degradação é tanto mais significativa quanto mais alto for o nível. Além disso, segundo Marques et al. (2018), admite-se, por simplificação, que as anomalias são independentes entre si, ou seja, a ocorrência duma anomalia não depende da ocorrência doutras anomalias.

### 3.3.2.1. Anomalias de manchas / alterações cromáticas

As anomalias deste grupo são as menos agressivas para o revestimento (Tavares et al., 2020), ou seja, são as que, por si só, não conduzem ao fim da vida útil dos ETICS. Não obstante, são importantes para a adequada análise da condição de degradação dos revestimentos. A Tabela 3.1 apresenta a correspondência entre a intensidade das alterações e o nível de degradação a considerar para as anomalias deste grupo.

*Tabela 3.1 - Níveis de degradação para anomalias do tipo de manchas ou alterações cromáticas (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018)*

Níveis de degradação	Caracterização das anomalias	Intensidade das alterações
<b>Nível 0</b>	Não apresenta degradação visível	Não apresenta degradação visível
<b>Nível 1</b>	Sujidade e acumulação de detritos Humidade superficial Alterações cromáticas	Ligeira ou alterações pouco perceptíveis
<b>Nível 2</b>	Humidade superficial Alterações cromáticas	Moderada ou bastante perceptível
	Eflorescências / criptoflorescências Biodeterioração / colonização biológica Vegetação parasitária	Ligeira ou alterações pouco perceptíveis
<b>Nível 3</b>	Humidade superficial	Elevada ou alterações pronunciadas
	Eflorescências / criptoflorescências Biodeterioração / colonização biológica Vegetação parasitária	Moderada ou bastante perceptível
<b>Nível 4</b>	Humidade superficial	Muito elevada ou alterações muito pronunciadas
	Biodeterioração / colonização biológica Vegetação parasitária	Elevada ou alterações pronunciadas

### 3.3.2.2. Anomalias em juntas

À semelhança do referido em 2.3.2., as anomalias em juntas podem permitir a entrada de água no sistema, potenciando a sua degradação (Gaspar, 2009). As anomalias em juntas condicionam o desempenho dos sistemas ETICS, comprometendo a sua capacidade de desempenho a nível da estanqueidade do revestimento. A Tabela 3.2 apresenta os níveis de degradação a considerar para estas anomalias, tendo em conta a intensidade das alterações apresentadas.

Tabela 3.2 - Níveis de degradação para anomalias em juntas (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018)

Níveis de degradação	Caracterização das anomalias	Intensidade das alterações
Nível 0	Não apresenta degradação visível	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

### 3.3.2.3. Anomalias de perda de continuidade/integridade

As anomalias de perda de continuidade ou integridade do revestimento comprometem o desempenho dos sistemas ETICS, promovendo a penetração de água no revestimento e no suporte. Estas anomalias têm um impacto mais pronunciado na perda de desempenho dos sistemas, podendo conduzir, por si só, ao fim da sua vida útil. Na Tabela 3.3, é possível estabelecer a comparação entre a intensidade das alterações, a abertura de fendas e o nível de degradação das anomalias de perda de continuidade/integridade.

Tabela 3.3 - Níveis de degradação para anomalias de perda de continuidade / integridade (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018)

Níveis de degradação	Caracterização das anomalias	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

### 3.3.2.4. Anomalias de perda de aderência

Por último, segundo Tavares et al. (2020), as anomalias de perda de aderência resultam do desgaste precoce das camadas do revestimento, conduzindo a deformações do mesmo. Na Tabela 3.4, é possível estabelecer a relação entre a intensidade das alterações e o nível de degradação das anomalias de perda de aderência.

Tabela 3.4 - Níveis de degradação para anomalias de perda de aderência (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018)

Níveis de degradação	Caracterização das anomalias	Intensidade das alterações
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)

### 3.4. Análise da amostra inicial

#### 3.4.1. Caracterização da amostra inicial

A amostra inicial considerada nesta investigação provém de diversas origens: as fachadas inspecionadas previamente por Ximenes et al. (2015), posteriormente incrementadas por Marques et al. (2018) e, por último, por Tavares et al. (2020). As fachadas inspecionadas no âmbito desta dissertação constituem a amostra adicional. A união das duas amostras constitui a amostra final, ou seja, aquela que é utilizada para analisar a evolução da degradação e permitir aplicar os métodos estocásticos (análises que são apresentadas nos Capítulos 4 e 5 da presente dissertação).

A amostra inspecionada por Tavares et al. (2020) foi tomada como amostra inicial no âmbito do trabalho da presente dissertação. Assim, são consideradas 364 fachadas constituintes dessa amostra. Os edifícios que foram inspecionados localizam-se maioritariamente na zona Norte do país e na área metropolitana de Lisboa. A sua maioria situa-se em zonas urbanas, com maior representatividade de utilização para habitação ou para serviços. A classe de idades com maior número de fachadas é a dos cinco aos nove anos de idade. As anomalias mais frequentemente detetadas nessa amostra são do tipo de manchas ou alterações visuais ou estéticas.

Segundo Silva et al. (2017), para a adequada caracterização de uma fachada, é definido um conjunto de atributos a considerar. Estes dividem-se em dois grupos: de um lado, as características da fachada e do próprio revestimento; e do outro, as condições do meio envolvente da fachada. Relativamente às características da fachada, considera-se: a **idade** da fachada; o **tipo de revestimento**; a **cor do acabamento**; o tipo de **remate inferior**; e a **textura** do acabamento. Relativamente às características do meio envolvente, considera-se: a **orientação** das fachadas; a **proximidade do mar**; a **exposição a agentes poluentes**; a exposição à **humidade**; e a **ação combinada da chuva e do vento**.

O levantamento destes atributos é importante, pois, de acordo com Sulakatko et al. (2015), permitem despistar se as condições de construção da fachada se relacionam com as anomalias detetadas devido a erros ocorridos durante a fase de conceção. De modo equivalente, as condições do meio envolvente podem ser usadas para relacionar o nível de degradação da fachada com o tipo de ambiente em que esta se situa, explicando casos em que a degradação seja demasiado pronunciada, ao fim de poucos anos de exposição a um determinado conjunto de agentes externos (Brito et al., 2012). Seguindo este raciocínio, é possível imaginar dois revestimentos com características exatamente iguais, mas que

sofrem uma evolução do nível de degradação muito distinta entre ambos, devido à influência particular das condições de exposição.

Relativamente à **idade das fachadas**, na análise realizada, opta-se por dividir este atributo em classes de cinco anos. Esta divisão permite a discretização duma grandeza contínua, o tempo, em intervalos de igual duração, sendo possível analisar o contributo da idade para a degradação da fachada (Silva, 2015), mas recorrendo a um menor número de classes de idade, face ao que aconteceria caso fossem considerados intervalos anuais. A idade corresponde, no presente estudo, ao tempo decorrido desde a construção ou desde a última intervenção de manutenção, até ao instante da inspeção. A Figura 3.1 apresenta a distribuição deste atributo, tendo em conta a amostra inicial. Por análise desse histograma, comprova-se que a classe com maior representatividade é a dos cinco aos nove anos e a classe com menor representatividade é a dos 20 aos 24 anos.

No caso da **proximidade das fachadas ao mar**, existem duas classes para o atributo: um caso para distâncias inferiores a cinco quilómetros, em que se considera que a fachada está próxima do mar e é suscetível à ação dos sais que possam ser transportados pela brisa marítima (Pires et al., 2015), e outro caso para distâncias superiores a cinco quilómetros, em que a fachada já está suficientemente longe do mar para que a ação desses sais seja pouco relevante no contexto da degradação da fachada. A Figura 3.2 apresenta a distribuição das fachadas por essas duas classes, onde se nota que a maioria das fachadas da amostra inicial se encontra a uma distância superior a cinco quilómetros do mar.



*Figura 3.1 - Histograma com a distribuição da idade das fachadas da amostra inicial.*

*Figura 3.2 - Histograma com a distribuição da proximidade ao mar das fachadas da amostra inicial.*

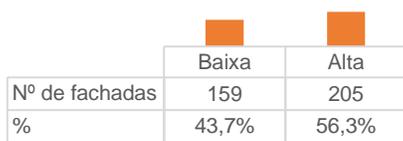
Quanto à **orientação das fachadas**, esta pode tomar os valores dos pontos cardeais (N, S, E, W) e dos pontos colaterais (NE, NW, SE, SW). É expectável que uma fachada orientada a norte tenha maior propensão para sofrer degradação devida à presença de água, pois há uma reduzida exposição solar (Flores-Colen et al., 2008). O oposto também se verifica, uma vez que uma fachada orientada a sul estará suscetível ao desgaste da sua cor, devido a uma maior incidência da luz solar (Gaspar, 2009). A Figura 3.3 apresenta a distribuição deste atributo, tendo em conta a amostra inicial. Por análise do histograma, verifica-se que a classe com maior representatividade é a das fachadas orientadas a oeste e a classe com menor representatividade é a das fachadas orientadas a nordeste.



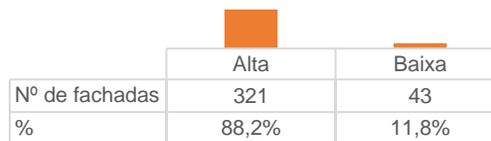
Figura 3.3 - Histograma com a distribuição da orientação das fachadas da amostra inicial.

Relativamente à **exposição à humidade**, são consideradas duas classes: exposição baixa ou exposição alta. No contexto da análise da durabilidade dos revestimentos em ETICS, de acordo com Tavares et al. (2020), a presença de humidade é altamente indesejável, pois a água é um fator que agrava a degradação dos revestimentos, por interação com as anomalias presentes, potenciando o seu efeito. Na Figura 3.4, é possível ver a distribuição das fachadas da amostra inicial pelas duas classes deste atributo. A maioria das fachadas encontra-se sujeita a uma exposição alta à humidade.

No caso da análise da **ação combinada da chuva e do vento**, são consideradas duas classes: alta ou baixa. À semelhança do caso da exposição à humidade, também a presença de chuva é indesejável, sendo esta ainda mais danosa quando transportada pelo vento, o que pode potenciar a sua incidência na fachada (Galbusera et al., 2014). Na Figura 3.5, é possível observar a distribuição das fachadas da amostra inicial pelas classes que a ação combinada da chuva e do vento pode assumir. A grande maioria das fachadas encontra-se exposta a uma ação alta da chuva e do vento.



**Exposição à humidade**



**Ação combinada da chuva e do vento**

Figura 3.4 - Histograma com a distribuição da exposição à humidade das fachadas da amostra inicial.

Figura 3.5 - Histograma com a distribuição da ação combinada da chuva e do vento sobre fachadas da amostra inicial.

A **exposição da fachada a agentes poluentes** é dividida em duas classes: baixa ou alta. A classificação deste atributo depende da proximidade do edifício de zonas urbanas ou industriais, em que haja uma maior concentração de poluentes atmosféricos, que têm potencial para se fixar aos revestimentos, contribuindo para a sua degradação prematura (Tavares et al., 2020). A Figura 3.6 apresenta a distribuição das fachadas pelas duas classes consideradas, sendo que há exatamente o mesmo número de fachadas em cada uma delas.

O **tipo de revestimento** que é aplicado na fachada pode ser de três tipos: tradicional, reforçado ou cerâmico. Segundo Marques et al. (2018), o primeiro tipo é o mais comumente aplicado, pela sua simplicidade face aos outros dois; o revestimento reforçado é aplicado maioritariamente em edifícios de serviços, tais como escolas ou hospitais, em que haja uma utilização intensiva das zonas de acesso exterior (Ximenes et al., 2015),

ou em que as fachadas possam estar suscetíveis a vandalismo; o revestimento cerâmico é utilizado por questões estéticas, sendo de mais difícil aplicação do que o tradicional (Marques et al., 2018) e, deste modo, menos frequente. Conforme se pode constatar na Figura 3.7, as fachadas com revestimento tradicional são a larga maioria, sendo as de revestimento cerâmico as menos representadas na amostra inicial.

	Baixa	Alta
Nº de fachadas	182	182
%	50,0%	50,0%

**Exposição aos agentes poluentes**

	Tradicional	Reforçado	Cerâmico
Nº de fachadas	339	20	5
%	93,1%	5,5%	1,4%

**Tipo de revestimento**

*Figura 3.6 - Histograma com a distribuição da exposição aos agentes poluentes das fachadas da amostra inicial.*

*Figura 3.7 - Histograma com a distribuição do tipo de revestimento das fachadas da amostra inicial.*

Relativamente à **cor do acabamento** do revestimento, são consideradas três classes: cores escuras (por exemplo: cinzento, castanho-escuro), cores claras (por exemplo: amarelo, creme ou bege, rosa ou salmão) e, separadamente destas últimas, branco. Este parâmetro tem influência na degradação das fachadas devido à ação solar que, por sua vez, segundo Emídio et al. (2014), se relaciona com a orientação das fachadas. Uma fachada pintada com uma cor escura vai atingir maior temperatura do que uma fachada da classe das cores claras, o que origina fenómenos de expansão térmica (Barreira e Freitas, 2008), que se podem manifestar sob a forma de anomalias de perda de continuidade, levando ao surgimento de fendas no revestimento. A Figura 3.8 apresenta a distribuição das fachadas da amostra inicial pelas três classes consideradas para este atributo. As fachadas brancas são as mais frequentes, seguidas das fachadas de cores claras. Por último, as fachadas de cores escuras são as menos representadas nessa amostra.

A **textura do acabamento** do revestimento pode ser lisa ou rugosa. Embora seja possível considerar diferentes níveis de rugosidade, desde acabamentos pouco rugosos a muito rugosos, por simplicidade de análise, considera-se apenas a ocorrência ou não de rugosidade no acabamento, independentemente do seu nível. De acordo com Marques et al. (2018), este atributo tem influência, principalmente, no desempenho estético da fachada, uma vez que uma textura mais rugosa propicia a acumulação de detritos, causando anomalias de manchas ou alterações estéticas. Conforme se pode constatar na Figura 3.9, a maioria das fachadas da amostra inicial tem textura rugosa.

	Branco	Cores claras	Cores escuras
Nº de fachadas	179	116	69
%	49,2%	31,9%	19,0%

**Cor do revestimento**

	Liso	Rugoso
Nº de fachadas	49	315
%	13,5%	86,5%

**Textura do acabamento**

Figura 3.8 - Histograma com a distribuição das cores do revestimento das fachadas da amostra inicial.

Figura 3.9 - Histograma com a distribuição das texturas do acabamento das fachadas da amostra inicial.

No caso do **tipo de remate inferior do revestimento**, são consideradas três classes: duas principais, a do perfil de arranque elevado e a do soco, e uma terceira classe, denominada “outro”, para ter em consideração as fachadas cujo remate inferior seja dum tipo menos frequente. O remate inferior permite fazer a separação entre a zona inferior do revestimento e o material que exista abaixo deste, sendo um bom acabamento importante para proteger contra, por exemplo, fenómenos de ascensão capilar de humidade, que iriam degradar o revestimento (Gaspar, 2009). Na Figura 3.10, é apresentada a distribuição das fachadas pelas três classes consideradas, sendo que o soco é o tipo de remate inferior mais representado na amostra inicial e o perfil de arranque elevado o menos representado.



Figura 3.10 - Histograma com a distribuição dos tipos de remate inferior das fachadas da amostra inicial.

### 3.4.2. Caracterização das anomalias da amostra inicial

Uma vez apresentadas as características das fachadas da amostra inicial, torna-se relevante apresentar as anomalias detetadas nas mesmas, de modo a concluir a caracterização desta amostra. Assim, considerando o sistema classificativo de anomalias proposto por Ximenes et al. (2015), e previamente apresentado em 3.3.2., são apresentados alguns histogramas de resumo das anomalias identificadas na amostra de Tavares et al. (2020).

Na Figura 3.11, é possível observar a distribuição do número de fachadas afetadas por cada grupo de anomalias e, na Figura 3.12, com mais detalhe, apresenta-se o número de fachadas afetadas por cada tipo de anomalia. Adicionalmente, a Tabela 3.5 apresenta a nomenclatura a considerar para cada tipo de anomalia (Silva et al., 2017).

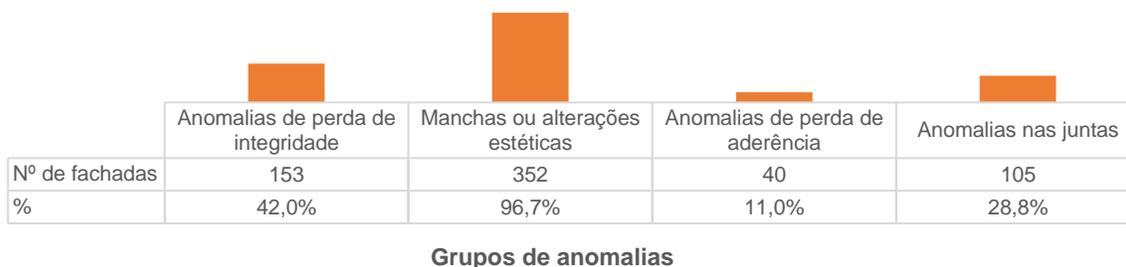


Figura 3.11 - Histograma com a distribuição dos grupos de anomalias nas fachadas da amostra inicial.

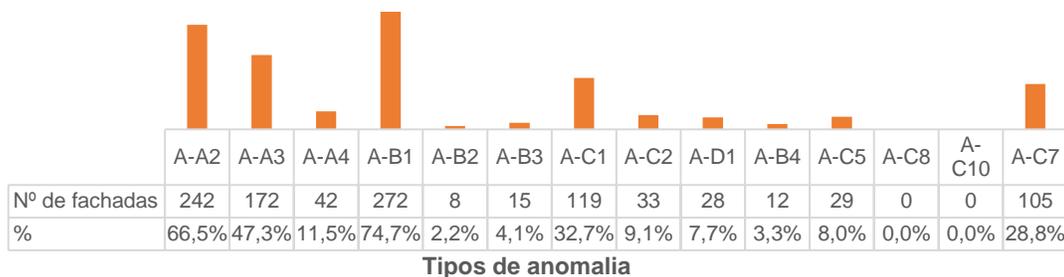


Figura 3.12 - Histograma com a distribuição dos tipos de anomalia nas fachadas da amostra inicial.

Tabela 3.5 - Pormenorização da Figura 3.12, relativamente à nomenclatura dos tipos de anomalias consideradas na investigação.

Código	A-A2	A-A3	A-A4	A-B1	A-B2	A-B3	A-C1	A-C2	A-D1	A-B4	A-C5	A-C8	A-C10	A-C7
Designação	Fissuração mapeada	Fissuração orientada	Defeitos nos remates	Sujidade e acumulação de detritos	Humidade superficial	Alterações cromáticas	Eflorescências / criptoflorescências	Biodegradação / colonização biológica	Vegetação parasitária	Empolamento /abaulamento e bolhas	Desgaste ou destacamento do acabamento	Descolamento	Lacuna de material / perfuração	Empeno, inchamento, deformações e outras deficiências de planeza

O grupo de anomalias mais frequente é o das manchas ou alterações estéticas e o menos frequente o da perda de aderência. Além disso, o tipo de anomalia mais frequente é a sujidade ou acumulação de detritos e o menos frequente é a humidade superficial. Há dois tipos de anomalia que não são representados na amostra de Tavares et al. (2020): o descolamento e a lacuna de material ou perfuração.

### 3.4.3. Identificação das oportunidades de melhoria da amostra inicial

De modo a dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos por Amaro et al. (2013), Ximenes et al. (2015), Marques et al. (2018) e Tavares et al. (2020), o trabalho de campo desenvolvido no decorrer da presente investigação procurou aumentar a amplitude da amostra. Para tal, foi necessário proceder à análise da amostra inicial, sendo identificadas as potenciais áreas de melhoria da representatividade das fachadas.

Para se considerar que um atributo tem adequada representatividade do comportamento numa fachada, a amostra a analisar tem de conter, no mínimo, cinco casos que o possuam (Galbusera, 2013). Assim, foi calculado o número de casos existentes nas classes que cada atributo pode assumir, segregando os resultados por classe de idade, que é o parâmetro para o qual se analisa a evolução da degradação da fachada.

Para a **orientação das fachadas**, a Tabela 3.6 apresenta a amostra existente e o número mínimo de casos adicionais a inspecionar, para garantir a representatividade da amostra. A classe dos cinco a nove anos apresenta cobertura adequada, mas a dos 20 a 24 anos necessita de 35 casos adicionais.

Tabela 3.6 - Número mínimo de casos adicionais para a orientação das fachadas.

Idade	Amostra existente									Número mínimo de casos adicionais									Soma
	Norte	Sul	Este	Oeste	Nordeste	Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Total	Norte	Sul	Este	Oeste	Nordeste	Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Total	
< 5 anos	7	7	6	4	4	3	1	2	34	0	0	0	5	5	5	5	5	25	59
5 a 9 anos	18	16	24	25	7	16	7	10	123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	123
10 a 14 anos	4	2	9	11	8	12	9	7	62	5	5	0	0	0	0	0	0	10	72
15 a 19 anos	26	17	20	22	4	2	2	2	95	0	0	0	0	5	5	5	5	20	115
20 a 24 anos	3	1	5	3	0	0	0	0	12	5	5	0	5	5	5	5	5	35	47
> 25 anos	1	1	3	3	5	8	9	8	38	5	5	5	5	0	0	0	0	20	58
<b>Soma</b>	59	44	67	68	28	41	28	29	364	15	15	5	15	15	15	15	15	110	474

Tabela 3.7 - Número mínimo de casos adicionais para a proximidade do mar das fachadas.

Idade	Amostra existente			Número mínimo de casos adicionais			Soma
	Inferior a 5 km	Superior a 5 km	Total	Inferior a 5 km	Superior a 5 km	Total	
< 5 anos	8	26	34	0	0	0	34
5 a 9 anos	43	80	123	0	0	0	123
10 a 14 anos	25	37	62	0	0	0	62
15 a 19 anos	23	72	95	0	0	0	95
20 a 24 anos	0	12	12	5	0	5	17
> 25 anos	38	0	38	0	5	5	43
<b>Soma</b>	137	227	364	5	5	10	374

No caso da **proximidade ao mar**, a Tabela 3.7 indica que apenas as classes de 20 a 24 e de mais de 25 anos necessitam de mais casos de estudo para garantir a representatividade da amostra.

Relativamente à exposição à humidade, por análise da Tabela 3.8, obtém-se os mesmos resultados do que no caso da proximidade ao mar.

Tabela 3.8 - Número mínimo de casos adicionais para a exposição à humidade das fachadas.

Idade	Amostra existente			Número mínimo de casos adicionais			Soma
	Baixa	Alta	Total	Baixa	Alta	Total	
< 5 anos	15	19	34	0	0	0	34
5 a 9 anos	68	55	123	0	0	0	123
10 a 14 anos	19	43	62	0	0	0	62
15 a 19 anos	53	42	95	0	0	0	95
20 a 24 anos	0	12	12	5	0	5	17
> 25 anos	4	34	38	5	0	5	43
<b>Soma</b>	159	205	364	10	0	10	374

De acordo com a Tabela 3.9, para a **ação combinada da chuva e do vento**, a classe dos cinco a nove anos é a única que assegura uma representatividade adequada, sendo que todas as outras necessitam de casos adicionais.

Tabela 3.9 - Número mínimo de casos adicionais para a ação da chuva-vento sobre as fachadas.

Idade	Amostra existente			Número mínimo de casos adicionais			Soma
	Alta	Baixa	Total	Alta	Baixa	Total	
< 5 anos	31	3	<b>34</b>	0	5	<b>5</b>	39
5 a 9 anos	90	33	<b>123</b>	0	0	<b>0</b>	123
10 a 14 anos	59	3	<b>62</b>	0	5	<b>5</b>	67
15 a 19 anos	95	0	<b>95</b>	0	5	<b>5</b>	100
20 a 24 anos	12	0	<b>12</b>	0	5	<b>5</b>	17
> 25 anos	34	4	<b>38</b>	0	5	<b>5</b>	43
<b>Soma</b>	321	43	<b>364</b>	0	25	<b>25</b>	389

Pela análise da Tabela 3.10, constata-se que a **exposição aos agentes poluentes** está razoavelmente bem representada, sendo poucos os casos adicionais necessários.

No que concerne ao **tipo de revestimento** das fachadas, pela Tabela 3.11, conclui-se que todas as classes de idade necessitam de casos adicionais.

Tabela 3.10 - Número mínimo de casos adicionais para a exposição aos agentes poluentes das fachadas.

Idade	Amostra existente			Número mínimo de casos adicionais			Soma
	Baixa	Alta	Total	Baixa	Alta	Total	
< 5 anos	0	34	<b>34</b>	5	0	<b>5</b>	39
5 a 9 anos	59	64	<b>123</b>	0	0	<b>0</b>	123
10 a 14 anos	4	58	<b>62</b>	5	0	<b>5</b>	67
15 a 19 anos	72	23	<b>95</b>	0	0	<b>0</b>	95
20 a 24 anos	9	3	<b>12</b>	0	5	<b>5</b>	17
> 25 anos	38	0	<b>38</b>	0	5	<b>5</b>	43
<b>Soma</b>	182	182	<b>364</b>	10	10	<b>20</b>	384

Relativamente à cor do revestimento, pela análise da Tabela 3.12, nota-se que são necessários relativamente poucos casos adicionais para garantir a representatividade da amostra.

Pela análise da Tabela 3.13, a textura do acabamento das fachadas está bastante bem representada, com necessidade de poucos casos de estudo adicionais.

Tabela 3.11 - Número mínimo de casos adicionais para os tipos de revestimento das fachadas.

Idade	Amostra existente				Número mínimo de casos adicionais				Soma
	Tradicional	Reforçado	Cerâmico	Total	Tradicional	Reforçado	Cerâmico	Total	
< 5 anos	34	0	0	<b>34</b>	0	5	5	<b>10</b>	44
5 a 9 anos	111	10	2	<b>123</b>	0	0	5	<b>5</b>	128
10 a 14 anos	59	0	3	<b>62</b>	0	5	5	<b>10</b>	72
15 a 19 anos	85	10	0	<b>95</b>	0	0	5	<b>5</b>	100
20 a 24 anos	12	0	0	<b>12</b>	0	5	5	<b>10</b>	22
> 25 anos	38	0	0	<b>38</b>	0	5	5	<b>10</b>	48
<b>Soma</b>	<b>339</b>	<b>20</b>	<b>5</b>	<b>364</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>414</b>

Tabela 3.12 - Número mínimo de casos adicionais para as cores do revestimento das fachadas.

Idade	Amostra existente				Número mínimo de casos adicionais				Soma
	Branco	Cores claras	Cores escuras	Total	Branco	Cores claras	Cores escuras	Total	
< 5 anos	20	12	2	<b>34</b>	0	0	5	<b>5</b>	39
5 a 9 anos	63	29	31	<b>123</b>	0	0	0	<b>0</b>	123
10 a 14 anos	14	45	3	<b>62</b>	0	0	5	<b>5</b>	67
15 a 19 anos	39	23	33	<b>95</b>	0	0	0	<b>0</b>	95
20 a 24 anos	9	3	0	<b>12</b>	0	5	5	<b>10</b>	22
> 25 anos	34	4	0	<b>38</b>	0	5	5	<b>10</b>	48
<b>Soma</b>	<b>179</b>	<b>116</b>	<b>69</b>	<b>364</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>394</b>

Tabela 3.13 - Número mínimo de casos adicionais para as texturas do acabamento das fachadas.

Idade	Amostra existente			Número mínimo de casos adicionais			Soma
	Liso	Rugoso	Total	Liso	Rugoso	Total	
< 5 anos	0	34	<b>34</b>	5	0	<b>5</b>	39
5 a 9 anos	23	100	<b>123</b>	0	0	<b>0</b>	123
10 a 14 anos	6	56	<b>62</b>	0	0	<b>0</b>	62
15 a 19 anos	20	75	<b>95</b>	0	0	<b>0</b>	95
20 a 24 anos	0	12	<b>12</b>	5	0	<b>5</b>	17
> 25 anos	0	38	<b>38</b>	5	0	<b>5</b>	43
<b>Soma</b>	<b>49</b>	<b>315</b>	<b>364</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>379</b>

Tabela 3.14 - Número mínimo de casos adicionais para os tipos de remate inferior das fachadas.

Idade	Amostra existente				Número mínimo de casos adicionais				Soma
	Perfil de arranque elevado	Lambri	Outro	Total	Perfil de arranque elevado	Lambri	Outro	Total	
< 5 anos	16	6	12	<b>34</b>	0	0	0	<b>0</b>	34
5 a 9 anos	40	35	48	<b>123</b>	0	0	0	<b>0</b>	123
10 a 14 anos	15	40	7	<b>62</b>	0	0	0	<b>0</b>	62
15 a 19 anos	3	53	39	<b>95</b>	5	0	0	<b>5</b>	100
20 a 24 anos	1	11	0	<b>12</b>	5	0	5	<b>10</b>	22
> 25 anos	0	34	4	<b>38</b>	5	0	5	<b>10</b>	48
<b>Soma</b>	<b>75</b>	<b>179</b>	<b>110</b>	<b>364</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>389</b>

Por outro lado, para melhorar a análise da influência do tipo de remate inferior na evolução da degradação duma fachada, conforme se constata na Tabela 3.14, é necessário recolher bastantes casos adicionais.

No Anexo II, é possível encontrar uma tabela com a síntese geral do que se apresenta nas Tabelas 3.6 a 3.14.

## **3.5. Análise da amostra final**

### **3.5.1. Constituição da amostra adicional**

O trabalho de campo realizado permitiu a obtenção da amostra adicional. Esta é constituída por 67 fachadas, com idades entre os 2 e os 26 anos, distribuídas ao longo do país, com especial incidência na zona Norte e na Área Metropolitana de Lisboa. As fachadas inspecionadas distribuem-se por todas as classes de idade, exceto a dos cinco a nove anos, para a qual não foi necessário recolher casos adicionais, pois já estava assegurada a sua representatividade na amostra de Tavares et al. (2020), e a dos 20 a 24 anos, para a qual não foi possível encontrar fachadas adicionais. Este facto pode ser facilmente explicado, considerando que a escolha desta solução de revestimento térmico pelo exterior é recente no território nacional (Amaro et al., 2013), quando comparado com a solução de reboco tradicional, pelo que revela-se difícil encontrar fachadas para as classes de idade mais elevada.

Para melhor compreender a cobertura da amostra adicional, apresenta-se, no Anexo III, uma tabela com a distribuição das fachadas da amostra adicional pelas diversas classes de idade e pelas diversas classes dos restantes atributos a considerar para a análise do comportamento das fachadas face à evolução da degradação.

### **3.5.2. Caracterização da amostra final**

Uma vez conhecida a amostra de Tavares et al. (2020) e o contributo da amostra recolhida na fase de trabalho de campo, a soma das duas resulta na amostra final. Assim, é considerado um total de 431 fachadas, pertencentes a todas as classes de idade em análise. No Anexo IV, é possível consultar a lista dos edifícios a que estas fachadas pertencem.

Quanto ao contributo da amostra adicional, considera-se o tipo de utilização do edifício em que a fachada se insere, o número de pisos acima do solo e a configuração volumétrica do edifício. Assim, por análise da Figura 3.14, constata-se que a maioria dos edifícios inspecionados está afeta à prestação de serviços, sendo que também foram inspecionadas diversas fachadas em edifícios de habitação. Quanto às dimensões dos edifícios, na Figura 3.15, é apresentada a distribuição do número de pisos e, na Figura 3.16, é apresentada a configuração volumétrica. A maioria os edifícios inspecionados é de dimensão reduzida, sendo dominante a classe de dois ou menos pisos. Além disso, a configuração volumétrica é, maioritariamente, irregular.

Considerando a amostra final, a Figura 3.17 apresenta a distribuição da idade das fachadas. Por comparação com a informação apresentada na Figura 3.1, referente à amostra inicial, constata-se que as classes de idades de menos de cinco anos, de 10 a 14 anos, de 15 a 19 anos e mais de 25 anos foram reforçadas quanto ao número de fachadas, tal como havia sido previamente indicado em 3.5.1., onde se resumiu a amostra adicional.



Figura 3.13 - Histograma com tipo de utilização dos edifícios da amostra adicional.



Figura 3.14 - Histograma com número de pisos acima do solo dos edifícios da amostra adicional.

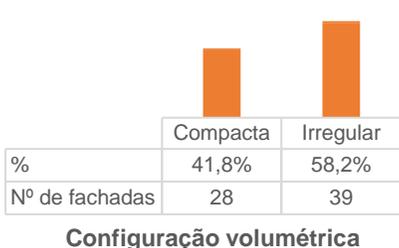


Figura 3.15 - Histograma com configuração volumétrica dos edifícios da amostra adicional.



Figura 3.16 - Histograma com resumo da idade dos edifícios da amostra final.

Na Figura 3.17, é apresentada a distribuição da **orientação das fachadas**. Comparativamente à Figura 3.3, relativa à amostra inicial, houve um melhor nivelamento da distribuição das fachadas entre os pontos cardeais e os pontos colaterais.

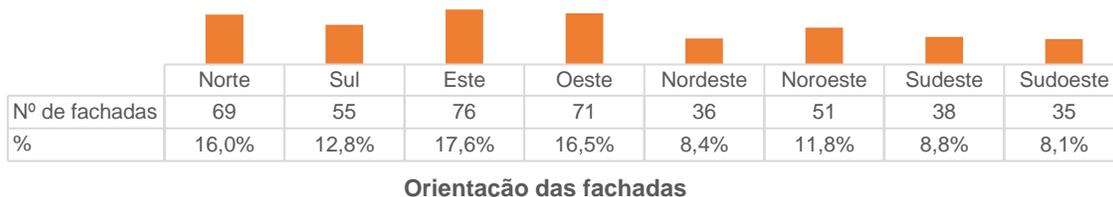


Figura 3.17 - Histograma com distribuição da orientação dos edifícios da amostra final.

No caso da **proximidade ao mar**, comparando as Figuras 3.18 e 3.2, também ocorreu um ligeiro nivelamento das classes, devido ao reforço da classe das fachadas mais próximas do mar.

No que diz respeito à **exposição à humidade**, comparando a Figura 3.19 com a Figura 3.4, a classe de exposição alta sofreu um acréscimo significativo do número de casos de estudo, em comparação com a classe de exposição baixa, conduzindo a um desnivelamento da distribuição entre classes.



Figura 3.18 - Histograma com distribuição da proximidade do mar dos edifícios da amostra final.



Figura 3.19 - Histograma com distribuição da exposição à humidade dos edifícios da amostra final.

Quanto à Figura 3.21, referente à **ação combinada da chuva e do vento** sobre as fachadas, por comparação com a Figura 3.5, verifica-se que houve um aumento maioritariamente da classe das fachadas com exposição alta, o que contribui ainda mais para a já desnivelada distribuição entre classes.

Ao comparar a Figura 3.22 com a Figura 3.6, conclui-se que, para o caso da **exposição aos agentes poluentes**, a grande maioria das fachadas da amostra adicional se situa em zonas com elevada exposição, fazendo com que a distribuição deixe de ser tão nivelada como era para a amostra inicial.



Figura 3.20 - Histograma com distribuição da ação da chuva e do vento sobre os edifícios da amostra final.



Figura 3.21 - Histograma com distribuição da exposição aos agentes poluentes dos edifícios da amostra final.

Relativamente ao **tipo de revestimento** das fachadas, comparando as Figuras 3.22 e 3.7, houve um grande aumento do número de fachadas de revestimento tradicional e de revestimento reforçado, mas o número de fachadas com revestimento cerâmico manteve-se constante, não tendo sido inspecionados casos adicionais, uma vez que não foram identificados edifícios com esta solução.

No caso da **cor do revestimento**, comparando a Figura 3.23 e a Figura 3.8, houve um aumento sensivelmente uniforme de casos em todas as classes, preservando a distribuição da amostra de Tavares et al. (2020).



Figura 3.22 - Histograma com distribuição dos tipos de revestimento dos edifícios da amostra final.



Figura 3.23 - Histograma com distribuição das cores do revestimento dos edifícios da amostra final.

Comparando as Figuras 3.24 e 3.9, para o caso da **textura do acabamento**, houve um aumento em ambas as classes, mantendo-se a tendência de existirem mais fachadas rugosas do que lisas.

Por último, para o **tipo de remate inferior**, comparando a Figura 3.25 com a Figura 3.10, ocorreu um reforço significativo da classe do perfil de arranque elevado, melhorando a distribuição relativa entre classes.



Figura 3.24 - Histograma com distribuição das texturas do acabamento dos edifícios da amostra final.



Figura 3.25 - Histograma com distribuição dos tipos de remate inferior dos edifícios da amostra final.

### 3.5.3. Caracterização das anomalias da amostra final

À semelhança da análise efetuada para as anomalias da amostra de Tavares et al. (2020), em 3.4.2., procede-se à análise e caracterização das anomalias da amostra final. Assim, é apresentado um conjunto de histogramas referentes às anomalias identificadas na amostra.

Na Figura 3.26, é possível observar a distribuição das anomalias por grupo. Por comparação com a Figura 3.11, constata-se que houve um aumento do número de casos para cada grupo de anomalias, não tendo havido um grupo que se destacasse dos outros.



Figura 3.26 - Histograma com a distribuição dos grupos de anomalias nas fachadas da amostra final.

Relativamente à distribuição dos tipos de anomalia, estabelecendo a comparação entre as Figuras 3.27 e 3.12, é possível observar que ocorreu um aumento das anomalias registadas em todos os tipos, exceto para A-C10, anomalias de lacuna de material ou perfuração, e para A-C7, anomalias de empeno ou outras deformações nas juntas.

Para resumir a informação sobre os níveis de degradação das anomalias, são apresentados alguns histogramas adicionais. Relativamente ao nível das anomalias, apresenta-se a Figura 3.28. Além disso, na Figura 3.29, pode ser observada a distribuição percentual das anomalias para cada grupo, separadas por nível de degradação e, na Figura 3.30 a distribuição das anomalias pelos diversos níveis de degradação, separadas por grupos de anomalias.

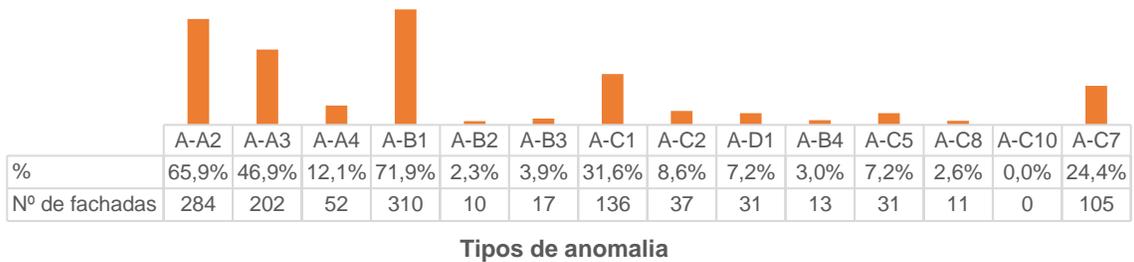


Figura 3.27 - Histograma com a distribuição dos tipos de anomalia nas fachadas da amostra final.



Figura 3.28 - Distribuição da severidade das anomalias das fachadas da amostra final.

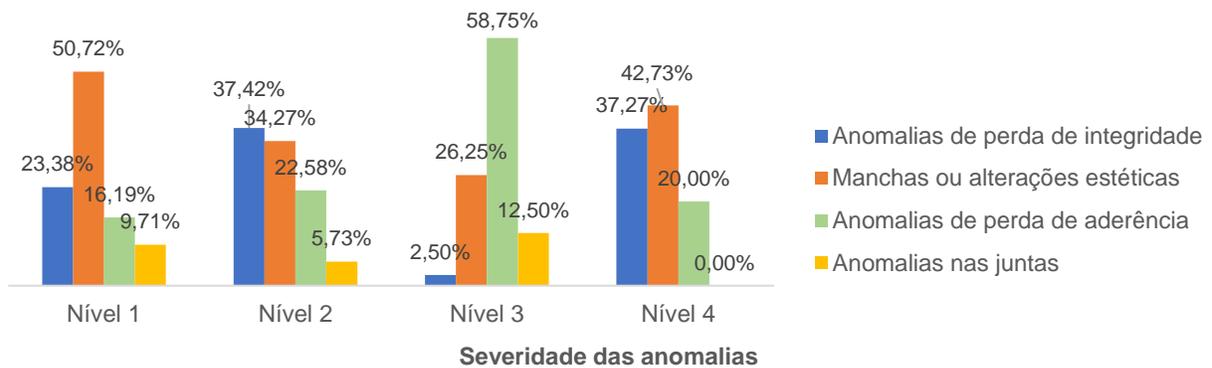


Figura 3.29 - Histograma com a distribuição percentual das anomalias por grupo de anomalia, para cada nível de degradação.



Figura 3.30 - Histograma com a distribuição das anomalias por nível de degradação, para cada grupo de anomalias.

### 3.6. Conclusões

O trabalho de campo é um passo fundamental no processo da investigação, pois permite obter os dados necessários para as análises seguintes (Gaspar, 2009). Além disso, a adequada caracterização estatística da amostra permite perceber a relevância do contributo de cada fachada para o conjunto total (Marques et al., 2018), conduzindo a ganhos de representatividade nos atributos a analisar.

Ao comparar a amostra de Tavares et al. (2020) com a amostra final, houve uma ligeira melhoria na representatividade da amostra. No entanto, houve algumas dificuldades relacionadas com o trabalho de campo, no que concerne à informação inicial disponível sobre os edifícios. Uma vez que apenas eram conhecidas a morada e a data da instalação ou última intervenção sobre os revestimentos, só era possível estimar algumas das restantes características por via de ferramentas como o *Google Maps*, não se sabendo exatamente o que iria ser encontrado aquando da visita. Por isto, houve bastante trabalho de recolha de dados feito em campo que foi rejeitado durante a fase de processamento, por não proporcionar ganhos de representatividade face à amostra inicial. Isto deveu-se, principalmente, à distribuição geográfica dos edifícios (localizados por todo o país) e à necessidade de rentabilizar as deslocações.

A campanha de visitas foi planeada de modo a conseguir analisar o máximo possível de fachadas em cada localização. Porém, alguns dos edifícios, cuja visita tinha sido planeada previamente, tinham restrições ao seu acesso, seja por via de portões, vedações ou pela presença de operacionais de segurança que não permitiam o acesso sem autorização prévia dos proprietários. Não obstante, foi possível analisar fachadas suficientes para melhorar a representatividade da amostra, conforme se pode constatar ao analisar a tabela do Anexo III, onde se apresenta o resumo das fachadas inspeccionadas no decorrer do trabalho de campo.

## **4. Modelos de degradação de revestimentos**

### **4.1. Introdução**

No presente capítulo, é apresentado o modelo utilizado para a análise da degradação de fachadas com sistemas ETICS, bem como a sua aplicação à amostra apresentada no Capítulo 3.

De modo a permitir efetuar uma análise quantitativa, o mais objetiva possível, da degradação das fachadas, revela-se necessário recorrer a um modelo de quantificação da condição de degradação destes elementos construtivos. Para tal, Gaspar (2009) desenvolveu uma metodologia geral de análise da degradação de revestimentos, que foi aplicada inicialmente a fachadas rebocadas. Tendo em conta as devidas adaptações, é possível usar esse modelo no caso concreto dos revestimentos ETICS.

A campanha de recolha de dados em campo e seu posterior tratamento permitiram alimentar o modelo acima referido, de modo a obter uma análise quantitativa da evolução da degradação das fachadas ao longo do tempo, em função dos seus atributos físicos, bem como das condições ambientais a que estas se encontram sujeitos.

Uma vez aplicado o modelo à amostra em estudo, é possível determinar a idade para a qual se atinge o fim da vida útil dos revestimentos ETICS. No Capítulo 5, este valor de vida útil será discutido mais pormenorizadamente, tendo em conta a aplicação para o seu cálculo de métodos estocásticos, isto é, aqueles que têm em conta a variabilidade inerente aos fenómenos de degradação (Jin Na et al., 2012).

### **4.2. Metodologia para a estimativa da vida útil de revestimentos**

Tal como referido no Capítulo 1, existem diversos modelos que podem ser usados para estimar a vida útil dos revestimentos das fachadas de um edifício. Considerando as devidas adaptações, estes modelos podem ser aplicados a qualquer tipo de revestimento (Moser e Edvardsen, 2002). No âmbito desta investigação, interessa analisar a vida útil dos revestimentos ETICS. Assim, foi utilizado o modelo de degradação de Gaspar (2009), o qual se apresenta de seguida.

#### **4.2.1. Modelo de degradação de Gaspar (2009)**

O modelo de degradação proposto por Gaspar (2009) tem como objetivo estimar um valor da degradação global de uma fachada, decorrente das anomalias presentes nesta, e por via da ponderação da importância relativa de cada anomalia para o desempenho total da fachada. Apesar de o modelo ter sido concebido para o caso particular dos revestimentos de reboco, pode ser generalizado e aplicado a outros tipos de revestimento de paredes, segundo Gaspar (2009).

A aplicação do modelo à fachada em estudo é expedita: é feito o levantamento dimensional da totalidade da fachada e das anomalias presentes, bem como da sua gravidade, durante a fase do trabalho de campo. Após obter estes dados, o seu processamento é feito recorrendo a fórmulas simples, das quais se obtém o valor da degradação da fachada, o qual é posteriormente enquadrado no contexto específico

do material em estudo. No caso particular dos ETICS, é tida em conta a Tarefa 3 (Silva et al., 2017), previamente introduzida no Capítulo 2., onde se aborda o sistema usado para classificar as anomalias e os respetivos níveis de degradação para este tipo de revestimento, apresentados no Capítulo 3.

Da aplicação do modelo geral de degradação, resultam algumas **vantagens** em relação ao trabalho previamente existente (Gaspar, 2003; Gaspar e Brito, 2005a; Gaspar e Brito, 2005b), nomeadamente: a maior facilidade de obtenção do nível global de degradação de uma fachada, dado que este valor resulta do cálculo de uma média ponderada da degradação existente, em função das anomalias identificadas na fachada; a possibilidade de converter valores da degradação sob a forma de patamares (valores discretos) para valores de natureza contínua, passíveis de ser modelados e estudados por funções matemáticas (Giloni e Padberg, 2002).

Por outro lado, o modelo apresenta como **limitação** o facto de depender de uma abordagem empírica, dado que a recolha de dados é feita com recurso a inspeções visuais, não recorrendo a tecnologias avançadas para execução rigorosa das medições em campo. No entanto, Gaspar (2009) assume que é esse carácter de simplicidade das ações de inspeção que permite uma aplicação expedita da metodologia de análise da degradação dos revestimentos.

No subcapítulo 4.2.2., é relacionado o modelo geral de Gaspar (2009) com o caso particular dos revestimentos ETICS. No Anexo V, é apresentado o exemplo da aplicação da metodologia a uma das fachadas inspecionadas durante a fase do trabalho de campo da presente investigação. De seguida, são apresentados os parâmetros constituintes do modelo que são utilizados nos cálculos para obtenção do valor de degradação de cada fachada.

#### 4.2.1.1. Área degradada ponderada, $A_w$

A área degradada ponderada pela condição das anomalias,  $A_w$ , permite ter em conta a influência do nível de degradação de cada anomalia presente na fachada, face à extensão da degradação associada a essa anomalia. Quanto mais elevado for o nível de degradação de uma determinada anomalia, maior o seu contributo para a ponderação da degradação da fachada (Amaro et al., 2014). Deste modo, é possível estabelecer uma comparação entre o caso de uma anomalia que ocupa uma grande extensão na fachada, com um reduzido nível de degradação, e o caso de uma anomalia com menor extensão na fachada, mas que possui um nível de degradação mais elevado.

$$A_w = \sum(A_n \cdot k_n) \quad (4.1)$$

Tal como referido, a aplicação do modelo implica a realização de alguns cálculos com valores recolhidos em campo. Assim, a primeira fórmula utilizada permite obter a área degradada de uma fachada, ponderada pela condição das anomalias presentes, conforme apresentado na expressão 4.1, onde  $A_w$  é a área degradada ponderada, em  $m^2$ ,  $A_n$  é área da fachada afetada pela anomalia  $n$ , em  $m^2$ , e  $k_n$  é a constante de ponderação da anomalia  $n$ , em função da sua condição de degradação, podendo tomar valores inteiros entre 0 (zero) e 4 (quatro) (Marques et al., 2018), coincidentes com os níveis de degradação previamente apresentados.

#### 4.2.1.2. Extensão da degradação, $E$

O parâmetro da extensão da degradação de uma fachada,  $E$ , pode ser calculado a partir da expressão 4.2, onde  $A$  é o valor da área opaca da fachada, em m<sup>2</sup>. Segundo Gaspar (2009), o valor da área opaca é obtido a partir da subtração, à área total da fachada, dos vãos e das áreas que tenham revestimento diferente do que se está a estudar, ou seja, revestimentos que não ETICS, no caso do presente trabalho.

$$E = \frac{\sum A_n}{A} \quad (4.2)$$

A extensão da degradação pode ser entendida como a proporção das áreas afetadas pelas diferentes anomalias, face à área opaca da fachada. Sendo possível a existência de anomalias de vários tipos, é possível que o valor no numerador seja superior ao denominador, ou seja, a área afetada ser superior à área opaca. Na prática, isto significa que existem zonas da fachada que são afetadas, simultaneamente, pela presença de mais do que um só tipo de anomalia. Nestes casos, o valor de  $E$  é superior a 100%. Este parâmetro tem como limitação representar apenas uma percentagem generalizada de degradação face ao total da fachada, não fornecendo informação sobre a condição particular de cada anomalia (Tavares et al., 2020).

#### 4.2.1.3. Extensão ponderada da degradação, $E_w$

De modo a permitir ter em conta a condição de degradação das anomalias face à extensão de degradação da fachada, Gaspar (2009) propôs o parâmetro da extensão ponderada da degradação da fachada,  $E_w$ , o qual difere da extensão da degradação,  $E$ , por considerar o nível de degradação associado a cada anomalia,  $k_n$ . A expressão 4.3 permite o seu cálculo.

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

Tal como o caso de  $E$ , também  $E_w$  pode adquirir valores superiores a 100%, o que significa que é possível a presença simultânea de vários tipos de anomalias na mesma zona da fachada.

#### 4.2.1.4. Severidade normalizada da degradação, $S_w$

No seguimento da definição e apresentação dos parâmetros anteriores, é possível introduzir a severidade normalizada da degradação da fachada,  $S_w$ , a qual pode ser calculada recorrendo à expressão 4.4, onde  $k$  é uma constante de ponderação correspondente ao nível de degradação mais elevado do que é possível atingir para o revestimento. No caso dos ETICS, e tendo em conta o que foi discutido previamente, o valor de  $k$  é 4 (quatro).

$$S_w = \frac{\sum(A_n \cdot k_n \cdot k_{a,n})}{A \cdot k} = \frac{E_w}{k} \quad (4.4)$$

A severidade normalizada da degradação é o parâmetro mais importante do modelo, pois permite ter um valor da degradação entre 0% (zero) e 100%, facilitando a sua compreensão (Silva et al., 2016).

## 4.2.2. Relação entre a severidade normalizada e a condição de degradação do revestimento ETICS

Conforme referido, o valor de  $S_w$  pode variar entre 0% (zero) e 100% e são considerados cinco níveis possíveis para a degradação de um revestimento, começando no nível 0 (condição mais favorável) e terminando no nível 4 (revestimento que apresenta degradação generalizada). Na Tabela 4.1, é apresentada a correspondência entre estes dois critérios, de modo a fazer a transposição dos valores obtidos pela aplicação do modelo de Gaspar (2009) para um valor da condição de degradação que possa ser utilizado aquando da aplicação dos métodos estocásticos à estimação da vida útil dos revestimentos ETICS.

*Tabela 4.1 - Relação entre a condição de degradação das fachadas e o valor da severidade normalizada da degradação (adaptado de Marques, 2016, e Tavares, 2018)*

Nível de degradação	Severidade normalizada da degradação
Nível 0	$S_w \leq 1\%$
Nível 1	$1\% \leq S_w \leq 10\%$
Nível 2	$10\% \leq S_w \leq 30\%$
Nível 3	$30\% \leq S_w \leq 50\%$
Nível 4	$S_w \geq 50\%$

De acordo com a investigação previamente realizada por Amaro et al. (2013), Ximenes et al. (2015), Marques et al. (2018) e Tavares et al. (2020), o fim da vida útil dos revestimentos ETICS é atingido para uma condição de degradação correspondente ao nível 3 (três). Assim, aplicando a correspondência apresentada na Tabela 4.1, constata-se que a fachada em análise atinge o fim da sua vida útil para valores de  $S_w$  acima de 30%.

## **4.3. Curvas da evolução da degradação de revestimentos**

De modo a visualizar a tendência da evolução da degradação dos revestimentos ao longo do tempo e determinar a idade para a qual se atinge a sua vida útil, é possível traçar curvas que correlacionem os valores de  $S_w$  com a sua idade, escolhendo a curva que melhor se ajusta aos pontos correspondentes à amostra em estudo. Para tal, Shohet et al. (1999) e, posteriormente, Gaspar (2003) definiram cinco padrões possíveis para o andamento das curvas de degradação: linear; côncavo; convexo; em forma de “S”; e em forma “denteada” para fenómenos espontâneos ou discretos.

A evolução **linear** da degradação é provocada por fenómenos atmosféricos de presença permanente, os quais resultam numa evolução constante da degradação ao longo do tempo; as **curvas côncavas** correspondem a fenómenos de deterioração de rápido desenvolvimento na fase inicial, mas cujo efeito nocivo diminui ao longo do tempo como, por exemplo, a presença de microrganismos ou ocorrência de eflorescências; as **curvas convexas** derivam, numa fase inicial, de uma evolução lenta da degradação, mas que tende a agravar-se cumulativamente ao longo do tempo, resultando numa aceleração da

degradação devida, por exemplo, à ação de fenômenos físicos e químicos; as **curvas em “S”** correspondem à combinação de curvas côncavas e curvas convexas, resultando, por um lado, num padrão de evolução da degradação que pode ser abrupto na fase inicial, com desaceleração da progressão ao longo do tempo ou, por outro lado, num padrão de evolução da degradação lento na fase inicial e mais pronunciado ao longo do tempo; os **fenômenos espontâneos ou discretos** devem-se a incidentes de degradação de caráter pontual, tais como assentamentos da estrutura ou acidentes, os quais podem ocorrer em qualquer instante da vida útil do revestimento, sem qualquer possibilidade de previsão, pelo que estes fatores não podem ser considerados para a modelação e previsão da vida útil.

#### 4.3.1. Curva global de degradação da amostra

Para acompanhar a evolução da degradação na amostra, é traçada uma curva de regressão, ajustada aos pontos presentes no gráfico, sendo que cada um corresponde a uma fachada, representada pelo respetivo par (idade;  $S_w$ ). Para a amostra em estudo, a curva usada é uma regressão polinomial de terceiro grau, de modo a permitir exibir uma curva com formato em “S”, por via da possibilidade da existência de um ponto de inflexão entre um troço côncavo e um convexo, ou vice-versa (Gaspar, 2009). Considerando a investigação realizada e para permitir perceber qual o contributo da amostra adicional face à amostra inicial, são analisados separadamente os cenários da amostra inicial e da amostra final, introduzidas previamente no Capítulo 3.

Assim, na Figura 4.1, é apresentada a curva de evolução da degradação das fachadas da amostra inicial em função da idade e, na Figura 4.2, é apresentada a curva de evolução da degradação das fachadas da amostra final em função da idade. Da comparação entre os dois gráficos, é possível retirar algumas conclusões quanto ao contributo da amostra adicional recolhida durante a fase do trabalho de campo. Por um lado, a curva ajustada à amostra inicial apresenta um coeficiente de determinação,  $R^2$ , de 0,7750, o que revela uma correlação forte entre a severidade da degradação,  $S_w$ , e a idade das fachadas, ou seja, o modelo é adequado para explicar a realidade. Por outro lado, a curva ajustada à amostra final apresenta um  $R^2$  de 0,7782, demonstrando uma melhoria da capacidade explicativa do modelo com o aumento da dimensão da amostra, o que é justificado pela maior cobertura da amostra final face à inicial, no que diz respeito aos atributos considerados na investigação. Assim, tendo em conta o valor obtido para  $R^2$ , este modelo, no qual a idade é a única variável explicativa, consegue explicar cerca de 77,82% da variabilidade da degradação apresentada pelos revestimentos que constituem a amostra, enquanto os restantes 22,18% são devidos a fatores não considerados na análise efetuada. Esses fatores podem dever-se às condições de aplicação dos revestimentos, a defeitos de fabrico dos materiais utilizados (Künzel et al., 2006), ou às condições de exposição, uso e manutenção a que estão sujeitos ao longo da sua vida útil.

A curva obtida para a amostra final apresenta um andamento convexo, o que indica que a degradação na fase inicial da vida útil dos revestimentos é pouco expressiva, mas que tende a agravar-se

progressivamente com a passagem do tempo. Estes resultados são coincidentes com os obtidos previamente por Ximenes et al. (2015), Marques et al. (2018) e Tavares et al. (2020).

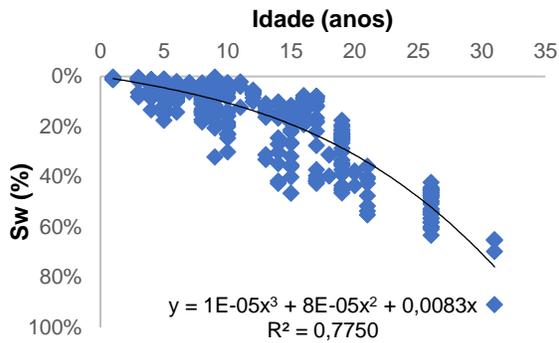


Figura 4.1 - Curva de evolução da degradação da amostra inicial em função da idade.

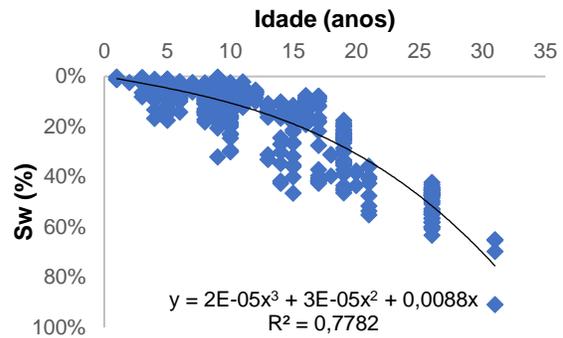


Figura 4.2 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade.

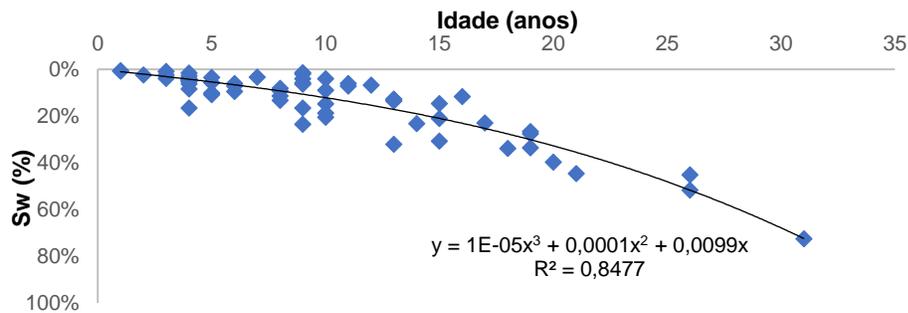


Figura 4.3 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da média das idades.

Por análise do gráfico correspondente à amostra final, na Figura 4.2, constata-se que há algumas zonas de concentração de pontos com diferentes valores de  $S_w$  para o mesmo valor de idade, situação correspondente a ter diversas fachadas pertencentes ao mesmo edifício. Esta acumulação de pontos provoca alguma dispersão gráfica dos dados, a qual pode ser mitigada tomando a média da severidade da degradação ponderada das fachadas de cada edifício. Após aplicar este procedimento, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 4.3, no qual é mais fácil efetuar uma análise da evolução da degradação, fruto de haver um menor número de pontos. Adicionalmente, a curva ajustada aos pontos correspondentes à média da degradação de cada edifício apresenta um  $R^2$  de 0,8477, que é superior ao obtido para a curva ajustada a todas as fachadas da amostra final.

#### 4.3.2. Influência dos fatores de degradação condicionantes

O estudo aprofundado da evolução da degradação das fachadas com revestimentos ETICS deve ter em conta o contributo dos diversos fatores (Sulakatko et al., 2017). Assim, tendo em conta os atributos identificados aquando da caracterização da amostra inicial, no Capítulo 3, também a análise da evolução da degradação depende de fatores relacionados, por um lado, com as características da fachada e do

próprio revestimento e, por outro, com as condições do meio envolvente. Como complemento à curva global de degradação da amostra, apresentada na Figura 4.2, são traçadas curvas para cada uma das classes que os diversos atributos podem tomar, à semelhança da metodologia adotada na investigação existente para este material (Ximenes et al. (2015), Marques et al. (2018) e Tavares et al. (2020)).

Relativamente aos fatores relacionados com as condições do meio envolvente, no que concerne à **orientação** das fachadas, a Figura 4.4 apresenta as curvas traçadas para as quatro classes que este atributo pode tomar. Devido ao reduzido número de casos para algumas das orientações secundárias, optou-se por agrupá-las em conjunto com as orientações principais. Dado que as fachadas orientadas a Norte tendem a ser as que têm piores condições de exposição, devido à humidade e presença de vento, pela análise das curvas traçadas, constata-se que o modelo exibe o comportamento esperado, ou seja, as curvas associadas a fachadas com orientação a Norte/Nordeste e Oeste/Noroeste são as que apresentam evolução mais acentuada da degradação. Relativamente ao valor do  $R^2$  obtido para as curvas, comprova-se que o modelo tem um bom ajuste aos dados.

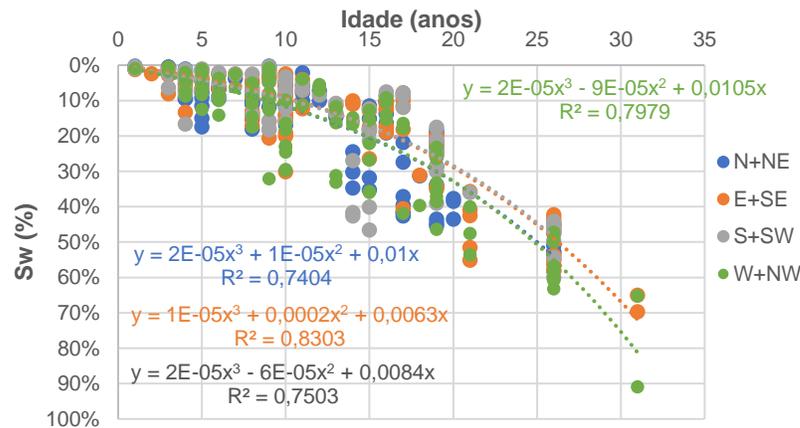


Figura 4.4 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da orientação das fachadas.

Relativamente à **proximidade do mar**, a Figura 4.5 apresenta as curvas traçadas para as duas classes deste atributo. No caso das fachadas mais distantes do mar, a curva da degradação é do tipo “S”, com uma fase de degradação inicial mais acelerada, mas que estabiliza com o passar do tempo. No caso das fachadas mais próximas do mar, a curva é convexa e, respeitando o sentido físico deste atributo, resulta em valores de degradação mais elevados, fruto da ação do mar sobre as fachadas. No que diz respeito ao  $R^2$ , apesar de o valor associado à curva da classe mais afastada do mar ser inferior ao valor associado à outra curva, ambos revelam um modelo ajustado à amostra.

No caso da exposição à **humidade**, a Figura 4.6 apresenta as curvas traçadas para as duas classes deste atributo. Conforme esperado, as fachadas com exposição mais elevada à humidade são aquelas que resultam na curva com uma evolução da degradação mais rápida, uma vez que a presença de humidade potencia a ocorrência de diversos fenómenos de degradação. Adicionalmente, ambas as curvas têm valor elevado de  $R^2$ , pelo que o modelo traduz adequadamente o comportamento da amostra.

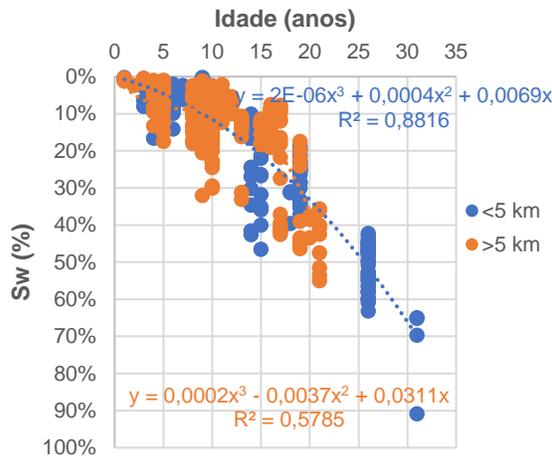


Figura 4.5 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da proximidade das fachadas ao mar.

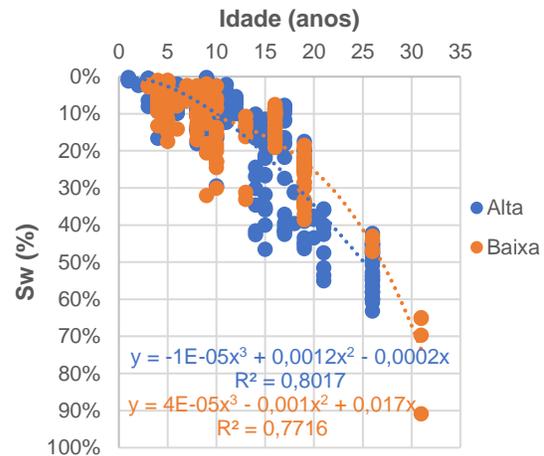


Figura 4.6 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da exposição das fachadas à humidade.

Quanto à **ação combinada da chuva e do vento**, a Figura 4.7 apresenta as curvas traçadas para as duas classes deste atributo. As fachadas expostas a uma ação mais intensa da chuva e do vento correspondem à curva com maiores valores de degradação, o que tem sentido físico. Relativamente ao ajuste do modelo à realidade, ambas as curvas têm um valor do R<sup>2</sup> elevado, pelo que o modelo é adequado para descrever o comportamento da amostra.

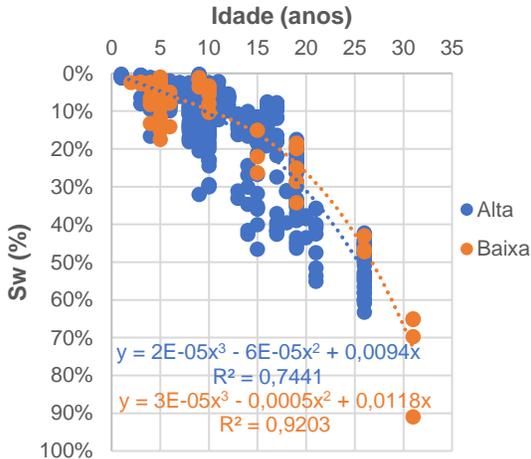


Figura 4.7 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da ação combinada da chuva e do vento sobre as fachadas.

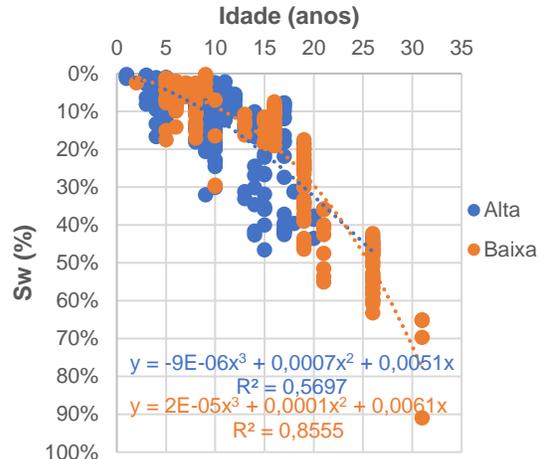


Figura 4.8 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da exposição das fachadas a agentes poluentes.

No caso da **exposição a agentes poluentes**, a Figura 4.8 apresenta as curvas traçadas para as duas classes deste atributo. Ao longo do seu andamento, a curva correspondente às fachadas com exposição elevada aos agentes poluentes apresenta valores de degradação superiores à curva das fachadas com exposição mais baixa. No entanto, devido a uma falha de representatividade da amostra, no caso das fachadas na classe de idades superior a 25 anos, a curva das fachadas com exposição baixa

assume valores de degradação superiores. Apesar disto, o valor do  $R^2$  é aceitável para ambas as curvas, pelo que se considera que o modelo acompanha suficientemente bem o comportamento correspondente à realidade das fachadas da amostra.

Tendo em conta os fatores relacionados com as características do revestimento, relativamente ao **tipo de revestimento**, a Figura 4.9 apresenta as curvas traçadas para as três classes deste atributo. No caso das fachadas com revestimento cerâmico, há uma evidente falta de representatividade na amostra, pelo que é impossível retirar conclusões quanto a este tipo de revestimento. Porém, é possível comparar as curvas referentes aos revestimentos tradicional e reforçado, as quais refletem com sucesso o comportamento esperado para a amostra: maior durabilidade associada ao revestimento reforçado, por oposição a uma maior degradação patente nos revestimentos tradicionais. Além disso, o valor do  $R^2$  é elevado para essas duas curvas, permitindo usar o modelo para explicar o comportamento destas classes.

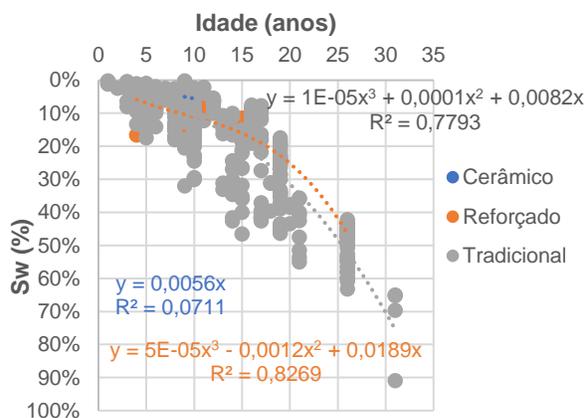


Figura 4.9 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e do tipo de revestimento das fachadas.

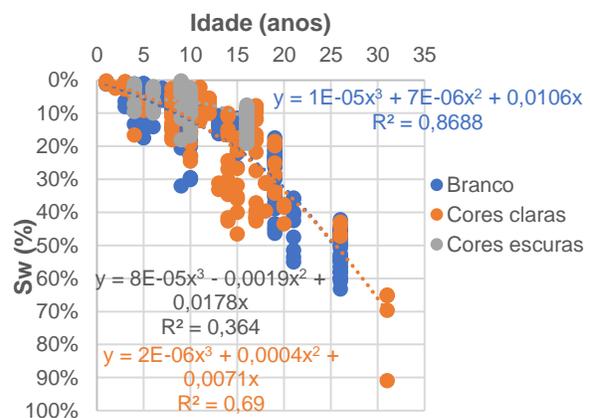


Figura 4.10 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da cor do revestimento das fachadas.

No caso da **cor do acabamento**, a Figura 4.10 apresenta as curvas traçadas para as três classes deste atributo. Por um lado, há uma forte coincidência gráfica entre a curva correspondente às fachadas de cores claras e a curva das fachadas de cor branca. Por outro lado, as fachadas de cores escuras estão associadas a uma curva com uma evolução distinta das outras duas classes. Assim, para a amostra em estudo, as fachadas brancas e as claras apresentam uma evolução da degradação mais acentuada do que as fachadas escuras. Isto pode ser explicado pelo facto de as fachadas escuras potenciarem a absorção da luz solar, o que se traduz num aumento de temperatura, gerando tensões internas no material, as quais conduzem a uma evolução mais lenta da degradação, face à identificada nas fachadas claras, a qual tende a ser devida não só, mas também, a anomalias estéticas, que são mais fáceis de identificar em revestimentos claros. Posto isto, importa ainda salientar que o número de fachadas escuras é significativamente inferior ao número de fachadas das outras duas classes, em particular para os grupos de idade mais elevada, nomeadamente acima de 15 anos. Como tal, o valor do  $R^2$  é baixo para esta classe e elevado para as outras duas, o que sugere cautela na aplicação do modelo baseado na cor do acabamento como variável explicativa da evolução da degradação dos revestimentos em função da idade.

Relativamente à **textura** do acabamento, a Figura 4.11 apresenta as curvas traçadas para as duas classes deste atributo. Os revestimentos rugosos apresentam uma maior degradação do que os de textura lisa, o que coincide com o comportamento esperado, já que as rugosidades da superfície são locais preferenciais para acumulação de humidade e detritos, elementos estes que promovem a ação de degradação das fachadas. Para este modelo, o valor do  $R^2$  é elevado, permitindo uma adequada aplicação do mesmo para explicar o comportamento real das fachadas estudadas.

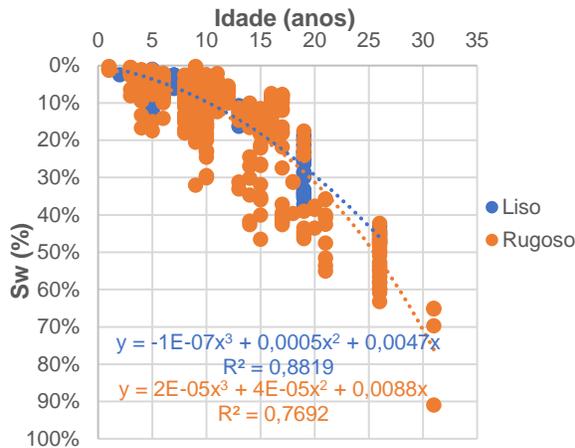


Figura 4.11 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e da textura das fachadas.

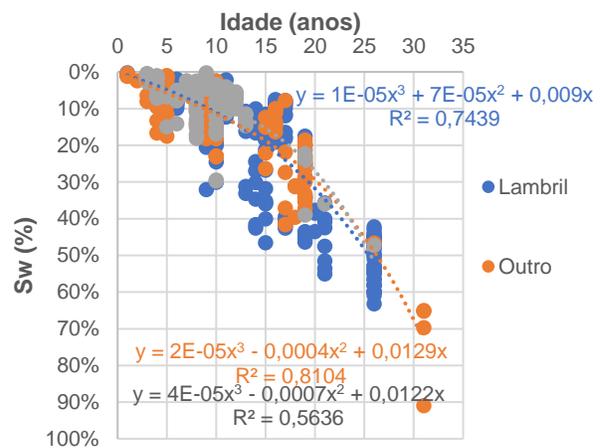


Figura 4.12 - Curva de evolução da degradação da amostra final em função da idade e do remate inferior das fachadas.

Por último, quanto ao tipo de **remate inferior**, a Figura 4.12 apresenta as curvas traçadas para as três classes deste atributo. Relativamente ao caso do perfil de arranque elevado, este corresponde à curva com o andamento mais conservativo para a degradação, o que coincide com o comportamento esperado, dado que este tipo de remate inferior é o que confere maior proteção às fachadas. No entanto, ao contrário do que seria esperado, a curva da classe lambril apresenta maior inclinação do que a classe de outro tipo de revestimento, onde se incluem as fachadas que não têm proteção inferior de nenhum tipo. Por isto, apesar de os valores de  $R^2$  serem elevados, o modelo não é o mais adequado para descrever o comportamento da amostra analisada.

#### 4.4. Análise dos resultados

Da aplicação do método gráfico à amostra final, resulta a possibilidade de obter o valor da vida útil dos revestimentos ETICS, de uma forma expedita. Para tal, podem ser empregues dois procedimentos alternativos. Por **via gráfica**, traçando uma reta horizontal, com ordenada de valor igual à severidade normalizada de degradação,  $S_w$ , correspondente ao nível para o qual se atinge o fim da vida útil do revestimento, e fazendo a sua interseção com a curva de degradação obtida para a amostra. O valor da abcissa obtido através deste procedimento corresponde à idade para a qual se atinge o fim da vida útil. Por **via algébrica**, uma vez conhecida a equação que descreve a curva global de degradação da amostra, é possível calcular a idade (enquanto incógnita dessa equação) para a qual se obtém o valor da degradação

correspondente a ter atingido o fim da vida útil. Tal como indicado em 4.2.2., o valor de  $S_w$  para o qual se considera que os revestimentos ETICS atingem o fim da vida útil é de 30%. Considerando a Figura 4.2, ao aplicar o método gráfico à amostra em estudo, por via algébrica, o valor obtido para a vida útil é de 18,5 anos.

## 4.5. Conclusões

No seguimento da aplicação do método gráfico aos dados obtidos após aplicação do modelo de degradação de Gaspar (2009) à amostra em estudo, foi possível estimar o valor da vida útil para os revestimentos ETICS analisados. Além disso, ao aplicar o método gráfico à amostra, de acordo com cada um dos diversos fatores discutidos, é possível ter em consideração a influência individual que estes têm sobre a vida útil do material.

Por comparação com o modelo inicialmente proposto por Gaspar (2002), o modelo de degradação considerado na presente investigação pode ser aplicado nos casos em que as anomalias presentes nas fachadas estejam distribuídas de maneira não uniforme e apresentem níveis de degradação díspares entre si. Quanto ao método gráfico, trata-se de uma metodologia expedita para obter o valor da idade para o qual se atinge a vida útil do revestimento, expressa em função da degradação da fachada.

Uma vez conhecido o comportamento determinístico da amostra e qual a influência de cada fator, é possível prosseguir com uma análise que tenha em conta o efeito de fatores aleatórios sobre o valor da vida útil, contribuindo para uma melhoria do ajuste do modelo à realidade (Paulo et al., 2011). Esta abordagem probabilística é realizada no próximo capítulo, sendo discutidos os resultados obtidos face à literatura existente sobre a durabilidade dos revestimentos por ETICS.

## 5. Modelos estocásticos

### 5.1. Introdução

A modelação da vida útil de elementos de construção pode ser realizada recorrendo a diversos métodos, de entre os quais se destacam os estocásticos, que permitem a definição de relações entre variáveis, através da estimação de parâmetros de ajuste, cuja validade estatística pode ser testada (Thompson e Johnson, 2005).

No presente capítulo, são abordados dois métodos estocásticos: a **regressão logística**, quer no caso multinomial, quer no caso binomial, e as **cadeias de Markov** em tempo contínuo. Com a aplicação destes métodos à amostra em estudo, e tendo em conta os conceitos de vida útil, degradação e atributos de uma fachada, apresentados nos capítulos anteriores, pretende-se dar resposta a três questões: **i)** qual a probabilidade de um revestimento possuir uma dada condição de degradação em função da idade da fachada, das características do revestimento e das condições ambientais a que essa fachada se encontra sujeita; **ii)** em que intervalos de tempo é que há uma maior probabilidade de uma fachada transitar de uma condição de degradação para a do nível seguinte, ou seja, um agravamento do estado geral de degradação dessa fachada; **iii)** qual a probabilidade de ser atingido o fim da vida útil de um revestimento, ao longo de um dado intervalo de tempo.

Para tal, torna-se necessário determinar um conjunto de parâmetros relativos à vida útil dos revestimentos ETICS e à evolução do seu estado de degradação ao longo do tempo, tendo em conta os atributos apresentados no Capítulo 3. Esta evolução é expressa em função da probabilidade de cada revestimento apresentar uma determinada condição de degradação ao longo do tempo, resultante da aplicação dos modelos estocásticos aos valores de severidade da degradação normalizada,  $S_w$ , provenientes da aplicação do modelo geral de degradação de fachadas, de Gaspar (2009), aos dados obtidos após inspeccionar as fachadas na fase do trabalho de campo.

Por comparação com o Capítulo 4, onde se recorre ao método gráfico, que é um caso particular dos métodos determinísticos, para a análise da evolução da degradação da amostra, a aplicação dos métodos estocásticos ao cálculo da vida útil dos revestimentos ETICS permite obter resultados mais realistas, dado que estes métodos têm em consideração a aleatoriedade associada aos fenómenos de degradação (Lounis et al., 1998). Assim, no contexto da investigação realizada para este revestimento, os métodos estocásticos podem ser considerados como a evolução natural das técnicas utilizadas para determinação da vida útil e análise da evolução da degradação, no sentido de melhorar o ajuste dos resultados à realidade existente durante a fase de serviço deste elemento construtivo.

Uma vez aplicados os métodos estocásticos à amostra em estudo e obtida a informação necessária para a avaliação das três situações listadas, é possível estabelecer comparações entre os modelos utilizados, nomeadamente no que diz respeito ao ajuste aos dados da amostra e à capacidade preditiva de cada um. Finalmente, estes resultados são comparados com os obtidos quando se recorre ao método gráfico para análise da evolução da degradação e determinação de uma estimativa para a vida útil dos revestimentos ETICS.

## 5.2. Regressão Logística

### 5.2.1. Considerações gerais

O uso de modelos de regressão permite a estimação de parâmetros que estabelecem relações entre variáveis dependentes e variáveis explicativas, também conhecidas como variáveis independentes (Hilbe, 2009). Nos casos em que as variáveis independentes são quantitativas, é possível recorrer a modelos de regressão linear ou não linear, simples ou múltipla (Bayrak e Akgül, 2013). Quando a variável dependente é quantitativa e as variáveis independentes são categóricas (fatores), ou numéricas (covariáveis), é necessário usar a regressão categorial (Trexler e Travis, 1993). De acordo com a variável dependente a modelar, assim é feita a escolha do tipo de regressão categorial. Se a variável dependente é nominal dicotômica, ou seja, tem apenas duas classes mutuamente exclusivas, que resultam de uma escolha binária, a regressão categorial toma a designação de regressão logística binomial. Para os casos em que a variável dependente é nominal policotômica, ou seja, tem mais do que duas classes mutuamente exclusivas, a regressão logística expande-se para a regressão logística multinomial (Wang, 2005).

Tendo em conta as três situações distintas propostas para análise na investigação realizada, recorre-se, por um lado, a modelos com base na regressão logística multinomial, para determinar a probabilidade de um revestimento apresentar uma dada condição de degradação em função da idade da fachada em que se insere, das características desse revestimento e das condições ambientais a que a fachada se encontra sujeita e para determinar os intervalos de tempo em que há uma maior probabilidade de uma fachada transitar entre níveis consecutivos da condição de degradação. Por outro lado, recorre-se a modelos com base na regressão logística binomial, para determinar se é atingido o fim da vida útil de um revestimento, ao longo de um dado intervalo de tempo.

De modo a construir os modelos de análise, torna-se necessário selecionar o método estatístico mais adequado e as variáveis a considerar. Estando na presença de uma variável dependente categórica, a regressão linear não é o método mais apropriado, visto que a variável não é contínua, mas sim constituída por várias categorias distintas. Tomando, como exemplo a avaliação sobre se uma fachada atingiu ou não o fim da sua vida útil, esta pode ser codificada recorrendo a uma variável *dummy*, conforme apresentado na expressão 5.1. Como é possível constatar, trata-se de uma variável não contínua e, como um modelo de regressão linear iria resultar em valores contínuos, estes não pertenceriam aos casos possíveis que essa variável pode tomar. Por isto, conclui-se que a regressão logística é um método mais adequado para modelar uma variável dependente do tipo categórico (Missio e Jacobi, 2007).

$$Y = \begin{cases} 1, & \text{caso seja atingido o fim da vida útil} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.1)$$

Ao aplicar a regressão logística a uma amostra, surgem os conceitos de “sucesso” e “insucesso”. O sucesso ocorre quando um elemento da amostra possui uma característica relevante para a pesquisa ou se relaciona com as restantes variáveis em estudo. Pelo contrário, o insucesso ocorre quando um elemento da amostra não verifica as condições estabelecidas para ser considerado como sucesso. No caso particular das variáveis categóricas dicotômicas que tenham um atributo classificado como “sucesso”

e o complementar como “insucesso”, estas podem ser caracterizadas pela distribuição de Bernoulli (Bergtold et al., 2010). Seja  $P(Y = 1)$  a probabilidade do sucesso e  $P(Y = 0)$  a probabilidade do insucesso. Então,  $P(Y = 1) + P(Y = 0) = 1$ . Além disso, a probabilidade do sucesso é dada por  $\hat{\pi} = \pi(1)/[1 - \pi(1)]$ , pelo que resulta que a probabilidade do insucesso é dada por  $(1 - \hat{\pi}) = \pi(0)/[1 - \pi(0)]$ . Assim, a probabilidade de algo acontecer é dada pela razão entre o número de ocorrências desse acontecimento na amostra e o número total de acontecimentos.

De modo a estimar a probabilidade de uma ocorrência  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) da amostra ser “sucesso”, a regressão logística recorre à função logística, cuja forma genérica é, para as variáveis independentes  $X_i$  ( $i = 1, \dots, p$ ), a apresentada na expressão 5.2, onde  $\beta_j$  são os coeficientes de regressão (El-Habil, 2012). O modelo é posteriormente linearizado, com recurso à transformação  $Logit(\hat{\pi})$ , a qual é expressa por  $Logit(\hat{\pi}) = Ln(\frac{\hat{\pi}}{1-\hat{\pi}})$ . Ao rácio  $\hat{\pi}/(1 - \hat{\pi})$ , dá-se o nome de rácio de verosimilhança ou rácio das chances, o qual representa a probabilidade de se obter um sucesso face à probabilidade de se obter um insucesso, para a amostra considerada.

$$\hat{\pi} = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \dots + \beta_p X_{pj}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \dots + \beta_p X_{pj}}} \quad (5.2)$$

O rácio de verosimilhança é obtido para o modelo nulo, ou seja, aquele que é composto apenas pela constante,  $\beta_0$ . Para esse modelo, são ignorados os efeitos das variáveis independentes e apenas se considera o efeito da variável dependente no comportamento da amostra. Este rácio representa uma medida de associação entre a variável dependente e as variáveis independentes (Szumilas, 2010). No caso particular da previsão de vida útil de elementos construtivos e, tendo em conta os fatores de degradação considerados na presente investigação, é possível cruzar a informação obtida sobre os elementos terem ou não atingido a vida útil com a referente às condições de exposição e construtivas dos mesmos.

Tabela 5.1 - Associação entre variáveis independentes e a variável dependente. (adaptado de Hosmer e Lemeshow, 2000, e Silva et al., 2016)

Variável dependente (Y)	Variável independente (X)	
	x = 1	x = 0
y = 1	$\pi(1) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1}}$	$\pi(0) = \frac{e^{\beta_0}}{1 + e^{\beta_0}}$
y = 0	$1 - \pi(1) = \frac{1}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1}}$	$1 - \pi(0) = \frac{1}{1 + e^{\beta_0}}$
<b>Total</b>	$\pi(1) + (1 - \pi(1)) = 1$	$\pi(0) + (1 - \pi(0)) = 1$

Na Tabela 5.1, é apresentada a classificação genérica da associação entre a variável dependente (“atingir o fim da vida útil”) e as variáveis independentes. Considerando, por exemplo, o estudo de uma fachada atingir ou não o fim da vida útil, em função de estar exposta à ação combinada da chuva e do vento, há quatro cenários possíveis: **i)** a fachada atinge o fim da vida útil e está exposta à chuva e vento; **ii)** a fachada atinge o fim da vida útil, sem estar exposta à chuva e vento; **iii)** a fachada não atinge o fim da vida útil e está exposta à chuva e vento; **iv)** a fachada não atinge o fim da vida útil, não estando exposta à chuva e vento.

## 5.2.2. Metodologia de construção dos modelos

A construção de um modelo de regressão logística depende da estimação de parâmetros. Para tal, é possível recorrer a dois métodos: o dos mínimos quadrados ou o da máxima verosimilhança (Hald, 1999). Na presente investigação, recorre-se ao segundo, o qual permite estimar os coeficientes da regressão,  $\beta$ , que maximizam a probabilidade de encontrar casos da amostra que concretizem a variável dependente amostrada. A função de verosimilhança, que dá a probabilidade conjunta  $P(Y = y_1, Y = y_2, \dots, Y = y_n)$  para  $n$  observações independentes da variável dependente  $Y$ , é:  $L = P(Y = y_1) \times P(Y = y_2) \times \dots \times P(Y = y_n) = \prod_{j=1}^n \pi_j^{y_j} (1 - \pi_j)^{1-y_j}$ . De acordo com Ljung (1987), é usual utilizar o negativo do logaritmo da função de verosimilhança em problemas de estimação de parâmetros. Assim, por uma questão de facilidade de cálculo, assume-se  $Ln(L)$  como função de verosimilhança, conforme a expressão:  $LL = Ln(L) = \sum_{j=1}^n y_j \left( \frac{e^{x_j' \beta}}{1 + e^{x_j' \beta}} \right) + \sum_{j=1}^n (1 - y_j) \left( \frac{1}{1 + e^{x_j' \beta}} \right) = \sum_{j=1}^n \{y_j Ln(\hat{\pi}_j) - (1 - y_j) Ln(1 - \hat{\pi}_j)\}$ . Aplicando um algoritmo computacional, é possível obter a expressão  $LL = \sum_{j=1}^n \{y_j Ln(\hat{\pi}_j) - (n_j - y_j) Ln(1 - \hat{\pi}_j)\}$ , a qual é usada para um modelo com variáveis qualitativas (Hosmer e Lemeshow, 2000). O valor final dos parâmetros é obtido através de diversas iterações, limitadas por um critério de paragem ou convergência.

Uma vez tendo efetuado o ajuste do modelo, é fundamental avaliar a significância e qualidade do modelo ajustado, bem como dos coeficientes de regressão. Para tal, recorre-se ao teste do **rácio de verosimilhanças**, o qual revela a qualidade do ajuste do modelo aos dados da amostra, a partir da razão entre a verosimilhança do modelo nulo e o modelo final completo (Vuong, 1989).

Neste teste, são testadas duas hipóteses: a hipótese nula ( $H_0$ ), em que  $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ , o que indica que o modelo completo não é estatisticamente significativo, e a hipótese alternativa ( $H_1$ ), em que  $\exists i: \beta_i \neq 0$  (existe pelo menos um  $i$  para o qual  $\beta_i$  é diferente de zero), o que indica que o modelo completo é estatisticamente significativo. Se a hipótese nula for verdadeira, como o modelo completo não é estatisticamente significativo, as variáveis independentes incluídas nesse modelo não têm capacidade preditiva relativamente ao comportamento da variável dependente. Por outro lado, se a hipótese alternativa for verdadeira, apenas se determina que, pelo menos, uma das variáveis independentes é adequada para explicar o comportamento da variável dependente, pelo que é necessário proceder a testes adicionais, para cada uma das variáveis independentes. Para testar as duas hipóteses, recorre-se à estatística de teste  $G^2$ , que é obtida através de  $G^2 = -2Ln\left(\frac{L_0}{L_C}\right)$ , onde  $L_0$  é a verosimilhança do modelo nulo e  $L_C$  é a verosimilhança do modelo completo.

Para aferir o **ajuste do modelo**, são testadas duas hipóteses: a hipótese nula ( $H_0$ ), em que o modelo se ajusta aos dados, e a hipótese alternativa ( $H_1$ ), em que o modelo não se ajusta aos dados. Para testar estas duas hipóteses, é frequente recorrer ao teste de qui-quadrado,  $\chi^2$ , de Pearson (Kim, 1993), sendo  $\chi_p^2 = \sum_{j=1}^J \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j}$ , onde  $O_j$  representa o número de sucessos observados e  $E_j$  representa o número de sucessos estimados pelo modelo. A hipótese nula é aceite se o *p-value* do teste for superior ao nível de significância fixado (geralmente, é definido o valor de 5%).

Adicionalmente, segundo Smyth (2003), é possível usar o teste do desvio residual, *Deviance*, para analisar o ajuste do modelo à amostra, recorrendo a  $D = -2\ln\left(\frac{L_C}{L_S}\right)$ , onde  $L_C$  é o logaritmo da verosimilhança do modelo ajustado e  $L_S$  é o logaritmo da verosimilhança do modelo saturado, ou seja, composto por todas as variáveis independentes e pelo cruzamento das suas interações. Quanto menor o valor do desvio, melhor o ajuste do modelo à amostra. Tendencialmente, o desvio tende a diminuir, à medida que são incluídas mais variáveis independentes no modelo. De um modo semelhante ao teste do qui-quadrado, também a hipótese nula do teste da *Deviance* é aceite se o *p-value* for superior ao nível de significância fixado, o que significa que o modelo se ajusta aos dados. Relativamente ao desvio, são considerados dois critérios, *Akaike Information Criteria*, AIC, e *Bayesian Information Criteria*, BIC, que o penalizam em função do número de parâmetros do modelo e da dimensão da amostra, respetivamente. Assim, quanto menores forem os valores de AIC e BIC, melhor o ajuste do modelo (Lewis et al., 2011).

Para variáveis independentes quantitativas, é possível usar o teste de qui-quadrado de Hosmer e Lemeshow (1980), que é dado por:  $\chi_{HL}^2 = \sum_{g=1}^{2G} \frac{(O_g - E_g)^2}{E_g}$ , onde  $O_g$  é o valor observado e  $E_g$  o valor previsto.

De modo a proceder à análise da **significância estatística de cada uma das variáveis** do modelo, é possível recorrer ao teste de Wald (1941), dado por  $W_j = \frac{\hat{\beta}_j}{SE(\hat{\beta}_j)} \sim N(1,0)$ , onde  $\hat{\beta}_j$  representa os coeficientes do modelo e  $SE(\hat{\beta}_j) = \sqrt{\hat{\sigma}^2(\hat{\beta}_j)}$  representa o desvio-padrão do coeficiente  $\hat{\beta}_j$ . Neste teste, são testadas duas hipóteses: a hipótese nula ( $H_0$ ), em que,  $\beta_i = 0 \mid \beta_0, \beta_1, \beta_{i-1}, \beta_{i+1}, \beta_p$  ( $i = 1, \dots, p$ ), e a hipótese alternativa ( $H_1$ ), em que  $\beta_i \neq 0 \mid \beta_0, \beta_1, \beta_{i-1}, \beta_{i+1}, \beta_p$  ( $i = 1, \dots, p$ ). Sempre que o *p-value* for inferior ao nível de significância admitido, rejeita-se a hipótese nula, permitindo determinar quais os coeficientes que podem ser incluídos no modelo de regressão.

Por comparação com os modelos de regressão linear, os modelos de regressão logística tendem a apresentar um **pseudo-R<sup>2</sup>**, que é um coeficiente de determinação ajustado a este tipo de modelos. Este indicador baseia-se na comparação do modelo ajustado com o modelo nulo, pelo que não pode ser tomado diretamente como uma medida da variabilidade explicada pelo modelo. Existem diversos pseudo-R<sup>2</sup>, sendo relevante destacar os de Cox e Snell (1989), Nagelkerke (1991) e McFadden (1973), dados pelas expressões 5.3 a 5.5, onde  $LL_C$  corresponde ao logaritmo da verosimilhança do modelo completo,  $LL_0$  corresponde ao logaritmo da verosimilhança do modelo nulo e  $n$  corresponde à dimensão da amostra.

$$R_{CS}^2 = 1 - e^{\frac{2(LL_C - LL_0)}{n}} \quad (5.3)$$

$$R_N^2 = \frac{R_{CS}^2}{1 - e^{\frac{2LL_0}{n}}} \quad (5.4)$$

$$R_{MF}^2 = 1 - \frac{LL_C}{LL_0} \quad (5.5)$$

Uma vez construído e ajustado o modelo, é possível analisar a sua **capacidade classificativa**. Para tal, é possível recorrer a uma tabela de classificação, conforme as apresentadas nas Tabelas 5.15 e 5.22. Através da análise dessa tabela, é possível perceber se o modelo é eficiente nas previsões efetuadas.

### 5.2.3. Aplicação à previsão de vida útil de revestimentos ETICS

Os modelos baseados na regressão logística considerados na presente dissertação são construídos com recurso ao programa SPSS (*Statistical Package for Social Sciences*). Os dados utilizados nesses modelos são os que resultam do processamento da amostra final, após o trabalho de campo. Além disso, é considerada a escala da degradação apresentada por Ximenes et al. (2015), de acordo com o que é referido no Capítulo 3.

De acordo com Hosmer e Lemeshow (2000), a probabilidade da variável dependente,  $Y$ , tomar o valor de cada uma das suas  $n$  classes é dado pelas expressões 5.6 e 5.7, respetivamente para a classe de referência e para as restantes.

$$P(Y = \text{"Classe referência"} | X) = \frac{1}{1 + e^{B_{10} + B_{11} \cdot X_1 + \dots + B_{1p} \cdot X_p} + \dots + e^{B_{n0} + B_{n1} \cdot X_1 + \dots + B_{np} \cdot X_p}} \quad (5.6)$$

$$P(Y = \text{"Classe } i" | X) = \frac{e^{B_{i0} + B_{i1} \cdot X_1 + \dots + B_{ip} \cdot X_p}}{1 + e^{B_{10} + B_{11} \cdot X_1 + \dots + B_{1p} \cdot X_p} + \dots + e^{B_{n0} + B_{n1} \cdot X_1 + \dots + B_{np} \cdot X_p}} \quad (5.7)$$

De seguida, são apresentados os modelos obtidos para dar resposta às três questões propostas na introdução do presente capítulo e apresentados alguns comentários sobre a aplicação deste método estocástico ao estudo da degradação de fachadas revestidas por ETICS.

#### 5.2.3.1. Análise probabilística da condição de degradação de fachadas de acordo com a sua idade

Na aplicação do modelo da regressão logística multinomial, é estudado o caso em que apenas se considera a influência da idade para a evolução da condição da fachada ao longo do tempo. Isto permite a criação de um cenário base, que pode ser comparado com um modelo em que seja considerada a influência das condições da fachada e do meio envolvente, permitindo perceber a gravidade desses efeitos. Por idade, entende-se o tempo decorrido desde a aplicação do revestimento ou da última ação de reabilitação.

Na Tabela 5.2, é apresentada a distribuição estatística das fachadas da amostra considerada, em função do seu nível de degradação. Os níveis 1 e 2 são os que estão mais representados na amostra.

Tabela 5.2 - Distribuição da amostra em função do nível de degradação.

Condição de degradação	Número de casos	Percentagem de casos na amostra
Nível 0	17	3,94%
Nível 1	186	43,16%
Nível 2	137	31,79%
Nível 3	66	15,31%
Nível 4	25	5,80%
Total	431	100,00%

Relativamente ao ajuste do modelo, na Tabela 5.3, são apresentados o teste do rácio da verosimilhança entre o modelo nulo e o modelo final completo, e os critérios de ajuste do modelo. Dado que os valores de AIC, BIC e -2LL do modelo final são inferiores aos do modelo nulo, o modelo final tem melhor ajuste aos dados do que o modelo nulo. Além disso,  $G^2(4) = 424,102$  e a significância é 0,000, pelo que a idade é explicativa da condição da degradação dos revestimentos, enquanto variável independente. Na Tabela 5.4, é apresentada a adequação do ajuste do modelo. Pelos valores dos testes do Qui-quadrado de Pearson e do desvio (*Deviance*), a hipótese nula não pode ser desprezada, pelo que se conclui que a

idade influencia a condição da degradação dos revestimentos. Os valores de pseudo-R<sup>2</sup> obtidos são: R<sub>CS</sub><sup>2</sup> = 0,626; R<sub>N</sub><sup>2</sup> = 0,676; R<sub>MF</sub><sup>2</sup> = 0,376, indicando um modelo com qualidade adequada.

Tabela 5.3 - Informação sobre o ajuste do modelo.

Modelo	Critérios de ajuste do modelo			Teste do rácio de verosimilhança		
	AIC	BIC	-2 log verosimilhança	Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
Modelo apenas com a constante	673,087	689,352	665,087			
Modelo final	256,986	289,515	240,986	424,102	4	0,000

Tabela 5.4 - Adequação do ajuste do modelo.

	Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
Pearson	172,659	84	0,000
Deviance	175,115	84	0,000

Relativamente ao teste de verosimilhança para as variáveis do modelo, a idade é a única variável considerada. Assim, na Tabela 5.5, obtém-se G<sup>2</sup>(4) = 424,102 e a significância é 0,000, pelo que, para os níveis de significância habituais (5% ou 10%), conclui-se que a idade influencia a condição da degradação.

Tabela 5.5 - Informação sobre o teste de verosimilhança.

Efeito	Critérios de ajuste do modelo			Teste do rácio da verosimilhança		
	AIC do modelo reduzido	BIC do modelo reduzido	-2 log verosimilhança do modelo reduzido	Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
Constante	767,596	783,860	759,596	518,610	4	0,000
Idade	673,087	689,352	665,087	424,102	4	0,000

A estatística qui-quadrado é a diferença entre -2 log da verosimilhança entre o modelo final e um modelo reduzido. O modelo reduzido é obtido pela omissão de um efeito (variável) no modelo final. A hipótese nula é a de que todos os parâmetros desse efeito são iguais a zero.

Tendo em conta as expressões 5.6 e 5.7, considerando os coeficientes de regressão do modelo apresentados na Tabela 5.6 e tomando a classe de degradação de nível 4 como referência, é possível obter as expressões 5.8 a 5.12, para calcular a probabilidade de cada condição de degradação em função da idade do revestimento. Além disso, para os níveis de significância habituais, os parâmetros do modelo são estatisticamente significativos para todas as classes.

$$P(Y = \text{"Nível 0"}) = \frac{e^{21,664 - 1,484 \cdot Idade}}{1 + e^{21,664 - 1,484 \cdot Idade} + e^{21,856 - 1,112 \cdot Idade} + e^{18,608 - 0,830 \cdot Idade} + e^{11,490 - 0,446 \cdot Idade}} \quad (5.8)$$

$$P(Y = \text{"Nível 1"}) = \frac{e^{21,856 - 1,112 \cdot Idade}}{1 + e^{21,664 - 1,484 \cdot Idade} + e^{21,856 - 1,112 \cdot Idade} + e^{18,608 - 0,830 \cdot Idade} + e^{11,490 - 0,446 \cdot Idade}} \quad (5.9)$$

$$P(Y = \text{"Nível 2"}) = \frac{e^{18,608 - 0,830 \cdot Idade}}{1 + e^{21,664 - 1,484 \cdot Idade} + e^{21,856 - 1,112 \cdot Idade} + e^{18,608 - 0,830 \cdot Idade} + e^{11,490 - 0,446 \cdot Idade}} \quad (5.10)$$

$$P(Y = \text{"Nível 3"}) = \frac{e^{11,490 - 0,446 \cdot Idade}}{1 + e^{21,664 - 1,484 \cdot Idade} + e^{21,856 - 1,112 \cdot Idade} + e^{18,608 - 0,830 \cdot Idade} + e^{11,490 - 0,446 \cdot Idade}} \quad (5.11)$$

$$P(Y = \text{"Nível 4"}) = \frac{1}{1 + e^{21,664 - 1,484 \cdot Idade} + e^{21,856 - 1,112 \cdot Idade} + e^{18,608 - 0,830 \cdot Idade} + e^{11,490 - 0,446 \cdot Idade}} \quad (5.12)$$

Na Figura 5.1, é possível observar a distribuição de probabilidades da condição de degradação ao longo do tempo. Nos pontos de interseção entre curvas correspondentes a níveis de degradação consecutivos, é possível obter a idade em que há uma maior probabilidade de transição entre condição da

degradação. Para a amostra considerada neste modelo, no instante inicial, há uma maior probabilidade de pertencer ao nível 1, do que ao nível 0. Isto pode ser justificado pelo facto de a escala usada para calcular a degradação ter uma amplitude de  $S_w$  muito pequena para o nível 0, conforme apresentado na Tabela 4.1, em 4.2.2. Como complemento à Figura 5.1, na Tabela 5.7, é apresentada a probabilidade de um revestimento pertencer a cada condição de degradação, em função da idade.

Tabela 5.6 - Estimação dos parâmetros do modelo.

Condição de degradação <sup>a</sup>		B	Erro-padrão	Wald	Graus de liberdade (gl)	Significância	Exp(B)	Intervalo de Confiança a 95% para Exp(B)	
								Limite inferior	Limite superior
Nível 0	Constante	21,664	2,991	52,480	1	0,000			
	Idade	-1,484	0,168	78,008	1	0,000	0,227	0,163	0,315
Nível 1	Constante	21,856	2,938	55,350	1	0,000			
	Idade	-1,112	0,128	75,208	1	0,000	0,329	0,256	0,423
Nível 2	Constante	18,608	2,917	40,702	1	0,000			
	Idade	-0,830	0,124	44,831	1	0,000	0,436	0,342	0,556
Nível 3	Constante	11,490	2,714	17,922	1	0,000			
	Idade	-0,446	0,108	17,147	1	0,000	0,640	0,519	0,791

a. A categoria de referência é: Nível 4.

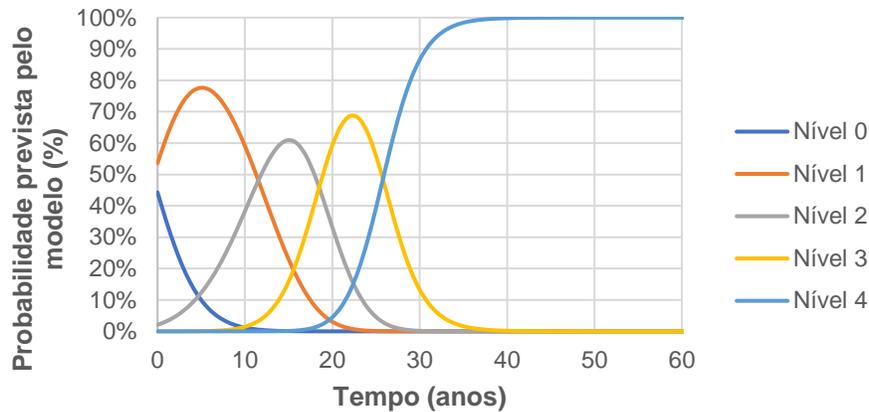


Figura 5.1 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade dos revestimentos da amostra em estudo.

Tabela 5.7 - Probabilidade de um revestimento pertencer a cada um dos níveis de degradação, em função da idade.

Intervalo	Probabilidade de pertencer a cada condição de degradação				
	Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
[0;5]	25,05%	68,59%	6,34%	0,02%	0,00%
]5;10]	3,47%	69,24%	26,66%	0,63%	0,00%
]10;15]	0,32%	37,26%	54,40%	7,98%	0,04%
]15;20]	0,01%	9,03%	48,05%	41,08%	1,83%
]20;25]	0,00%	0,69%	13,39%	64,31%	21,60%
]25;30]	0,00%	0,01%	1,03%	28,45%	70,50%
]30;35]	0,00%	0,00%	0,03%	4,57%	95,40%
]35;40]	0,00%	0,00%	0,00%	0,52%	99,48%
]40;45]	0,00%	0,00%	0,00%	0,06%	99,94%
]45;50]	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	99,99%
]50;55]	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
]55;60]	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

Na Tabela 5.8, é apresentada a capacidade classificativa do modelo, contrapondo o número de casos observados na amostra para cada nível de degradação, com aqueles que o modelo estima. De acordo com o modelo, 53,4% dos casos pertencem ao nível 1 e 0% dos casos correspondem ao nível 0. A percentagem, de casos corretamente estimados é de 60,3%. Novamente, conclui-se que o modelo assenta numa escala em que  $S_w$  varia abruptamente entre os dois primeiros níveis, o que se revela problemático para os dados concretos da amostra.

Tabela 5.8 - Classificação do modelo.

Casos observados	Casos previstos					Percentagem de casos corretamente classificados
	Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	
Nível 0	0	17	0	0	0	0,0%
Nível 1	0	156	30	0	0	83,9%
Nível 2	0	55	60	22	0	43,8%
Nível 3	0	2	22	22	20	33,3%
Nível 4	0	0	0	3	22	88,0%
Percentagem global	0,0%	53,4%	26,0%	10,9%	9,7%	60,3%

#### 5.2.3.2. Análise probabilística da condição de degradação de fachadas de acordo com as suas características explicativas

Uma vez estabelecido um modelo para quantificar a influência da idade na evolução da degradação dos ETICS, é relevante considerar o efeito das características da fachada e seu meio envolvente na condição de degradação dos revestimentos. Para tal, é criado um modelo adicional, onde são incluídas as variáveis independentes com maior capacidade explicativa da variável dependente. A determinação dessas variáveis foi feita por sucessiva eliminação, até restarem apenas as mais adequadas. Assim, as variáveis incluídas no modelo são: **exposição à humidade** e **textura do revestimento** da fachada. Apesar de o efeito da idade ter sido analisado no modelo anterior, o mesmo foi analisado isoladamente. No presente modelo, interessa explicar o seu efeito em conjunto com outras variáveis. No caso da textura, esta é uma característica do material que constitui o revestimento. Por sua vez, a exposição à humidade é uma característica de exposição do meio envolvente da fachada.

A Tabela 5.9 apresenta a distribuição estatística das fachadas da amostra considerada, em função do seu nível de degradação e da classe assumida por cada uma das variáveis independentes. As fachadas com exposição alta à humidade são as que estão mais representadas na amostra e as fachadas com acabamento de textura lisa são as menos frequentes. Algumas classes não possuem nenhum caso de estudo na amostra analisada, o que é explicado pelo facto de se dividir a amostra inicial em várias categorias (conjuntos de fachadas com características muito particulares), o que dificulta a obtenção de casos de estudo estatisticamente significantes em cada subgrupo da amostra.

Quanto ao ajuste do modelo, na Tabela 5.10, são apresentados o teste do rácio da verosimilhança entre o modelo nulo e o modelo final completo, e os critérios de ajuste do modelo. Como os valores de AIC, BIC e -2LL do modelo final são inferiores aos do modelo nulo, o modelo final tem melhor ajuste aos dados. Além disso, para os níveis de significância habituais, as variáveis são explicativas da condição da

degradação. Na Tabela 5.11, é apresentada a adequação do ajuste do modelo. Pelos valores do teste do Qui-quadrado de Pearson e do desvio (*Deviance*), a hipótese nula é aceita, pelo que se conclui que o modelo se ajusta aos dados, para os níveis de significância habituais. Os valores de pseudo- $R^2$  obtidos são:  $R_{CS}^2 = 0,665$ ;  $R_N^2 = 0,717$ ;  $R_{MF}^2 = 0,418$ , indicando um modelo com qualidade adequada.

Tabela 5.9 - Distribuição da amostra em função do nível de degradação.

	Condição de degradação	Número de casos	Porcentagem de casos na amostra
Humidade ALTA; Textura LISA	Nível 0	0	0,00%
	Nível 1	6	1,39%
	Nível 2	2	0,46%
	Nível 3	1	0,23%
	Nível 4	0	0,00%
Humidade ALTA; Textura RUGOSA	Nível 0	17	3,94%
	Nível 1	91	21,11%
	Nível 2	68	15,78%
	Nível 3	50	11,60%
	Nível 4	21	4,87%
Humidade BAIXA; Textura LISA	Nível 0	0	0,00%
	Nível 1	21	4,87%
	Nível 2	21	4,87%
	Nível 3	11	2,55%
	Nível 4	0	0,00%
Humidade BAIXA; Textura RUGOSA	Nível 0	0	0,00%
	Nível 1	68	15,78%
	Nível 2	46	10,67%
	Nível 3	4	0,93%
	Nível 4	4	0,93%

Tabela 5.10 - Informação sobre o ajuste do modelo.

Modelo	Critérios de ajuste do modelo			Teste do rácio de verosimilhança		
	AIC	BIC	-2 log verosimilhança	Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
Modelo apenas com constante	734,606	750,871	726,606			
Modelo final	287,437	352,494	255,437	471,169	12	0,000

Tabela 5.11 - Adequação do ajuste do modelo.

	Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
Pearson	215,241	140	0,000
Deviance	177,795	140	0,017

Relativamente ao teste de verosimilhança para as variáveis independentes do modelo, de acordo com a Tabela 5.12, para os níveis de significância habituais, conclui-se que as variáveis consideradas influenciam a condição da degradação dos revestimentos por ETICS.

Tabela 5.12 - Informação sobre o teste de verosimilhança.

Efeito	Critérios de ajuste do modelo			Teste do rácio da verosimilhança		
	AIC do modelo reduzido	BIC do modelo reduzido	-2 log verosimilhança do modelo reduzido	Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
Constante	287,437	352,494	255,437a	0,000	0	
Idade	696,804	745,598	672,804	417,367	4	0,000
Cor	287,261	336,054	263,261	7,824	4	0,098
Textura	306,535	355,328	282,535	27,098	4	0,000

A estatística do qui-quadrado é a diferença entre -2 log da verosimilhança entre o modelo final e um modelo reduzido. O modelo reduzido é obtido pela omissão de um efeito (variável) no modelo final. A hipótese nula é a de que todos os parâmetros do efeito são iguais a zero.

a. Este modelo reduzido é equivalente ao modelo final, pelo que a omissão do efeito não aumenta os graus de liberdade.

Tendo em conta a Tabela 5.13, para os níveis de significância habituais, a idade é estatisticamente significativa em todos os níveis de degradação, mas a humidade e a textura não o são. Contudo, o modelo mantém-se relevante, por permitir analisar a influência conjunta de variáveis independentes com o efeito da idade do revestimento. Neste caso particular, essas variáveis dizem respeito a características do próprio revestimento e a características do meio envolvente.

Na Figura 5.2, é apresentada a distribuição probabilística da degradação, em função da classe assumida pelas variáveis independentes. Complementarmente, a Tabela 5.14 apresenta o resumo da probabilidade de pertencer a cada condição de degradação, em função dos atributos da fachada.

Na Figura 5.3, é apresentada a informação sobre os instantes onde é máxima a probabilidade de se atingir o fim da vida útil, quando  $S_w$  atinge o valor de 30%, o que corresponde à transição do nível 2 de degradação, para o nível 3 de degradação, conforme a Tabela 4.1.

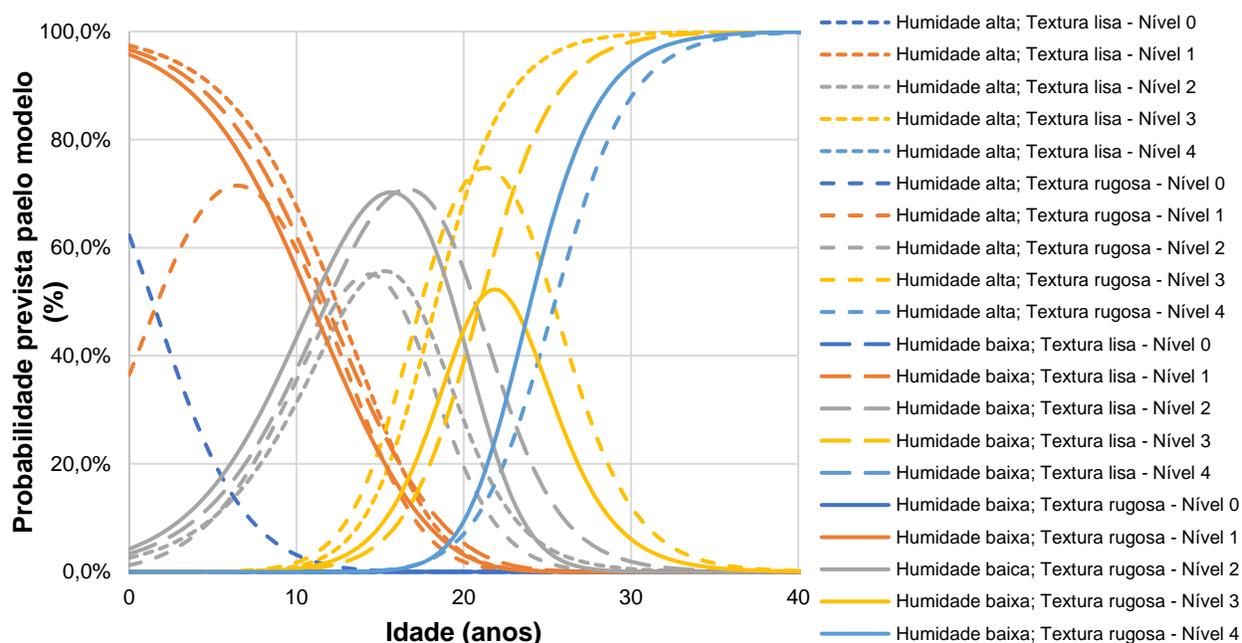


Figura 5.2 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade, da textura e da exposição à humidade dos revestimentos da amostra em estudo.

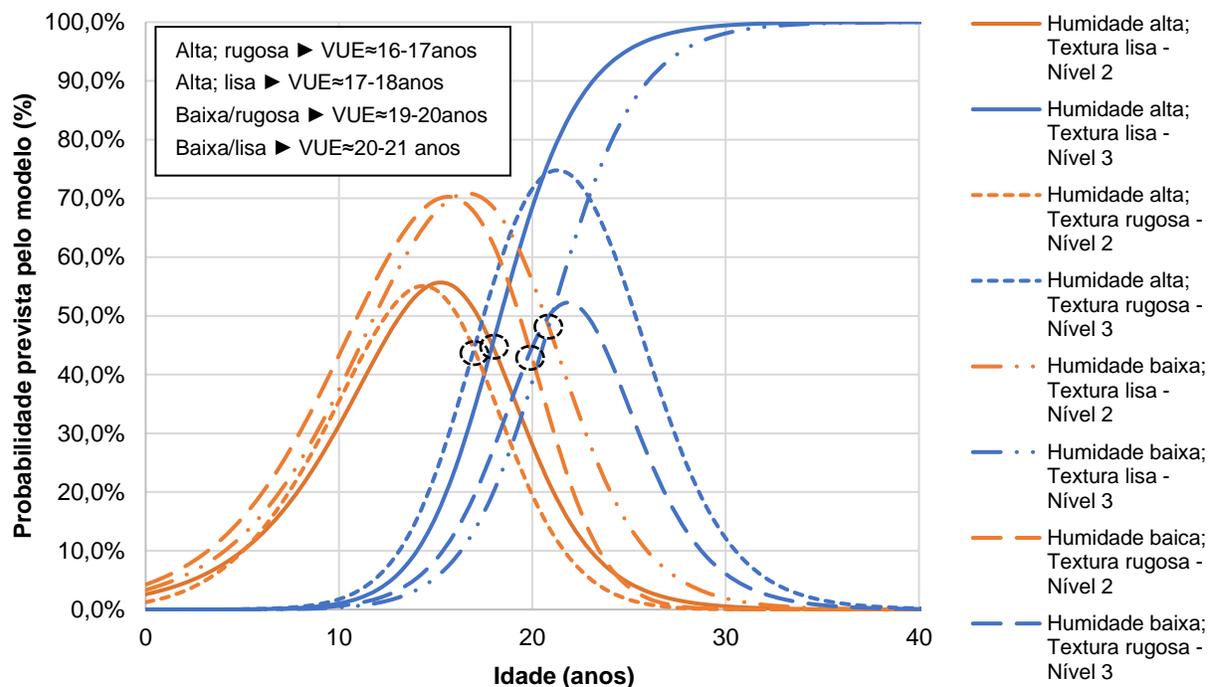


Figura 5.3 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade, da textura e da exposição à humidade dos revestimentos da amostra em estudo, para os níveis 2 e 3 de degradação.

Tabela 5.13 - Estimação dos parâmetros do modelo.

Condição de degradação <sup>a</sup>	B	Erro-padrão	Wald	Graus de liberdade (gl)	Significância	Exp(B)	Intervalo de Confiança a 95% para Exp(B)	
							Limite inferior	Limite superior
Nível 0	Constante	3,024	3,075	0,967	1	0,325		
	Idade	-1,496	0,166	81,031	1	0,000	0,224	0,162 0,310
	Textura="Liso"	2,004	6555,256	0,000	1	1,000	7,419	0,000 .b
	Textura="Rugoso"	0c			0			
	Humidade="Alta"	19,141	0,000		1		.b	.b .b
	Humidade="Baixa"	0c			0			
Nível 1	Constante	21,867	3,358	42,408	1	0,000		
	Idade	-1,147	0,137	70,209	1	0,000	0,317	0,243 0,415
	Textura="Liso"	19,695	4108,661	0,000	1	0,996	.b	0,000 .b
	Textura="Rugoso"	0c			0			
	Humidade="Alta"	-0,237	1,851	0,016	1	0,898	0,789	0,021 29,691
	Humidade="Baixa"	0c			0			
Nível 2	Constante	18,748	3,337	31,563	1	0,000		
	Idade	-0,861	0,133	41,837	1	0,000	0,423	0,325 0,549
	Textura="Liso"	19,446	4108,661	0,000	1	0,996	.b	0,000 .b
	Textura="Rugoso"	0c			0			
	Humidade="Alta"	-0,499	1,838	0,074	1	0,786	0,607	0,017 22,299
	Humidade="Baixa"	0c			0			
Nível 3	Constante	10,172	3,114	10,670	1	0,001		
	Idade	-0,430	0,109	15,652	1	0,000	0,650	0,525 0,805
	Textura="Liso"	19,037	4108,661	0,000	1	0,996	.b	0,000 .b
	Textura="Rugoso"	0c			0			
	Humidade="Alta"	0,758	1,819	0,174	1	0,677	2,134	0,060 75,408
	Humidade="Baixa"	0c			0			

a. A categoria de referência é: Nível 4.

b. O valor resultante é superior à tolerância admitida.

c. Este parâmetro é definido para zero porque é redundante.

Tabela 5.14 - Probabilidade de um revestimento pertencer a cada um dos níveis de degradação, em função da sua textura e cor.

Atributos	Probabilidade de pertencer a cada condição de degradação				
	Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Humidade ALTA; Textura LISA	0,00%	66,67%	22,22%	11,11%	0,00%
Humidade ALTA; Textura RUGOSA	6,88%	36,84%	27,53%	20,24%	8,50%
Humidade BAIXA; Textura LISA	0,00%	39,62%	39,62%	20,75%	0,00%
Humidade BAIXA; Textura RUGOSA	0,00%	55,74%	37,70%	3,28%	3,28%

Na Tabela 5.15, é apresentada a capacidade classificativa do modelo, contrapondo o número de casos observados na amostra para cada nível de degradação, com aqueles que o modelo estima. O modelo classifica corretamente 65,2% dos casos da amostra, sendo os níveis 1 e 4 os que o modelo classifica corretamente um maior número de vezes. Algumas classes têm probabilidade nula de ocorrência, o que se explica pelo facto de a amostra não permitir representatividade suficiente sobre essas combinações de atributos.

Tabela 5.15 - Classificação do modelo.

Casos observados	Casos previstos					Percentagem de casos corretamente classificados
	Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	
Nível 0	6	11	0	0	0	35,3%
Nível 1	1	155	24	6	0	83,3%
Nível 2	0	55	69	13	0	50,4%
Nível 3	0	2	19	29	16	43,9%
Nível 4	0	0	0	3	22	88,0%
Percentagem global	1,6%	51,7%	26,0%	11,8%	8,8%	65,2%

### 5.2.3.3. Análise probabilística de se atingir o fim da vida útil

Numa perspetiva de planeamento das ações de manutenção das fachadas, é relevante possuir informação sobre o momento com maior probabilidade de ser atingido o fim da vida útil, de modo a otimizar as intervenções. Assim, pode ser considerado um modelo de regressão logística binomial, para dar resposta à questão “fim da vida útil foi atingido?”, com duas classes mutuamente exclusivas, “sim” e “não”.

De modo a construir o modelo de regressão logística binomial, foi considerado o método *Forward* baseado no rácio das verosimilhanças para selecionar as variáveis independentes que melhor explicam o comportamento da variável dependente. Este método consiste em selecionar variáveis passo a passo, partindo dum modelo sem variáveis e adicionando uma de cada vez ao modelo final, interrompendo quando é atingido um critério de paragem, com base na estimativa parcial da máxima verosimilhança do modelo (Silva et al., 2016).

À semelhança do que se apresenta para a regressão multinomial, também a análise binomial assenta num modelo base, que apenas considera a influência da idade na evolução da degradação, e num modelo com diversas variáveis explicativas.

A informação referente à idade para a qual é atingida a vida útil para todos os modelos desenvolvidos no âmbito desta investigação encontra-se no Anexo VI, incluindo informações sobre o modelo base, modelos com a ação individual de variáveis explicativas e um modelo adicional, onde se considera a ação conjunta de duas variáveis.

Na Tabela 5.16, é apresentado o resultado do teste aos coeficientes do modelo, o qual indica o

rácio de verossimilhanças entre o modelo nulo em cada um dos passos, blocos e modelo final. Dado que o modelo de base só contempla a idade, apenas é dada uma iteração, havendo um único passo, bloco e modelo. Como  $G^2(4) = 424,102$  e a significância é 0,000, a idade é uma variável independente do modelo que é estatisticamente significativa. Na Tabela 5.17, é apresentado o sumário do modelo e o teste de Hosmer e Lemeshow. Os valores de pseudo- $R^2$  obtidos são:  $R_{CS}^2 = 0,449$ ;  $R_N^2 = 0,696$ , indicando um modelo com qualidade aceitável. Para os resultados apresentados no teste de Hosmer e Lemeshow, conclui-se que os valores estimados pelo modelo são próximos dos observados na amostra.

Tabela 5.16 - Teste aos coeficientes do modelo.

		Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
Passo 1	Passo	257,194	1	0,000
	Bloco	257,194	1	0,000
	Modelo	257,194	1	0,000

Tabela 5.17 - Sumário do modelo e teste de Hosmer e Lemeshow.

Passo 1	Sumário do modelo			Teste de Hosmer e Lemeshow		
	-2LL (Log verossimilhança)	R <sup>2</sup> de Cox e Snell	R <sup>2</sup> Nagelkerke	Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
	189,754 <sup>a</sup>	0,449	0,696	14,539	7	0,042

a. A estimação do parâmetro parou na sétima iteração, porque a variação foi inferior a 0,001.

Relativamente à capacidade classificativa do modelo, na Tabela 5.18, é possível constatar que o modelo classifica corretamente 89,6% dos casos da amostra, revelando um bom desempenho.

Tabela 5.18 - Classificação do modelo.

Casos observados		Casos previstos		
		Atingiu o fim da vida útil?		Percentagem dos casos corretamente classificados
		Não	Sim	
Atingiu o fim da vida útil?	Não	318	21	93,8%
	Sim	24	68	73,9%
Percentagem global				89,6%

Considerando os coeficientes de regressão do modelo apresentados na Tabela 5.19, é possível obter a expressão 5.13, para calcular a probabilidade de ser atingida a vida útil, em função da idade do revestimento. Além disso, para os níveis de significância habituais, os parâmetros do modelo são estatisticamente significativos.

$$P(Y = \text{"Atingir o fim da vida útil"}) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-8,974 + 0,484 \cdot \text{Idade}}} \quad (5.13)$$

Tabela 5.19 - Estimação dos parâmetros do modelo.

	B	Erro-padrão	Teste de Wald	Graus de liberdade (gl)	Significância	Exp(B)	Intervalo de Confiança a 95% para Exp(B)	
							Limite inferior	Limite superior
Idade	0,484	0,058	69,342	1	0,000	1,623	1,448	1,818
Constante	-8,974	1,011	78,733	1	0,000	0,000		

Na Figura 5.4, é apresentada distribuição de probabilidade de a vida útil das fachadas ser atingida, em função da idade. Para uma idade de cerca de 18 anos, há uma probabilidade de 50% de se atingir o

fim da vida útil. Para 23 anos, o valor dessa probabilidade passa para 90%.

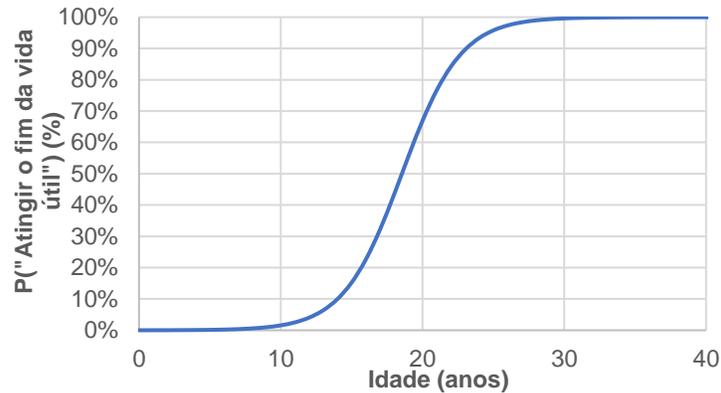


Figura 5.4 - Distribuição da probabilidade de se atingir o fim da vida útil, em função da idade das fachadas.

Depois de definido o modelo base, o qual apenas contabiliza a influência da idade na evolução da degradação do revestimento, é possível criar um modelo que tenha em conta o efeito das condições de exposição da fachada e do meio envolvente. Assim, aplicando o método *Forward*, para a amostra em estudo, chega-se a um modelo que considera a ação da idade, do efeito combinado da chuva-vento e da exposição aos agentes poluentes, que são características do meio envolvente e da exposição da fachada.

Tabela 5.20 - Teste aos coeficientes do modelo.

		Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
<b>Passo 1</b>	<b>Passo</b>	289,086	3	0,000
	<b>Bloco</b>	289,086	3	0,000
	<b>Modelo</b>	289,086	3	0,000

A Tabela 5.20 apresenta o resultado do teste aos coeficientes do modelo. Como  $G^2(3) = 289,086$  e a significância é 0,000, as variáveis independentes do modelo são estatisticamente significativas. Na Tabela 5.21, é apresentado o sumário do modelo e o teste de Hosmer e Lemeshow. Os valores de pseudo- $R^2$  obtidos são:  $R^2_{CS} = 0,489$ ;  $R^2_N = 0,757$ , indicando um modelo com qualidade aceitável. Para os resultados apresentados no teste de Hosmer e Lemeshow, como  $G^2(8) = 7,394$  e a significância é 0,495, conclui-se que os valores estimados pelo modelo não são tão próximos dos observados na amostra, quanto os do modelo base.

Tabela 5.21 - Sumário do modelo e teste de Hosmer e Lemeshow.

<b>Passo 1</b>	Sumário do modelo			Teste de Hosmer e Lemeshow		
	-2LL (Log verossimilhança)	$R^2$ de Cox e Snell	$R^2$ Nagelkerke	Qui-quadrado	Graus de liberdade (gl)	Significância
	157,862 <sup>a</sup>	0,489	0,757	7,394	8	0,495

a. A estimação do parâmetro parou na oitava iteração, porque a variação foi inferior a 0,001.

Quanto à capacidade classificativa do modelo, pela análise da Tabela 5.22, é possível comprovar que o modelo classifica corretamente 90,7% dos casos da amostra. O valor é superior, face ao modelo de base, mas não é substancialmente mais eficiente. O aumento do número de variáveis explicativas traduziu-se apenas num ganho modesto de capacidade classificativa.

Tendo em conta os coeficientes de regressão do modelo apresentados na Tabela 5.23, é possível obter a expressão 5.14, a qual pode ser aplicada para calcular a probabilidade de ser atingida a vida útil,

em função da idade do revestimento, da sua exposição aos agentes poluentes e da ação combinada da chuva e vento. Além disso, para os níveis de significância habituais, os parâmetros do modelo são estatisticamente significativos.

$$P(Y = \text{"Atingir o fim da vida útil"}) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-17,200 + 0,703 \cdot Idade + 3,456 \cdot Vento + 2,528 \cdot Poluentes}} \quad (5.14)$$

Tabela 5.22 - Classificação do modelo.

Casos observados		Casos previstos		
		Atingiu o fim da vida útil?		Percentagem dos casos corretamente classificados
		Não	Sim	
Atingiu o fim da vida útil?	Não	326	13	96,2%
	Sim	27	65	70,7%
Percentagem global				90,7%

Tabela 5.23 - Estimação dos parâmetros do modelo.

	B	Erro-padrão	Teste de Wald	Graus de liberdade (gl)	Significância	Exp(B)	Intervalo de Confiança a 95% para Exp(B)	
							Limite inferior	Limite superior
<b>Idade</b>	0,703	0,089	62,374	1	0,000	2,021	1,697	2,406
<b>Ação chuva-vento</b>	3,456	1,114	9,631	1	0,002	31,681	3,572	280,965
<b>Exposição agentes poluentes</b>	2,528	0,529	22,832	1	0,000	12,525	4,441	35,324
<b>Constante</b>	-17,200	2,340	54,026	1	0,000	0,000		

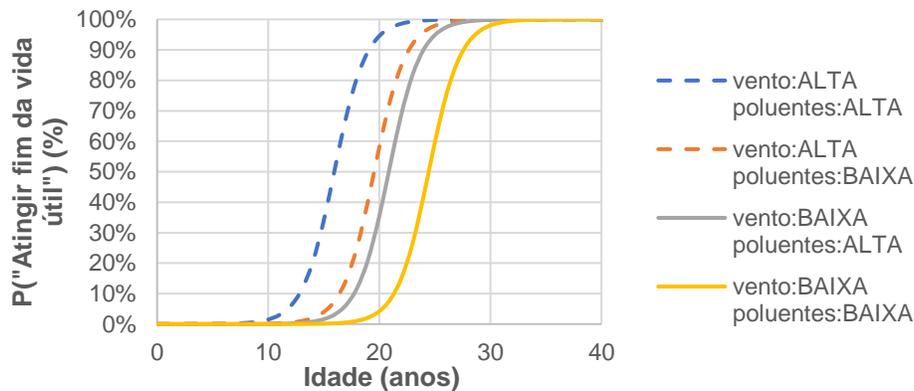


Figura 5.5 - Distribuição da probabilidade de se atingir o fim da vida útil, em função da idade das fachadas, da exposição à ação da chuva-vento e da exposição aos agentes poluentes.

Por último, na Figura 5.5, é apresentada distribuição de probabilidade de a vida útil das fachadas ser atingida, em função da idade, da exposição aos agentes poluentes e da ação combinada da chuva e vento. Para as diversas curvas, a probabilidade de 50% de se atingir a vida útil ocorre entre 15 e 24 anos. Para o valor da probabilidade igualar 90%, as fachadas têm idade entre 19 e 28 anos. No que concerne ao posicionamento relativo entre as quatro curvas, faz sentido que a vida útil seja atingida primeiro quando a fachada está mais exposta à ação alta dos dois efeitos e que seja atingida mais tarde quando a ação dos agentes ambientais de degradação é baixa.

### 5.3. Cadeias de Markov

#### 5.3.1. Considerações gerais

Na modelação da degradação de um elemento construtivo, é possível considerar a evolução do nível de degradação ao longo do tempo como sendo um processo contínuo, o qual pode ser descrito por um conjunto de transições entre diferentes estados de degradação (Tee et al., 2018). Assim, é possível a aplicação do método das cadeias de Markov à construção de um modelo estocástico para análise da evolução da degradação.

As cadeias de Markov permitem a estimação da probabilidade do desempenho de um elemento construtivo em um dado instante, partindo apenas do estado atual de desempenho desse elemento e da sua idade, não sendo necessário conhecer todo o histórico do desempenho. Esta propriedade das cadeias de Markov designa-se por “perda de memória” (Phamdo et al., 1997). Assim, Silva et al. (2016) concluem que este método é de aplicação bastante expedita na modelação da degradação de diversos elementos construtivos, devido à reduzida quantidade de dados necessários para construir um modelo, o que facilita a obtenção de informação de suporte à tomada de decisões relativamente a ações de inspeção e manutenção, quer de edifícios, como um todo, quer de elementos construtivos, de modo independente.

Por comparação com os modelos determinísticos, as cadeias de Markov têm como **vantagens: i)** permitirem criar modelos de previsão da vida útil, partindo de informação sobre a degradação em apenas dois instantes do tempo - o instante em que o elemento é colocado em serviço, com degradação nula e idade igual a zero anos, e o instante em que se realiza a inspeção, com a degradação quantificada em campo e idade igual à idade do elemento nessa data (sendo igual à idade do edifício, se o elemento nunca tiver sido alvo de ações de manutenção, ou igual à duração desde a última intervenção, se o elemento tiver sido alvo de ações de manutenção); **ii)** permitirem extrapolar o desempenho dos elementos construtivos, mesmo quando não se tem informação sobre o estado de desempenho durante um dado período de tempo; **iii)** não ser necessário recorrer a técnicas de regressão, o que faz com que não haja correlação entre os diversos fatores que explicam o fenómeno de degradação; **iv)** permitirem avaliar a transição entre diferentes estados de degradação do elemento construtivo. Por outro lado, as cadeias de Markov apresentam como maior **desvantagem** o facto de dependerem de inspeções visuais para a recolha dos dados usados na construção dos modelos, ou seja, estarem dependentes da precisão dos dados de campo. Esta desvantagem é comum à maioria dos modelos estatísticos e de previsão da vida útil presentes na literatura.

#### 5.3.2. Metodologia de construção dos modelos

Na construção de modelos de previsão da vida útil baseados nas cadeias de Markov, é possível considerar os níveis de degradação que a fachada pode exibir como sendo estados discretos entre os quais se transita ao longo do tempo (Hirano e Aki, 1993). Além disso, os processos de Markov são caracterizados por duas propriedades fundamentais: a “perda de memória”, conforme referido, e a homogeneidade, que significa que as taxas de transição entre estados se mantêm constantes ao longo do tempo (Ng e Moses, 2014).

Os modelos de Markov podem ser separados entre modelos baseados em cadeias de Markov em tempo discreto e em tempo contínuo (Lu, 2009). No contexto da modelação da vida útil de elementos construtivos, o modelo baseado em tempo discreto é aplicável a edifícios sujeitos a ações de inspeção e manutenção de periodicidade fixa, enquanto o modelo baseado em tempo contínuo está associado a edifícios onde não há uma periodicidade regular nas ações de inspeção e manutenção. Tendo em conta a amostra considerada na presente investigação, dado que apenas se conhece a informação para o instante em que o edifício entrou em serviço (por hipótese, admite-se que a degradação é nula nesse momento) e para o instante em que é realizada a inspeção visual, como não se está perante uma amostra associada a periodicidade fixa nas inspeções, recorre-se a modelos baseados em tempo contínuo. Neste tipo de cadeias de Markov, as transições de estado ocorrem em instantes aleatórios.

Para criar modelos baseados em cadeias de Markov, é necessário definir uma matriz de transição,  $P$ , que indique as probabilidades de transição entre os diferentes estados de degradação possíveis (Craig e Sendi, 2002). No contexto da investigação realizada, os estados considerados coincidem com os níveis de degradação propostos por Ximenes et al. (2015), conforme apresentado no Capítulo 3. No caso particular dos modelos em tempo contínuo, a matriz de transição toma o nome de matriz intensidade ou matriz geradora infinitesimal,  $Q$ . Esta é composta por elementos  $q_{ii}$  e  $q_{ij}$  (onde  $i \neq j$ ), garantindo as seguintes propriedades: **i)**  $\sum_{j \in C} q_{ij} = -q_{ii}$ , ou seja, os elementos da diagonal são tais que a soma de cada linha da matriz seja igual a zero; **ii)**  $q_{ij} \geq 0$  para  $j - i = 1$ , ou seja, todos os elementos imediatamente à direita da diagonal principal da matriz são não negativos, exceto na última linha da matriz, que corresponde ao pior estado de degradação do elemento, onde não existe nenhum elemento à direita da diagonal; **iii)**  $q_{ij} = 0$  para  $i > j$ , para  $j - i > 1$  e para  $i, j = n$ , ou seja, abaixo da diagonal principal da matriz, duas ou mais colunas à direita da diagonal principal e na última célula da matriz, respetivamente. De modo a facilitar a compreensão visual destas propriedades, é apresentada uma matriz genérica na expressão 5.15.

$$Q = \begin{bmatrix} -q_{0,1} & q_{0,1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -q_{1,2} & -q_{1,2} & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & -q_{2,3} & q_{2,3} & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & -q_{n-1,n} & q_{n-1,n} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Segundo Norris (1998), conhecendo as taxas de transição, o sistema de equações diferenciais de Chapman-Kolmogorov permite calcular a probabilidade de permanência ou de transição entre estados de condição, conforme a expressão 5.16.

$$\frac{d}{dt} P(\Delta t) = Q \cdot P(\Delta t) \quad (5.16)$$

A expressão 5.17 indica a solução do sistema de equações diferenciais, onde  $\exp(Q \cdot \Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Delta t^n \cdot Q^n}{n!}$ . Recorrendo a esta expressão, é possível relacionar as matrizes  $P$  e  $Q$ :

$$P(\Delta t) = \exp(Q \cdot \Delta t) \quad (5.17)$$

De modo a estimar os valores da matriz  $Q$ , recorre-se ao método de Jackson (2007), no qual a taxa de transição entre estados é dada pela expressão 5.18, onde  $n_{ij}$  representa o número de fachadas a

transitar do estado  $i$  para o estado  $j$  e  $\sum \Delta t_i$  representa o somatório dos intervalos de tempo entre inspeções para os elementos que têm  $i$  como estado inicial.

$$\theta_i = Q_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum \Delta t_i} \quad (5.18)$$

Para que o modelo de degradação seja eficaz na previsão da vida útil, é necessário proceder à sua otimização. De um modo semelhante ao caso da regressão logística, recorre-se à verosimilhança. Assim, pretende-se estimar os parâmetros do modelo, de modo a maximizar a probabilidade de os valores previstos pelo modelo serem o mais próximos possível dos valores reais observados na amostra. A expressão 5.19 sumariza o método proposto por Kalbfleisch e Lawless (1985) e por Kay (1986) para determinação da verosimilhança,  $L$ , para cadeias de Markov em tempo contínuo, onde  $n$  representa o número de fachadas,  $m$  representa o número de intervalos de tempo entre inspeções e  $P_{ij}$  representa a probabilidade de transição entre os estados  $i$  e  $j$ . Gu e Kong (1998) propõem que a estimação da verosimilhança ocorra em simultâneo com o cálculo iterativo da matriz  $Q$ , até que seja atingido um critério de paragem previamente definido.

$$L = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m P_{ij} \quad (5.19)$$

Uma vez definido e otimizado o modelo, a maneira mais expedita de avaliar a sua eficiência passa por comparar o número de casos observados pertencentes a cada estado de degradação, com o número de casos estimados para esses mesmos estados de degradação. O modelo também pode ser usado para tirar conclusões relativamente ao tempo de permanência em cada condição de degradação. Para tal, ao aplicar a expressão 5.20, é possível obter essa informação, onde  $T_i$  é o tempo de permanência em cada estado de degradação  $i$ , com  $i = 1, 2, \dots, n$ , e  $q_{ij}$  são os elementos da matriz  $Q$ .

$$T_i = \frac{1}{q_{ij}} \quad (5.20)$$

### 5.3.3. Aplicação à previsão de vida útil de revestimentos ETICS

Os modelos baseados nas cadeias de Markov considerados na presente dissertação são construídos com recurso ao programa MATLAB, para proceder à otimização da matriz  $Q$ . À semelhança do caso da regressão logística, os dados utilizados nos modelos são os resultantes do tratamento estatístico da amostra final, após concluir o trabalho de campo. Adicionalmente, é considerada a mesma escala da degradação proposta por Ximenes et al. (2015) e apresentada no Capítulo 3.

São agora apresentados os modelos obtidos, tendo em vista responder às três questões propostas na introdução do capítulo e comentar a aplicação deste método estocástico ao estudo da evolução da degradação de fachadas com esta solução de isolamento térmico. Nos Anexos VII, VIII e IX, é possível encontrar informação resumida sobre todos os modelos de Markov que foram criados no contexto da investigação, para o cenário base e para a influência de cada atributo sobre o desempenho da fachada ao longo do tempo.

De igual modo ao que se considerou para a regressão logística, também para as cadeias de Markov é considerado um modelo base, em que apenas se analisa a influência da idade da fachada sobre a evolução da degradação. Ao aplicar o algoritmo de otimização à matriz  $Q$ , é possível obter o tempo de permanência em cada estado de degradação, conforme indicado na expressão 5.20. Na Figura 5.6, é possível visualizar essas durações, bem como perceber em que instantes é que ocorrem as transições

entre os diversos níveis de degradação. O nível 0 é aquele em que as fachadas se encontram menos tempo; à medida que o nível sobe, também aumenta o tempo de permanência, o que pode ser explicado pelos intervalos considerados para o  $S_w$  de cada nível de degradação.

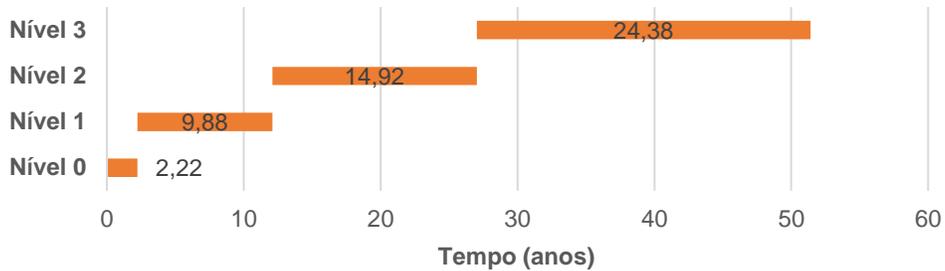


Figura 5.6 - Tempo médio de permanência em cada nível da condição de degradação.

Na Figura 5.7, é ilustrada a distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo, cuja informação é complementada pela Tabela 5.24, onde é apresentada a probabilidade de um revestimento pertencer a um dado nível de degradação, em função da idade. É possível observar que há uma boa distribuição entre os diversos níveis, revelando boa cobertura do comportamento de degradação.

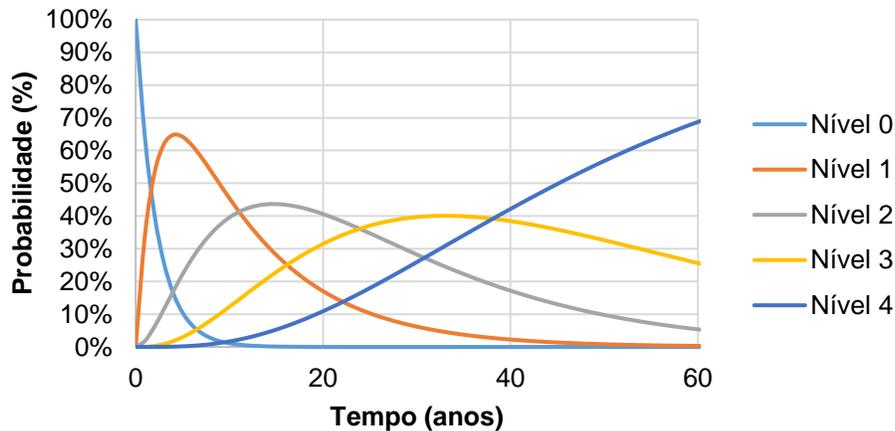


Figura 5.7 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade dos revestimentos da amostra em estudo.

Tabela 5.24 - Probabilidade de um revestimento pertencer a cada um dos níveis de degradação, em função da idade.

Intervalo	Probabilidade de pertencer a cada condição de degradação				
	Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
[0;5]	42,86%	46,36%	9,75%	0,99%	0,05%
[5;10]	3,30%	53,72%	33,84%	8,23%	0,92%
[10;15]	0,35%	34,50%	42,81%	18,68%	3,66%
[15;20]	0,04%	21,02%	42,18%	28,25%	8,51%
[20;25]	0,00%	12,70%	37,17%	35,07%	15,06%
[25;30]	0,00%	7,66%	30,82%	38,84%	22,69%
[30;35]	0,00%	4,62%	24,59%	39,98%	30,81%
[35;40]	0,00%	2,78%	19,12%	39,14%	38,95%
[40;45]	0,00%	1,68%	14,61%	36,94%	46,77%
[45;50]	0,00%	1,01%	11,01%	33,93%	54,05%
[50;55]	0,00%	0,61%	8,21%	30,52%	60,66%
[55;60]	0,00%	0,37%	6,07%	27,00%	66,56%

Na Tabela 5.25, é resumida a capacidade classificativa do modelo, permitindo avaliar a sua eficiência. Para os níveis 0 e 4, o erro percentual médio foi elevado, o que pode ser explicado pelo facto de haver poucos casos pertencentes a essas classes. Para os restantes níveis, o erro foi inferior a 10%. Assim, considera-se que o modelo é adequado para classificar os casos analisados.

Tabela 5.25 - Capacidade classificativa do modelo.

Condição de degradação	Casos observados	Casos previstos	Erro percentual médio (%)
Nível 0	17	20,7655	22,15%
Nível 1	186	168,7933	9,25%
Nível 2	137	148,0024	8,03%
Nível 3	66	72,0603	9,18%
Nível 4	25	21,3785	14,49%

Na Figura 5.8, é mostrada a evolução da probabilidade de ser atingida a vida útil, em função da idade do revestimento. Para uma idade de cerca de 23 anos, a probabilidade é de 50%. Para uma idade de cerca de 51 anos, a probabilidade é de 90%.

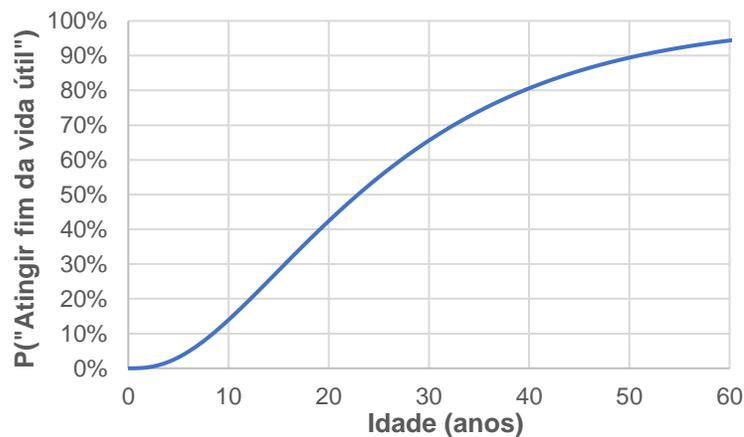


Figura 5.8 - Distribuição da probabilidade de se atingir o fim da vida útil, em função da idade das fachadas.

Tendo apresentado o modelo base, procede-se à análise do modelo composto por diversas variáveis. À semelhança do método anterior, também o modelo adicional desenvolvido com recurso às cadeias de Markov considera a ação da idade em conjunto com algumas variáveis explicativas. Neste caso, considera-se o efeito da exposição à humidade e o efeito da distância ao mar.

Na Figura 5.9, é possível observar o tempo de permanência em cada estado de degradação, e identificar os instantes onde ocorrem as transições entre os diversos níveis de degradação. Consta-se que a exposição alta à humidade conduz a transições entre níveis mais cedo do que a exposição baixa e que a distância ao mar inferior a cinco quilómetros conduz a transições entre níveis mais cedo do que a distância ao mar superior. Estes resultados fazem sentido do ponto de vista físico, pois indicam que a humidade e os cloretos provenientes da brisa salina são fatores expressivos na evolução da degradação das fachadas com ETICS.

Na Figuras 5.10 e 5.11, apresenta-se a distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo, em complemento com a Tabela 5.26, onde é apresentada a probabilidade de um revestimento pertencer a um dado nível de degradação, em função da idade, da ação da chuva e vento e

da exposição aos agentes poluentes.

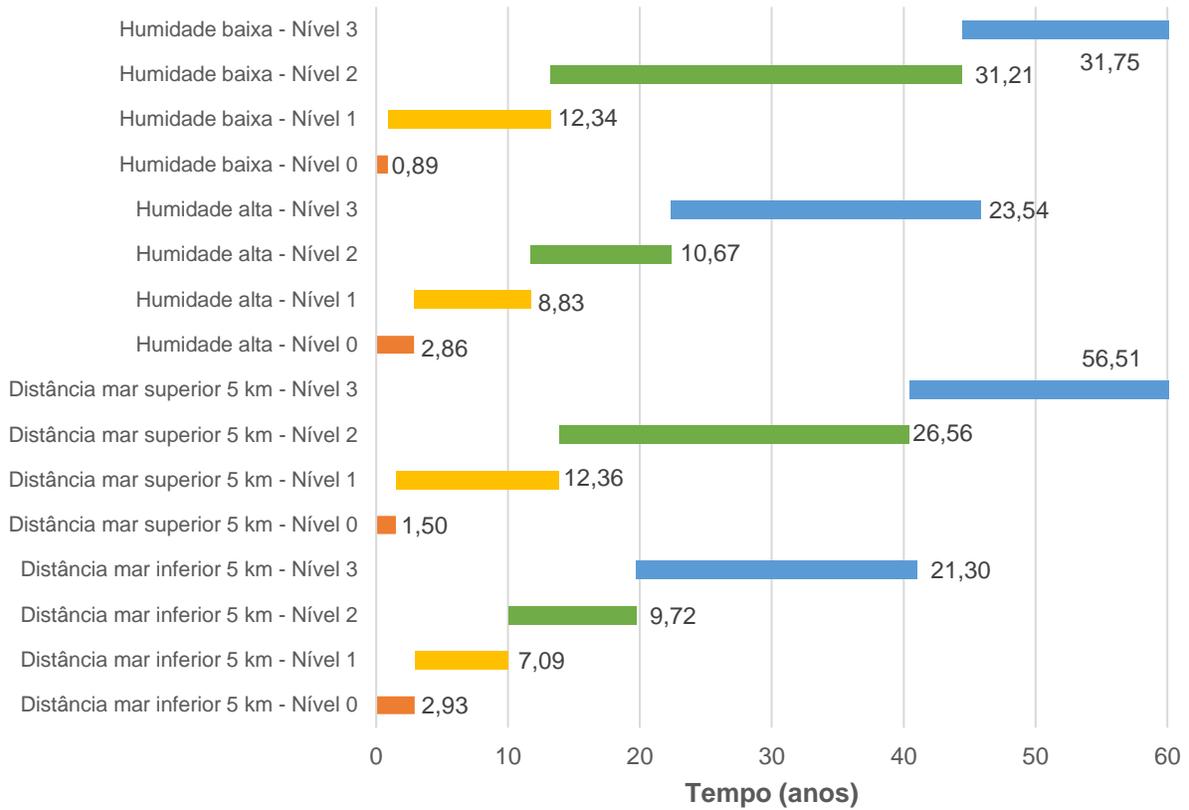


Figura 5.9 - Tempo médio de permanência em cada nível da condição de degradação, em função da exposição à humidade e da distância ao mar.

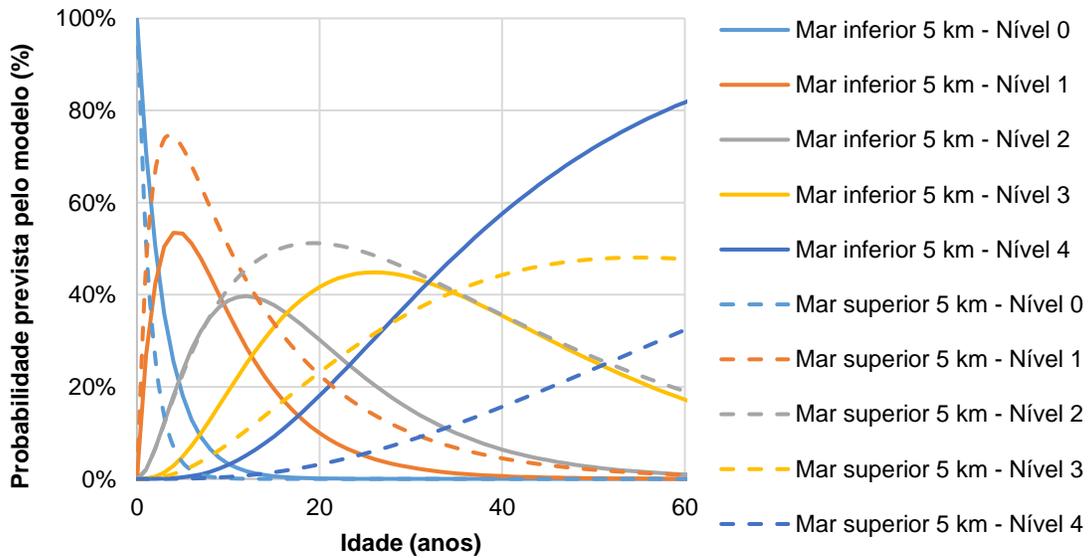


Figura 5.10 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade e distância ao mar, dos revestimentos da amostra em estudo.

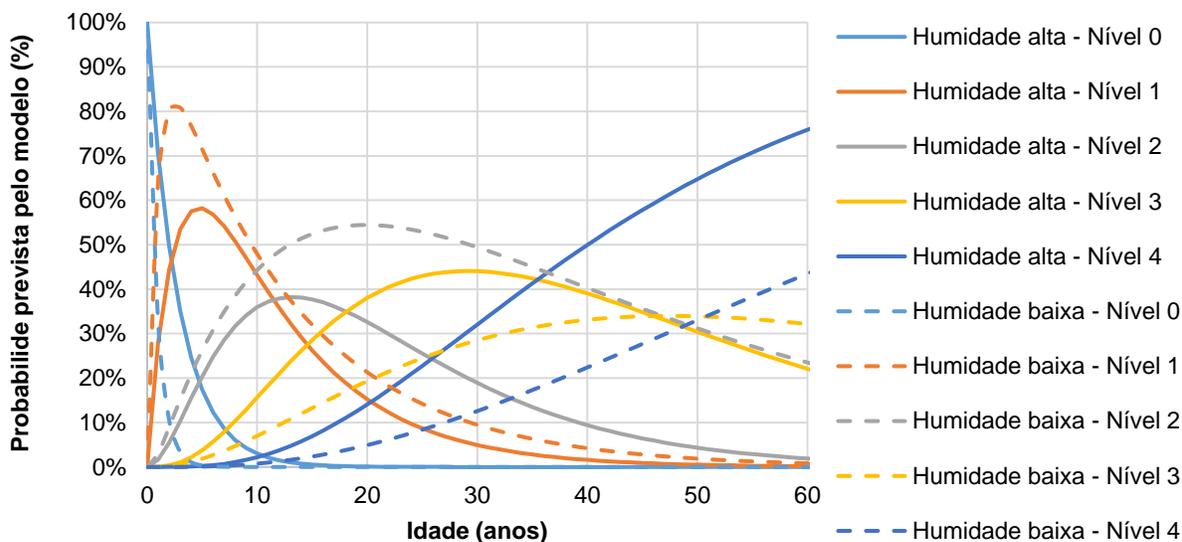


Figura 5.11 - Distribuição probabilística da degradação, em função da idade e exposição à humidade, dos revestimentos da amostra em estudo.

Tabela 5.26 - Probabilidade de um revestimento pertencer a cada um dos níveis de degradação, em função da sua exposição à chuva-vento e da sua exposição aos agentes poluentes.

Atributos	Probabilidade de pertencer a cada condição de degradação				
	Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Distância inferior a 5 km	6,63%	33,13%	22,29%	24,70%	13,25%
Distância superior a 5 km	2,26%	49,43%	37,74%	9,43%	1,13%
Humidade alta	6,64%	37,89%	27,34%	19,92%	8,20%
Humidade baixa	0,00%	50,86%	38,29%	8,57%	2,29%

Na Tabela 5.27, é indicada a capacidade classificativa do modelo, para ser possível avaliar a sua precisão. Para alguns casos, o erro percentual médio foi mais elevado, situando-se acima de 15%. Para os restantes, o erro foi inferior a 10%, o que é um valor adequado para o modelo, tendo em conta toda a incerteza associada aos processos usados para recolha e tratamento de dados.

Na Figura 5.12, é mostrada a probabilidade de se atingir a vida útil de um revestimento, em função da idade, da exposição à humidade e da distância ao mar. Para as diversas curvas, a probabilidade de 50% de se atingir a vida útil ocorre entre 18 e 35 anos. Para o valor da probabilidade igualar 90%, as fachadas têm idade a partir de 35 anos. Acerca do posicionamento relativo entre as quatro curvas, a curva referente à distância ao mar inferior a 5 km é a que atinge a vida útil mais cedo, o que não faz sentido do ponto de vista físico, pois é o caso mais penalizador do desempenho do revestimento. Relativamente à curva em que a exposição à humidade é alta, a curva aproxima-se bastante da referida anteriormente, mas com valores menos penalizadores, o que indica que a humidade não é tão relevante quanto a distância ao mar, na evolução da degradação. As curvas correspondentes à humidade reduzida e às fachadas afastadas do mar revelam tendências de degradação muito mais reduzidas, o que faz sentido físico, já que essas fachadas estão sujeitas à ação de agentes menos gravosos.

Tabela 5.27 - Capacidade classificativa do modelo.

	Condição de degradação	Casos observados	Casos previstos	Erro percentual médio (%)
Distância inferior a 5 km	Nível 0	11	13,39	21,73%
	Nível 1	55	43,18	21,49%
	Nível 2	37	45,01	21,65%
	Nível 3	41	43,84	6,93%
	Nível 4	22	20,58	6,46%
Distância superior a 5 km	Nível 0	6	5,39	10,16%
	Nível 1	131	128,46	1,94%
	Nível 2	100	103,04	3,04%
	Nível 3	25	25,73	2,93%
	Nível 4	3	2,37	20,90%
Humidade alta	Nível 0	17	18,43	8,40%
	Nível 1	97	85,77	11,57%
	Nível 2	70	76,95	9,93%
	Nível 3	51	56,48	10,74%
	Nível 4	21	18,37	12,52%
Humidade baixa	Nível 0	0	0,41	N/A
	Nível 1	89	84,64	4,90%
	Nível 2	67	71,12	6,14%
	Nível 3	15	15,59	3,93%
	Nível 4	4	3,25	18,86%

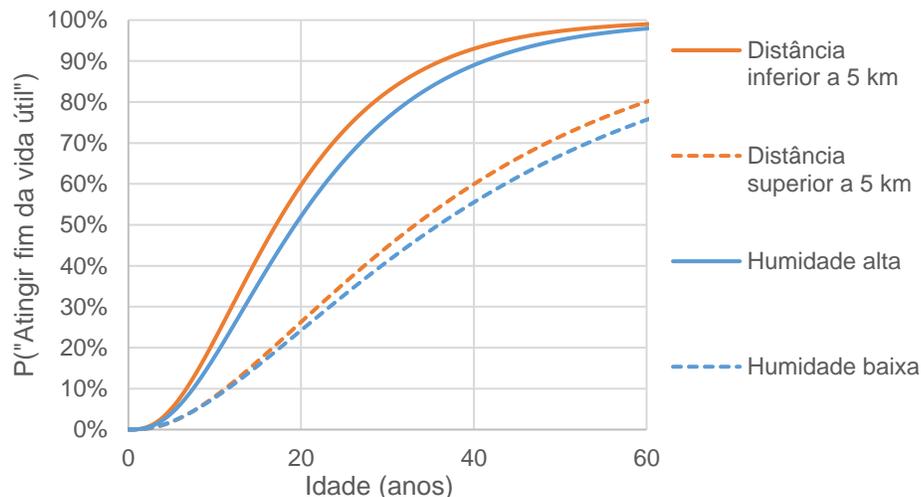


Figura 5.12 - Distribuição da probabilidade de se atingir o fim da vida útil, em função da idade das fachadas, da exposição à ação da chuva-vento e da exposição aos agentes poluentes.

#### 5.4. Análise comparativa dos modelos

Uma vez aplicados os métodos estocásticos à amostra em estudo e obtidos os resultados respetivos, é possível estabelecer comparações no que diz respeito ao ajuste aos dados da amostra e à capacidade preditiva de cada modelo, e analisar como é que os modelos criados dão resposta às três questões levantadas na introdução do presente capítulo.

Tanto no caso da regressão logística, como no caso das cadeias de Markov, são definidos dois modelos: um modelo base, onde apenas se considera a influência da idade na evolução da degradação

das fachadas; e um modelo adicional, onde também se considera a influência da idade, acrescida dos efeitos de diversas variáveis explicativas, referentes às características do revestimento e às condições de exposição ambiental.

Começando pela **regressão logística multinomial**, por um lado, o modelo base permite realizar a análise probabilística da condição de degradação de fachadas de acordo com a sua idade. Por outro lado, o modelo que considera o efeito da idade, para além da exposição à humidade e textura da fachada como variáveis explicativas, permite realizar a análise probabilística da condição de degradação de fachadas de acordo com características do revestimento e do meio envolvente. Ambos os modelos permitem determinar a probabilidade de um revestimento possuir uma dada condição de degradação em função das variáveis explicativas e quais os intervalos de tempo com maior probabilidade de ocorrer uma transição entre estados consecutivos de degradação.

Decorrente da aplicação do modelo multinomial adicional, isto é, o que considera o efeito da idade e características adicionais, obtém-se que as fachadas com exposição baixa à humidade têm tendência a pertencer a níveis de degradação mais baixos do que as fachadas com exposição mais elevada, conforme a Tabela 5.14. Este resultado tem sentido físico, dado que a presença de água nos revestimentos potencia a acumulação de detritos, que agravam outros fenómenos de degradação. Relativamente à textura do revestimento, constata-se que as fachadas rugosas têm maior probabilidade de pertencer a níveis de degradação mais elevados, uma vez que a acumulação de detritos é mais relevante neste tipo de revestimentos, o que contribui negativamente para aumentar a degradação das fachadas.

Quanto à idade em que há uma maior probabilidade de se atingir a vida útil do revestimento, dado que se considerou apenas a influência da idade no valor obtido pelo método gráfico, faz sentido proceder de igual modo para os métodos estocásticos. Assim, considerando o modelo base, chega-se a uma idade de 18 anos, o que coincide com o ponto de transição entre os níveis 2 e 3 de degradação, correspondente a um valor de  $S_w$  igual a 30%. Quanto à capacidade classificativa dos modelos multinomiais, o modelo base classifica corretamente 60,3% dos casos e o modelo com mais variáveis independentes explica corretamente 65,9% dos casos.

Relativamente à **regressão logística binomial**, é apresentado o modelo base, em que se considera o efeito da idade, e o modelo adicional, em que se considera a idade, o efeito combinado da chuva-vento e a exposição aos agentes poluentes, que são características de exposição da fachada e propriedades do meio envolvente. Estes modelos permitem determinar a probabilidade de ser atingido o fim da vida útil de um revestimento ao longo de um dado intervalo de tempo ou, inversamente, determinar em que instantes é que a probabilidade de ser atingido o fim da vida útil é igual a um determinado valor de controlo (por exemplo, 50% ou 90%). Estes modelos binomiais permitem complementar a informação fornecida pelos modelos multinomiais, dando resposta às perguntas que motivaram a aplicação da regressão logística.

Ao aplicar o modelo binomial, comprova-se uma melhoria significativa da capacidade classificativa do modelo, face ao caso multinomial, com um valor de 89,6% dos casos corretamente classificados pelo modelo base e 90,7% pelo modelo com várias variáveis, o que revela bom desempenho destes modelos. O modelo base indica uma idade de 18 anos para que a probabilidade de atingir a vida útil seja 50%, valor

que é coincidente com a idade com que se verifica a transição de nível de degradação discutida para o modelo multinomial. Por outro lado, o modelo com diversas variáveis aponta para um valor entre 15 e 24 anos, para que a probabilidade de ser atingido o fim da vida útil seja de 50%.

Quanto aos modelos baseados nas **cadeias de Markov**, é apresentado o modelo base, no qual apenas se considera o efeito da idade, e o modelo adicional, no qual se consideram a idade, a influência da distância ao mar e a influência da exposição à humidade. Estes modelos permitem recolher a informação necessária para responder às três questões propostas.

Assim, para o modelo base, a transição do nível 2 para o nível 3 tem uma probabilidade de ocorrência igual a 50% ao fim de 23 anos, valor que corresponde à idade mais provável para se atingir o fim da vida útil. Analisando a Figura 5.9, constata-se que, para os cenários em que a exposição ao efeito da humidade é baixa ou quando a distância ao mar é superior a 5 km, os revestimentos tendem a permanecer durante mais tempo no nível 2 de degradação, ou seja, demoram mais tempo a transitar para o nível 3 e, conseqüentemente, tendem a atingir o fim da sua vida útil mais tarde em comparação com situações mais desfavoráveis (i.e., exposição alta à humidade e mais próximo do mar, a menos de 5 km).

De acordo com a Tabela 5.26, os níveis de degradação com maior probabilidade de ocorrer na amostra são o 1 e o 2. Adicionalmente, a probabilidade de pertencer ao nível 0 é 0% para uma exposição baixa à humidade e a probabilidade de pertencer ao nível 1 é máxima para esse cenário.

Em termos da qualidade dos modelos das cadeias de Markov, pela análise da Tabela 5.27, constata-se que o erro percentual médio se situa maioritariamente perto de 10%, com alguns valores pontuais a aproximarem-se de 20%. Admitindo que se está na presença de fenómenos aleatórios e há alguma incerteza associada a todas as medições efetuadas no trabalho de campo, considera-se que estes modelos têm boa qualidade explicativa do comportamento da amostra.

No capítulo anterior, ao aplicar o método gráfico à amostra em estudo, obtém-se uma vida útil média estimada de 18,5 anos. Este valor é determinístico, o que significa que se assume que todas as fachadas atingem a vida útil nesse instante. No entanto, em condições reais de utilização, a vida útil não é atingida de igual modo por todas as fachadas, pelo que interessa dispor de modelos de análise de degradação que indiquem resultados que incorporem a aleatoriedade associada às reais condições de serviço do revestimento. Estes modelos não indicam um instante em que, obrigatoriamente, as fachadas atingem todas o fim da vida útil, mas sim o instante onde é maior a probabilidade de se atingir a vida útil: é possível que algumas fachadas se degradem prematuramente e outras apresentem uma evolução mais lenta da degradação. Deste modo, é possível desenvolver planos de manutenção que sejam mais ajustados à evolução real da degradação das fachadas, tendo em conta a evolução expectável indicada pelos modelos.

Para o caso concreto da amostra estudada, o modelo baseado na regressão logística indica uma idade de 18 anos e o modelo das cadeias de Markov uma idade de 23 anos. No caso da regressão logística, o valor é bastante próximo do valor avançado pelo método gráfico. No caso das cadeias de Markov, o valor é superior em cerca de cinco anos.

Na sua investigação, Tavares et al. (2020) obtiveram um valor de 19,6 anos para a vida útil, o qual é praticamente coincidente com o valor que havia sido previamente obtido por Marques et al. (2018). A

diferença entre os valores dos estudos anteriores e o obtido na presente investigação é muito reduzida, para o caso do método gráfico e para o método da regressão logística, sendo que o valor das cadeias de Markov é superior, mas ainda assim aceitável. A variação entre os valores da investigação previamente existente e a investigação levada a cabo neste trabalho é devida à inclusão de casos adicionais na amostra em análise.

Na bibliografia existente, é possível encontrar diversas fontes que indicam valores de referência para a vida útil dos revestimentos com recurso a sistemas ETICS. De acordo com a norma EAD 040083-00-0404 (2020), para fachadas submetidas a condições apropriadas de uso e manutenção regular, a vida útil para revestimentos ETICS é de pelo menos 25 anos. No entanto, segundo Liisma et al. (2014), a vida útil real tende a assumir valores inferiores aos previstos pela norma EAD 040083-00-0404 (2020), devido às condições a que a fachada se encontra sujeita. Também Tůmová et al. (2017) sugerem um valor de 25 a 30 anos para a vida útil de revestimentos ETICS, desde que haja ações adequadas de manutenção e reparação. Há, porém, autores que consideram valores de vida útil superiores, como é o caso de Paczkowski (2013), que assume o valor de 40 anos como o limite superior para a vida útil dos ETICS. Adicionalmente, Silva e Falorca (2009) indicam uma gama de valores para a vida útil, consoante o nível de manutenção efetuado: 42 anos, para fachadas com boas condições de manutenção; 35 anos para fachadas com inspeções visuais periódicas e condições de manutenção normais; 28 anos para fachadas com manutenção inexistente; 24 anos para fachadas com manutenção inexistente e más condições de utilização. Numa postura mais conservativa, Künzel et al. (2006) apresentam uma amostra de edifícios, na qual todas as fachadas inspecionadas, com idade superior a 20 anos, necessitaram de intervenções para restituir o seu nível de desempenho, afirmando que a tecnologia associada a este material teve uma evolução positiva ao longo das últimas décadas, contribuindo para uma melhoria progressiva do valor da sua vida útil.

Os valores apresentados nestes estudos partem do pressuposto que as fachadas são submetidas a ações regulares de inspeção e manutenção. No caso da amostra inspecionada, tendo em conta a falta de ações de manutenção, obtêm-se valores entre 18 e 23 anos, ainda que relativamente próximos, contrastam com os valores de vida útil mais elevados considerados na literatura, que seriam expectáveis para fachadas com condições de manutenção mais favoráveis.

## **5.5. Conclusões**

No presente capítulo, foram apresentados os resultados obtidos após a construção e aplicação de modelos estocásticos à previsão da vida útil de revestimentos ETICS, tendo em conta a idade das fachadas, as características do material e as do meio envolvente. Assim, foram considerados modelos baseados na regressão logística binomial e multinomial, bem como modelos baseados nas cadeias de Markov. Estes modelos permitem levar em consideração a existência de aleatoriedade nos processos a modelar, por oposição ao método gráfico, previamente discutido no Capítulo 4.

Os resultados obtidos revelam que os modelos criados na presente investigação para a regressão logística e para as cadeias de Markov têm vantagens face ao método gráfico, mas também algumas limitações, maioritariamente relacionadas com a dimensão da amostra e a sua divisão em classes mais

pequenas, o que pode conduzir à perda de representatividade estatística de alguns atributos. Considera-se que os métodos estocásticos propostos na presente dissertação conduzem a modelos adequados, os quais podem ser aplicados para modelar a evolução da degradação dos revestimentos por ETICS ao longo do tempo, tendo em conta a aleatoriedade associada aos processos físicos e químicos de degradação e subsequente perda de desempenho do material.

## 6. Conclusão

### 6.1. Considerações finais

A presente investigação teve como objetivo principal dar continuidade à investigação existente para a análise da evolução da degradação das fachadas com sistema ETICS, chegando a conclusões sobre o comportamento das mesmas, quer em função das suas características físicas, quer das do meio envolvente do edifício. Para tal, foi selecionada uma amostra de fachadas a inspecionar, realizadas inspeções visuais e recolhidos dados em campo, para posterior tratamento estatístico. O trabalho de campo conduziu à aplicação do método gráfico para estimação da evolução da degradação e obtenção do valor da idade para a qual se atinge o fim da vida útil deste sistema de isolamento térmico pelo exterior. Na fase seguinte, foram aplicados os métodos estocásticos à amostra recolhida, sendo possível tirar conclusões relativamente à idade para a qual se atinge o fim da vida útil dos revestimentos, os instantes em que há maior probabilidade de transição entre estados consecutivos de degradação e qual a condição de degradação mais provável de um revestimento, em função das suas características construtivas e de exposição ambiental. A aplicação destes métodos permite considerar a variabilidade estatística associada aos fenómenos de degradação, o que se revela uma vantagem face aos resultados previamente obtidos por via dos métodos determinísticos, onde apenas se obtém um valor determinístico para a idade em que é atingido o fim da vida útil.

O conceito de vida útil está associado à capacidade de satisfazer requisitos de desempenho de um edifício, os quais podem ser requisitos de segurança, funcionais ou estéticos. Dado que a definição da vida útil pode estar sujeita a fatores subjetivos, justifica-se a existência de normas diversas, como é o caso da norma ISO 15686-1 (2011), com vista a definir uma terminologia objetiva do que se entende por vida útil de um elemento construtivo.

Os sistemas ETICS permitem ganhos de eficiência face a soluções tradicionais de isolamento térmico de paredes, dado que mitigam os efeitos das pontes térmicas. Isto ocorre devido à composição do sistema de revestimento, o qual tem diversas camadas que têm como função proceder ao isolamento térmico da parede, como é o caso da camada de isolamento, e garantir a integridade do sistema, como é o caso da armadura de reforço.

A evolução da degradação está associada ao surgimento de anomalias diversas. No caso particular dos sistemas ETICS, as anomalias consideradas são as definidas no sistema classificativo apresentado por Amaro et al. (2013), Ximenes et al. (2015), Marques et al. (2018) e Tavares et al. (2020). Com base na investigação existente para diversos materiais, foi desenvolvida a Tarefa 3 (Silva et al., 2017) 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)", a qual se baseou nos trabalhos anteriores, criando uma metodologia para compatibilizar o sistema de inspeção e diagnóstico com os modelos de previsão de vida útil, tanto para o caso particular dos ETICS, como para outras soluções de revestimento exterior. Assim, as anomalias consideradas para o sistema ETICS dividem-se em quatro grupos: i) anomalias de manchas

ou alterações cromáticas; ii) anomalias em juntas; iii) anomalias de perda de continuidade ou integridade; e iv) anomalias de perda de aderência. No total, são considerados 14 tipos diferentes de anomalias para este elemento, pertencentes aos quatro grupos indicados.

De modo a proceder à definição de modelos para análise da degradação do material, é necessário dispor de dados sobre as fachadas. Assim, o trabalho de campo apresenta-se como uma ferramenta indispensável na recolha de informação. Numa primeira fase, é realizado o estudo estatístico da amostra inicial, com o objetivo de determinar as características que necessitam de mais informação, de modo a garantir uma representatividade adequada. Uma vez conhecidas as necessidades da amostra inicial, são identificados edifícios que possam ser inspecionados e utilizados como casos de estudo, cuja data de construção ou da ação de reabilitação mais recente seja conhecida, para se poder calcular a idade do revestimento à data da inspeção. De seguida, são realizadas inspeções a esses edifícios, recolhendo a informação necessária para preencher a ficha de inspeção e proceder ao levantamento fotográfico das fachadas, para posterior análise dimensional das anomalias.

Dado que já se conhece previamente a idade dos revestimentos a inspecionar, a informação a recolher em campo consiste num conjunto de características relativamente à fachada e ao meio envolvente onde esta se insere.

Uma vez realizado o trabalho de campo, a informação recolhida tem de ser processada para poder ser utilizada na estimação da evolução da degradação das fachadas. Assim, Gaspar (2003) e Gaspar e Brito (2005a; 2005b) propuseram uma metodologia geral de análise de degradação de elementos construtivos, a qual é aplicada na presente investigação ao caso particular dos sistemas ETICS. Esta metodologia assenta na definição da degradação como uma função da área afetada pelas anomalias e pela gravidade relativa de cada anomalia. Da aplicação da metodologia, obtém-se a severidade normalizada da degradação,  $S_w$ , que permite quantificar a degradação entre 0% e 100%. Este parâmetro relaciona-se com a condição de degradação das fachadas, sendo possível definir um limite para o qual é atingido o fim da vida útil do elemento construtivo. No caso do sistema ETICS, o valor para o qual se atinge o fim da vida útil é o nível 3, correspondente a um valor de  $S_w = 30\%$ .

Ao aplicar o método gráfico à amostra em estudo, é possível analisar a influência de cada uma das características da fachada e do meio envolvente na evolução da degradação ao longo do tempo. Adicionalmente, é obtido um valor determinístico para a idade em que é atingido o fim da vida útil. Para a amostra considerada na investigação, esse valor é de 18,5 anos.

Após concluir a aplicação do método gráfico, é possível prosseguir com a definição dos modelos estocásticos e sua aplicação à amostra em estudo. Assim, foram utilizadas a regressão logística binomial e multinomial e as cadeias de Markov em tempo contínuo, para efetuar a análise estocástica da evolução da degradação das fachadas com sistema ETICS, com vista a: **i)** determinar a idade em que é mais provável que seja atingido o fim da vida útil; **ii)** determinar a condição de degradação com maior probabilidade de ocorrência para um revestimento, em função das suas características e da exposição ambiental a que se encontra sujeito; **iii)** determinar quais os instantes em que há maior probabilidade de

transição entre estados consecutivos de degradação.

Em ambos os métodos, foi definido um modelo base, no qual apenas se considera o efeito da idade na evolução da degradação, e modelos adicionais, para estudar a influência dos atributos do revestimento.

No caso da **regressão logística**, foram definidos modelos recorrendo à regressão **binomial** e à regressão multinomial. A regressão binomial foi usada para analisar a probabilidade de se atingir o fim da vida útil dos revestimentos ETICS, tendo chegado, com recurso ao modelo base, a um valor de 18 anos para uma probabilidade de 50% de atingir o fim da vida útil. Para o modelo adicional, no qual se considera a ação da chuva-vento e a exposição aos agentes poluentes, o valor obtido para a probabilidade de 50% de atingir o fim da vida útil varia entre 15 e 24 anos, consoante a classe a que a fachada pertence. Considerando estas variáveis explicativas, uma fachada pode pertencer a uma de quatro classes, dado que cada variável pode assumir duas classes diferentes (exposição alta ou exposição baixa) e estas podem ser combinadas entre si. A regressão **multinomial** foi usada para analisar a influência da idade na condição de degradação mais provável e a influência das características da fachada na evolução da degradação ao longo do tempo, bem como estimar os instantes onde é mais provável que ocorram transições no estado de degradação. No modelo adicional, foram consideradas como variáveis explicativas a exposição da fachada à humidade e a textura do revestimento.

No caso das **cadeias de Markov**, foram definidos modelos em tempo contínuo, para efetuar análises equivalentes às mencionadas para os modelos da regressão logística. Assim, foi desenvolvido um modelo base, o qual foi utilizado para estimar a idade para a qual se verifica uma probabilidade de 50% de atingir o fim da vida útil, tendo chegado ao valor de 23 anos. Relativamente à influência da idade e características da fachada na evolução da degradação, foi utilizado o modelo base e o modelo adicional, no qual foi considerada a ação isolada das variáveis explicativas “exposição à humidade” e “distância ao mar”, tendo chegado ao valor dos instantes de tempo em que é máxima a probabilidade de transição entre estados consecutivos de degradação. Além disso, é possível perceber qual a influência da idade e das variáveis explicativas na evolução da degradação ao longo do tempo, bem como a evolução da probabilidade de se atingir a vida útil, à medida que a idade da fachada aumenta, tendo chegado a valores de idade entre 18 e 35 anos, para os quais se alcança uma probabilidade de 50% de a fachada atingir o fim da sua vida útil.

Os valores obtidos na presente investigação para o final da vida útil estão próximos dos estudos existentes para este revestimento, o que revela um ajuste adequado dos modelos utilizados associado a uma amostra representativa do fenómeno que se pretendia modelar.

A aplicação dos dois métodos estocásticos à análise da evolução da degradação de revestimentos ETICS e previsão da sua vida útil permitiu obter resultados realistas para os instantes em que ocorrem transições entre estados de degradação consecutivos, bem como a idade para a qual é atingido o fim da vida útil. Isto constitui-se como uma grande vantagem face aos métodos determinísticos, pelo facto de permitir considerar as probabilidades associadas a estes instantes.

Deste modo, torna-se possível obter modelos de degradação que permitem definir valores limite de percentagem admissível para desencadear ações de manutenção a realizar sobre a fachada. Estes

limites podem ser definidos pelas diferentes partes interessadas como, por exemplo, as seguradoras, os técnicos responsáveis pela manutenção, ou os proprietários dos edifícios.

## **6.2. Desenvolvimentos futuros e propostas de melhoria**

No seguimento do trabalho conduzido na presente investigação, é importante referir que existem algumas vias de melhoria das metodologias utilizadas, com vista à obtenção de resultados cada vez mais fiáveis.

Relativamente à fase do trabalho de campo, a preparação das inspeções foi dificultada pelo facto de existir pouca informação disponível publicamente sobre os edifícios, o que levou a que não fosse possível otimizar o planeamento das inspeções e fossem visitados e inspecionados diversos edifícios, cujas fachadas não figuram na amostra final, dado que a sua combinação de características não iria conduzir ao enriquecimento da representatividade estatística da amostra existente. Para mitigar este problema, existem algumas iniciativas que pretendem criar bases de dados com informação sobre os edifícios (Monteiro et al., 2018; Gontia et al., 2020). Recorrendo a esta informação, torna-se possível desenvolver um programa de inspeções que garante que todos os dados recolhidos na fase do trabalho de campo são considerados para a amostra final, podendo ser aplicados nas restantes fases da análise da durabilidade do material.

Relativamente ao procedimento a seguir nas inspeções às fachadas, dado que a metodologia adotada na presente investigação consistiu em recorrer a inspeções visuais para fazer o levantamento da informação, constata-se uma deficiência na recolha da informação quando as fachadas são de difícil acesso, levando a que as fotografias tiradas tenham de ser submetidas a tratamento adicional para corrigir a perspetiva. Assim, com o intuito de facilitar a recolha de informação das fachadas e melhorando a qualidade dos dados utilizados na modelação, recomenda-se o recurso a meios tecnologicamente mais avançados como, por exemplo, pequenos *drones* com câmaras instaladas, os quais podem aceder a zonas da fachada que se encontram mais afastadas do solo e proceder ao seu levantamento fotográfico (Eschmann et al., 2012). Esta solução revela-se mais dispendiosa do que as inspeções visuais, mas o constante desenvolvimento das tecnologias necessárias e o aumento da procura leva a que os custos diminuam, o que faz com que se torne cada vez mais competitiva ao longo do tempo (Liu et al., 2021).

Como complemento às inspeções pontuais, o tratamento de dados em tempo real revela-se como uma tendência futura na área da manutenção de edifícios (Davtalab, 2017), partindo da premissa de que as anomalias são identificadas mais rapidamente, permitindo atuar mais cedo sobre as suas causas e, assim, otimizar os custos da manutenção do edifício.

A melhoria dos modelos e processos utilizados na análise da degradação dos elementos construtivos ocorre de um modo contínuo e incremental ao longo do tempo, à medida que se assiste ao desenvolvimento de tecnologias cada vez mais sofisticadas e competentes, levando a resultados cada vez melhores e mais fiáveis, os quais podem ser incorporados na gestão do património edificado, levando à tomada de decisões adequadas para a sustentabilidade das construções e para a manutenção do conforto dos utilizadores.

## Referências bibliográficas

### **A**

AMARO, B.; 2011; Sistemas de inspeção e diagnóstico de ETICS em paredes; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil.

AMARO, B.; SARAIVA, D.; BRITO, J. de; FLORES-COLEN, I.; 2013; Inspection and diagnosis system of ETICS on walls; *Construction and Building Materials*, 47, pp 1257-1267.

AMARO, B.; SARAIVA, D.; BRITO, J. de; FLORES-COLEN, I.; 2014; Statistical Survey of the Pathology, Diagnosis and Rehabilitation of ETICS in Walls, *Journal of Civil Engineering and Management* 20.4, pp 511-526.

APFAC; 2018; Manual ETICS; Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS.

ASDRUBALI, F.; BALDINELLI, G.; BIANCHI, F.; 2012; A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings; *Applied Energy* 97, pp. 365-373.

### **B**

BARREIRA, E.; FREITAS, V.P.; 2008; Defacement of ETICS cladding due to hygrothermal behaviour, 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, pp. 1205-1212.

BAYRAK, H.; AKGÜL, F.; 2013; Effect of coefficients of regression model on performance prediction curves; *International journal of engineering and applied sciences* 5(1), pp 32-39.

BERGTOLD, J.; SPANOS, A.; ONUKWUGHA, E.; 2010; Bernoulli regression models: Revisiting the specification of statistical models with binary dependent variables; *Journal of Choice Modelling* 3(2), pp 1-28.

BRITO, J. de; GASPAR; SILVA, A.; 2012; Previsão da vida útil dos revestimentos de fachada, 4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios; DOI: 10.13140/RG.2.1.3667.0168.

### **C**

CHANTER, B.; SWALLOW, P.; 2008; *Building maintenance management*, John Wiley & Sons.

CLARIBEL, F.; BRITO, J. de; 2012; Soluções para integração arquitectónica do sistema ETICS em reabilitação; Comunicação para 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, APFAC.

COLLINA, A.; 2007; Comfort and energy saving: The external thermal insulation composite system (ETICS); 2nd Portuguese Congress on Construction Mortars (APFAC), Lisboa, Portugal.

COLINA, A.; LIGNOLA, G.; 2010; The External Thermal Insulation Composite System (ETICS): more than comfort and energy saving; Proceedings of the 3rd Portuguese Congress on Construction Mortars, Lisboa, pp 18-19.

COX, D.; SNELL, E.; 1989; *Analysis of Binary Data*. 2nd Edition; Chapman and Hall/CRC, London.

CRAIG, B.; SENDI, P.; 2002; Estimation of the transition matrix of a discrete-time Markov chain; Health economics, 11(1), pp 33-42.

## **D**

DAVTALAB, O.; 2017; Benefits of real-time data driven BIM for FM departments in operations control and maintenance; Computing in Civil Engineering 2017, pp. 202-210.

## **E**

EOTA; 2020; EAD 040083-00-0404, External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with Rendering; European Organisation for Technical Approvals: Brussels, Belgium.

EL-HABIL, A.; 2012; An application on multinomial logistic regression model; Pakistan journal of statistics and operation research, pp 271-291.

EMÍDIO, F.; BRITO, J. de; GASPAR, P. L.; SILVA, A.; 2014; Application of the factor method to the estimation of the service life of natural stone cladding; Construction and Building Materials; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.073.

ESCHMANN, C.; KUO, C. M.; KUO, C. H.; BOLLER, C.; 2012; Unmanned aircraft systems for remote building inspection and monitoring, pp 1-8

## **F**

FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de; FREITAS, V. P. de; 2010; Ensaios in-situ e em laboratório para caracterização do desempenho em serviço de rebocos pré-doseados aplicados em fachadas de edifícios correntes; 3º Congresso Nacional de Argamassas de Construção – APFAC.

FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de; FREITAS, V. P. de; 2008; Stains in facades' rendering - Diagnosis and maintenance techniques' classification; Construction and Building Materials 22, pp 211–221.

## **G**

GALBUSERA, M. M.; BRITO, J. de; SILVA, A.; 2014; Application of the Factor Method to the Prediction of the Service Life of Ceramic External Wall Cladding; Journal of Performance of Constructed Facilities, October 2014; DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000588.

GALBUSERA, M. M.; 2013; Application of the factor method to the prediction of the service life of ceramic external wall claddings, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

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

GASPAR, P.; BRITO, J. de; 2005a; Modelo de degradação de rebocos; Engenharia Civil, n.º 24, pp. 17-27, Universidade do Minho.

GASPAR, P.; BRITO, J. de; 2005b; Assessment of the overall degradation level of an element, based on field data, 10DBMC, pp. 1043-1050.

GASPAR, P.; 2009; 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 da Engenharia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

GILONI, A.; PADBERG, M.; 2002; Alternative methods of linear regression; Mathematical and Computer Modelling 35.3-4, pp. 361-374.

GONTIA, P.; NÄGELI, C.; ROSADO, L.; KALMYKOVA, Y.; ÖSTERBRING, M.; 2018; Material-intensity database of residential buildings: A case-study of Sweden in the international context; Resources, Conservation and Recycling 130, pp 228-239.

GU, M.; KONG, F.; 1998; A stochastic approximation algorithm with Markov chain Monte-Carlo method for incomplete data estimation problems; Proceedings of the National Academy of Sciences, 95(13), pp 7270-7274.

## **H**

HALD, A.; 1999; On the history of maximum likelihood in relation to inverse probability and least squares; Statistical Science, 14(2), pp 214-222.

HILBE, J.; 2009; Logistic regression models; Chapman and hall/CRC.

HIRANO, K.; AKI, S.; 1993; On number of occurrences of success runs of specified length in a two-state Markov chain; Statistica Sinica, pp 313-320.

HOSMER, D.; LEMESHOW, S.; 1980; Goodness of fit tests for the multiple logistic regression model; Communications in statistics-Theory and Methods, 9(10), pp 1043-1069.

HOSMER, D.; LEMESHOW, S.; 2000; Applied Logistic Regression 2nd Ed. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.

HORNER, R.; EL-HARAM, M.; MUNNS, A.; 1997; Building maintenance strategy: a new management approach. Journal of quality in maintenance engineering.

HOVDE, P.; MOSER, K.; 2004; Performance based methods for service life prediction. State of the art reports, CIB Report: Publication 294.

## **I**

ISO 15685-1 - Buildings and constructed assets: Service life planning - Part 1: General principles and framework; 2011; International Standard Organization, Geneva.

## **J**

JACKSON, C.; 2007; Multi-state modelling with R: the mms' package; Cambridge, UK, pp 1-53.

JELLE, B.; 2011; Traditional, state-of-the-art, and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements, and possibilities; Energy and buildings 43(10), pp. 2549-2563.

JIN NA, U.; KWON, S.; CHAUDHURI, S.R.; SHINOZUKA, M.; 2012; Stochastic Model for Service Life Prediction of RC Structures Exposed to Carbonation using Random Field Simulation; KSCE Journal of Civil Engineering 16.1, pp. 133-143.

## **K**

KALBFLEISCH, J.; LAWLESS, J.; 1985; The analysis of panel data under a Markov assumption; Journal of the American statistical association, 80(392), pp 863-871.

KAY, R.; 1986; A Markov model for analysing cancer markers and disease states in survival studies; Biometrics, pp 855-865.

KHATIB, J.; 2016; Sustainability of construction materials; Woodhead Publishing.

KIM, J.; 1993; Chi-square goodness-of-fit tests for randomly censored data; The Annals of Statistics, 21(3), pp 1621-1639.

KÜNZEL, H.; KÜNZEL, H. M.; SEDLBAUER, K.; 2006; Long-term performance of external thermal insulation systems (ETICS), Acta Architectura 5(1), pp. 11-24.

## **L**

LEWIS, K.; HECKMAN, B.; HIMAWAN, L.; 2011; Multinomial logistic regression analysis for differentiating 3 treatment outcome trajectory groups for headache-associated disability; PAIN, 152(8), pp 1718-1726.

LIISMA, E.; RAADO, L.; LUMI, S.; LILL, I.; SULAKATKO, V.; 2014; The effect of moisture content of insulation boards on the adhesion strength of ETICS; Proceedings of the 5th European Conference of Civil Engineering, pp. 103-108.

LIU, D.; XIA, X.; CHEN, J.; LI, S.; 2021; Integrating Building Information Model and Augmented Reality for Drone-Based Building Inspection; Journal of Computing in Civil Engineering 35(2), 04020073.

LJUNG L.; 1987; System Identification - Theory for the user; Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

LOUNIS, Z.; VANIER, D.; LACASSE, M.; 1998; A discrete stochastic model for performance prediction of roofing systems; CIB World Congress, pp. 203-313.

LU, S.; 2009; Comparing the reliability of a discrete-time and a continuous-time Markov chain model in determining credit risk; Applied Economics Letters, 16(11), pp 1143-1148.

## **M**

MALANHO, S.; 2011; Avaliação do desempenho de ETICS com acabamento de ladrilhos cerâmicos, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil.

MALANHO, S.; VEIGA, M. do Rosário; VELOSA, A. Luísa; 2010; Adaptação do ensaio de aderência para análise de ETICS com acabamento cerâmico.

MARQUES, C.; 2016; Aplicação do método factorial à previsão da vida útil de ETICS, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil.

MARQUES, C.; BRITO, J. de; SILVA, A.; 2018; Application of the factor method to the service life prediction of ETICS; International Journal of Strategic Property Management, 22, pp 204-222.

MCFADDEN, D.; 1973; Conditional logit analysis of qualitative choice behavior.

MISSIO, F; JACOBI, L; 2007; Variáveis dummy: especificações de modelos com parâmetros variáveis; Ciência e Natura 29(1), pp 111-135.

MONTEIRO, C.; COSTA, C.; PINA, A.; SANTOS, M.; FERRÃO, P.; 2018; An urban building database (UBD) supporting a smart city information system; Energy and Buildings 158, pp 244-260.

MOSER, K.; 1999; Towards the practical evaluation of service life - illustrative application of the probabilistic approach. 8th DBMC, Vancouver, pp 1319.

MOSER, K.; EDVARSEN, C.; Engineering design methods for service life prediction; 2002: Proceedings of the 9th International Conference on the Durability of Building Materials and Components, Brisbane, Australia, pp 17-20.

## **N**

NAGELKERKE, N.; 1991; A note on a general definition of the coefficient of determination; Biometrika, 78(3), pp 691-692.

NG, S.; MOSES, F.; 2014; Prediction of bridge service life using time-dependent reliability analysis; Bridge management, 3, pp 26-33.

NIK, V.; KALAGASIDIS, A.; KJELLSTRÖM, E.; 2012; Statistical methods for assessing and analysing the building performance in respect to the future climate; Building and environment, 53, pp 107-118.

NORRIS, J.; 1998. Markov chains (No. 2). Cambridge university press.

## **P**

PACZKOWSKI, N.; 2013; 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.

PAULO, P.; BRANCO, F.; BRITO, J.; 2011; Deterministic and stochastic prediction models BuildingsLife platform; XII DBMC: 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, Portugal.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C; 2008; A review on buildings energy consumption information. Energy and buildings, 40(3), pp. 394-398.

PHAMDO, N.; ALAJAJI, F.; FARVARDIN, N.; 1997; Quantization of memoryless and Gauss-Markov sources over binary Markov channels; IEEE Transactions on Communications, 45(6), pp 668-675.

PIRES, R.; BRITO, J. de; AMARO, B.; 2015; Inspection, diagnosis and rehabilitation system of painted rendered façades, *Journal of Performance of Constructed Facilities*; DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000534.

## **S**

SARAIVA, D.; 2011; Tecnologia e reabilitação de ETICS em paredes, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil.

SHOHET, I. M.; ROSENFELD, Y.; PUTERMAN, M.; GILBOA, E.; 1999; Deterioration patterns for maintenance management - a methodological approach, *Eighth International Conference on Durability of Building Materials and Components*, pp. 1666-1678.

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

SILVA, A.; BRITO, J. de; GASPAR, P.; 2016; Methodologies for service life prediction of buildings: with a focus on façade claddings. Springer.

SILVA, A.; PEREIRA, C.; BRITO, J. de; GASPAR, P.; 2017; 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.

SILVA, J.; FALORCA, J.; 2009; A model plan for buildings maintenance with application in the performance analysis of a composite facade cover; *Construction and Building Materials* 23(10), pp. 3248-3257.

SMYTH, G.; 2003; Pearson's goodness of fit statistic as a score test statistic; *Lecture notes-monograph series*, pp 115-126.

SULAKATKO, V.; LIISMA, E.; SOEKOV, E.; 2017; Increasing Construction Quality of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) by Revealing on-site Degradation Factors; *Procedia Environmental Sciences*, 38, pp 765-772.

SULAKATKO, V.; LILL, I.; WITT, E.; 2016; Methodological framework to assess the significance of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) on-site activities; *Energy Procedia* 96, pp 446-454.

SULAKATKO, V.; LILL, I.; LIISMA, E.; 2015; Analysis of on-site construction processes for effective external thermal insulation composite system (ETICS) installation, *8th Nordic Conference on Construction Economics and Organization, Procedia Economics and Finance* 21, pp 297 – 305.

SZUMILAS, M.; 2010; Explaining odds ratios; *Journal of the Canadian academy of child and adolescent psychiatry* 19(3), pp 227.

## I

TAVARES, J.; 2018; Modelos computacionais aplicados à previsão da vida útil de ETICS, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil.

TAVARES, J.; SILVA, A.; BRITO, J. de; 2020; Computational models applied to the service life prediction of External Thermal Insulation Composite Systems; Journal of Building Engineering, 27, pp 100944.

TEE, K.; EKPIWHRE, E.; YI, Z.; 2018; Degradation modelling and life expectancy using Markov chain model for carriageway; International Journal of Quality & Reliability Management.

THOMPSON, P.; JOHNSON, M.; 2005; Markovian bridge deterioration: developing models from historical data.; Structure and Infrastructure Engineering 1.1, pp 85-91.

Trexler, J.; Travis, J.; 1993; Nontraditional regression analyses; Ecology 74(6), pp. 1629-1637.

TŮMOVÁ, E.; DROCHYTKA, R.; ČERNÝ, V.; ČADA, P.; 2017; Development of organic and biodegradable insulating material for ETICS; Procedia engineering 195, pp 81-87.

## V

VUONG, Q.; 1989; Likelihood ratio tests for model selection and non-nested hypotheses; Econometrica: Journal of the Econometric Society, pp 307-333.

## W

WALD, A.; 1941; Asymptotically most powerful tests of statistical hypotheses; The Annals of Mathematical Statistics, 12(1), pp 1-19.

WANG, Y.; 2005; A multinomial logistic regression modeling approach for anomaly intrusion detection; Computers & Security 24(8), pp 662-674.

## X

XIMENES, S.; BRITO, J. de; GASPAR, P.; SILVA, A.; 2015; Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls; Materials and Structures, 48, pp 2235-2249.

---

## **Anexos**

---

## Anexo I - Ficha de inspeção e diagnóstico

Ficha de inspeção						
Ficha de inspeção N.º			Data da inspeção			
Responsável / função						
Objetivo da inspeção						
I - Condições climatéricas no momento 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		Código do edifício:				
II.1 - Localização (Morada / localidade)			II.2 - Vista geral e configuração esquemática			
II.3 - Descrição / caracterização construtiva						
II.4 - Volumetria	Compacta	Irregular				
II.5 - Tipo de utilização dominante			II.6 - Ano de construção			
II.7 - N.º de pisos acima do solo			II.8 - N.º de fachadas livres			
II.9 - Identificação dos elementos a inspecionar (indicar número de fachadas [f0] / pavimentos [p0] / coberturas [c0])	RECI		CT		RCA	
	RPN		RPL		C	
	REPI		RP		ETICS	
	RPFR		SBV			
II.10 - Contactos efetuados	Proprietário	Projetista	Empreiteiro	Outro:		
	Nome			Contacto		
	Proprietário	Projetista	Empreiteiro	Outro:		
	Nome			Contacto		
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	
III.7 Zona térmica Inverno (EC1-1-5)	zona A		zona B		zona C	
III.8 Zona térmica Verão (EC1-1-5)	zona A		zona B		zona C	
III.9 Zona climática combinação vento-precipitação	zona I		zona II		zona III	
III.10 Zona de ação vento (EC1-1-4)	zona A (generalidade território exceto zona B)			zona B (ilhas; continente: faixa costeira 5 km ou altitudes > 600 m)		

III.11 Rugosidade aerodinâmica (EC1-1-4)	categoria 0		categoria I	categoria II	categoria III	categoria IV
<b>IV - ETICS</b>	<b>Código do ETICS:</b>					
IV.1 - Tipo de fachada	Principal	Lateral	Tardoz	Muro / Outro	IV.2 - Data de construção	
IV.3 - Orientação da fachada	N	S	E	O	Outra:	
IV.4 - Área total da superfície (m <sup>2</sup> )			IV.5 - Área do revestimento (m <sup>2</sup> )			
IV.6 - Caracterização do tipo de revestimento	Tradicional	Cerâmico	Reforçado	Outro:		
IV.7 - Tipo de acabamento	Liso	Rugoso	IV.8 - Cor			
IV.9 - Tipo de suporte	Betão armado	Alvenaria	Outro	IV.10 - Tipo de remate inferior		
IV.11 - Pingadeiras nos peitoris	Sim	Não	IV.12 - Pingadeiras nas varandas		Sim	Não
IV.13 - Platibandas	Não		Sim, com capeamento		Sim, sem capeamento	
IV.14 - Varandas	Não		Sim, com capeamento		Sim, sem capeamento	
IV.15 - Beirados ou proteção superior	Sim	Não	IV.16 - Proteção inferior		Sim	Não
IV.17 - Canteiros e elementos salientes	Sim	Não	IV.18 - Janelas		Sim	Não
IV.19 - Elementos inseridos na fachada	Estendal	Sist. ventilação	Sist. iluminação		Outro	
<b>V - Manutenção</b>						
V.1 - Estado de conservação geral do edifício	Muito bom	Bom	Médio	Mau	Muito mau	
V.2 - Intervenções anteriores	Não		Sim		Data:	
V.3 - Tipologia implementada						
V.4 - Periodicidade das inspeções e / ou das intervenções						
V.5 - Características das intervenções efetuadas	Data		Rev. n.º		Tipologia	
	Técnica utilizada			Materiais aplicados		
	Data		Rev. n.º		Tipologia	
	Técnica utilizada			Materiais aplicados		
V.6 - Meios de acesso para vistoria / intervenção						
<b>VI - Observações</b>						

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 remates			-			-			-		-	
		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 destacamento do acabamento												
	A-C10 - descolamento												
	A-C8 - lacuna de material/perfuração												
Observações													

## Anexo II - Casos adicionais a inspecionar para garantir cobertura da amostra

	Idade	< 5 anos	5 a 9 anos	10 a 14 anos	15 a 19 anos	20 a 24 anos	> 25 anos
Orientação	Norte	0	0	5	0	5	5
	Sul	0	0	5	0	5	5
	Este	0	0	0	0	0	5
	Oeste	5	0	0	0	5	5
	Nordeste	5	0	0	5	5	0
	Noroeste	5	0	0	5	5	0
	Sudeste	5	0	0	5	5	0
	Sudoeste	5	0	0	5	5	0
Distância ao mar	Inferior a 5 km	0	0	0	0	5	0
	Superior a 5 km	0	0	0	0	0	5
Exposição à humidade	Baixa	0	0	0	0	5	5
	Alta	0	0	0	0	0	0
Ação da chuva-vento	Alta	0	0	0	0	0	0
	Baixa	5	0	5	5	5	5
Exposição aos agentes poluentes	Baixa	5	0	5	0	0	0
	Alta	0	0	0	0	5	5
Tipo de revestimento	Tradicional	0	0	0	0	0	0
	Reforçado	5	0	5	0	5	5
	Cerâmico	5	5	5	5	5	5
Cor do revestimento	Branco	0	0	0	0	0	0
	Cores claras	0	0	0	0	5	5
	Cores escuras	5	0	5	0	5	5
Textura do acabamento	Liso	5	0	0	0	5	5
	Rugoso	0	0	0	0	0	0
Tipo de remate inferior	Perfil de arranque elevado	0	0	0	5	5	5
	Lambril	0	0	0	0	0	0
	Outro	0	0	0	0	5	5

### Anexo III - Casos inspecionados em campo para a amostra adicional

	Idade	< 5 anos	5 a 9 anos	10 a 14 anos	15 a 19 anos	20 a 24 anos	> 25 anos	Soma
Orientação	Norte	1	0	9	0	0	0	10
	Sul	2	0	8	0	0	1	11
	Este	1	0	5	1	0	2	9
	Oeste	0	0	2	0	0	1	3
	Nordeste	5	0	0	3	0	0	8
	Noroeste	5	0	4	1	0	0	10
	Sudeste	5	0	4	1	0	0	10
	Sudoeste	5	0	1	0	0	0	6
Distância ao mar	Inferior a 5 km	19	0	0	6	0	4	29
	Superior a 5 km	5	0	33	0	0	0	38
Exposição à humidade	Baixa	9	0	0	3	0	4	16
	Alta	15	0	33	3	0	0	51
Ação da chuva-vento	Alta	15	0	26	1	0	1	43
	Baixa	9	0	7	5	0	3	24
Exposição aos agentes poluentes	Baixa	1	0	4	0	0	0	5
	Alta	23	0	29	6	0	4	62
Tipo de revestimen- to	Tradicional	20	0	25	0	0	0	45
	Reforçado	4	0	8	6	0	4	22
	Cerâmico	0	0	0	0	0	0	0
Cor do revestimen- to	Branco	14	0	8	0	0	0	22
	Cores claras	6	0	13	6	0	4	29
	Cores escuras	4	0	12	0	0	0	16
Textura do acabamento	Liso	3	0	0	6	0	4	13
	Rugoso	21	0	33	0	0	0	54
Tipo de remate inferior	Perfil de arranque elevado	7	0	32	0	0	1	40
	Lambril	13	0	1	3	0	2	19
	Outro	4	0	0	3	0	1	8

## Anexo IV - Caracterização da zona e das construções analisadas

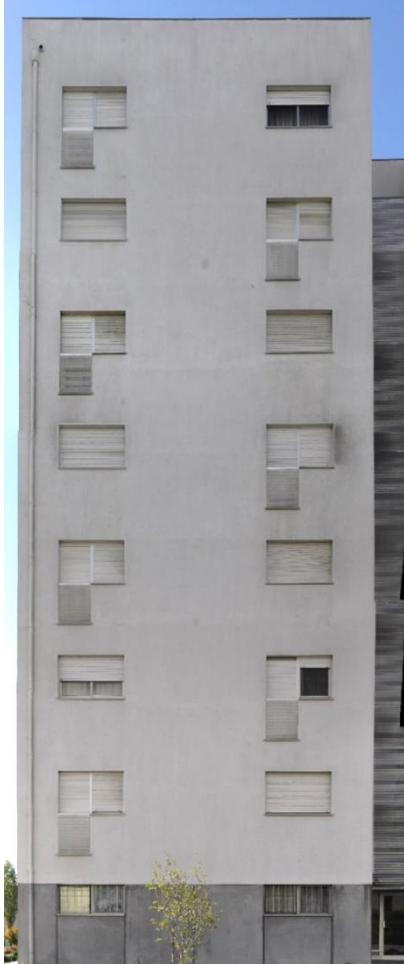
Designação	Endereço	Data da última intervenção	Tipo de envolvente	Tipo de utilização	N.º de pisos acima do solo	Configuração volumétrica
Ed 1	Avenida Mouzinho de Albuquerque, Lisboa	2003	Urbana	Habitação	8	Compacta
Ed 2	Avenida José Malhoa, Lisboa (Hotel IBIS Lisboa José Malhoa)	2002	Urbana	Serviços	14	Compacta
Ed 3	Tagus Park, Oeiras	2008	Outra	Outros	3	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	1 a 5	Irregular
Ed 5	Rua Sílvio Lima, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Polo II (Dep. Eng. Informática)	1994	Rural	Serviços	2 a 5	Irregular
Ed 6	Rua Sílvio Lima, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Polo II (Dep. Eng. Civil)	2000	Rural	Serviços	1 a 4	Irregular
Ed 7	Via panorâmica s/ nº, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Porto	1989	Rural	Serviços	1 a 4	Irregular
Ed 8	Rua do Mondego, Porto (Bairro do Outeiro)	2007	Urbana	Habitação	5	Compacta
Ed 9	Rua de Capitão Salgueiro Maia, Porto (Cooperativa habitacional de Massarelos)	2009	Urbana	Habitação	4	Compacta
Ed 10	Rua Dr. Plácido da Costa, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Dep. De Engenharia)	1999	Urbana	Serviços	1 a 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	Compacta
Ed 12	Rua do Dr. Plácido da Costa, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Cantina)	2002	Urbana	Serviços	2	Compacta
Ed 13	Quinta Verde, São Martinho, Sintra (Urbanização Quinta Verde)	1996	Rural	Habitação	2	Irregular
Ed 14	Rua Alves Redol, 45, Vila Franca de Xira (Museu do Neorrealismo)	2007	Urbana	Serviços	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	Compacta
Ed 16	Empreendimento Alto da Mira, Amadora	2005	Urbana	Habitação	4	Compacta
Ed 17	Av. D José I, nº65, Amadora	2011	Urbana	Habitação	5	Compacta
Ed 18	Urbanização Encosta do Mosteiro, Restelo	2006	Urbana	Habitação	5	Irregular

<b>Ed 19</b>	Escola Básica e Jardim de Infância de São Silvestre do Gradil, pavilhão principal, Mafra	2010	Rural	Serviços	2	Compacta
<b>Ed 20</b>	Escola Básica e Jardim de Infância de São Silvestre do Gradil, bloco da receção, Mafra	2010	Rural	Serviços	1	Compacta
<b>Ed 21</b>	Escola Básica e Jardim de Infância de São Miguel de Alcainça, Mafra	2010	Rural	Serviços	2	Compacta
<b>Ed 22</b>	Lar Casa Alapraia, lote 190 A, São João do Estoril	2009	Urbano	Habitação	2	Compacta
<b>Ed 23</b>	Lar Casa Alapraia, Lote 190 B, São João do Estoril	2009	Urbano	Habitação	2	Compacta
<b>Ed 24</b>	Posto de abastecimento da Galp, Bucelas	2011	Urbana	Serviços/ Comércio	1	Compacta
<b>Ed 25</b>	Rua Madre Maria Clara, nº 33, Queijas	2010	Rural	Habitação	2	Compacta
<b>Ed 26</b>	Rua Beatriz Costa, nº18, Alfragide	2011	Urbana	Habitação/ Comércio	4	Compacta
<b>Ed 27</b>	"Casa - Laboratório Termicamente Otimizada", Porto	1984	Urbana	Outro	2	Compacta
<b>Ed 28</b>	Conjunto Habitacional de Bouça, Rua da Boavista, Porto	2006	Urbana	Habitação	4	Irregular
<b>Ed 29</b>	Moradia de habitação unifamiliar - Rua 20, 4500-805, Espinho	2015	Urbana	Habitação	2	Compacta
<b>Ed 30</b>	Torres Alto da Eira - Rua Frei Manuel do Cenáculo, 1170-150, Penha de França, Lisboa	2015	Urbana	Habitação	5	Compacta
<b>Ed 31</b>	Hotel Just Stay - Rua Gonçalo Cristóvão, 4000-408, Porto	2017	Urbana	Serviços	5	Compacta
<b>Ed 32</b>	Escola Secundária Filipa de Vilhena - Rua do Covelo, 4200-239, Porto	2010	Urbana	Serviços	4	Compacta
<b>Ed 33</b>	Edifícios de habitação multifamiliar - Rua Vitorino Nemésio, 4050-060, Porto	2009	Urbana	Habitação	5	Irregular
<b>Ed 34</b>	Edifício da Liga Portuguesa Contra o Cancro - Estrada Interior da Circunvalação, 4200-107, Porto	2010	Urbana	Serviços	5	Irregular
<b>Ed 35</b>	Biblioteca no ISEP - Rua Doutor António Bernardino de Almeida, 4200-072, Porto	2007	Urbana	Serviços	4	Compacta
<b>Ed 36</b>	Edifício no ISEP - Rua Doutor António Bernardino de Almeida, 4200-072, Porto	2005	Urbana	Serviços	4	Compacta
<b>Ed 37</b>	Escola Secundária Aurélia de Sousa - Rua Aurélia de Sousa, 4000-099, Porto	2009	Urbana	Serviços	4	Compacta
<b>Ed 38</b>	Bairro de Guifões - Avenida Joaquim Neves dos Santos, 4460-125, Guifões, Matosinhos	2017	Urbana	Habitação	4	Irregular
<b>Ed 39</b>	Aquário Sea Life - Rua Particular Nº1 Castelo do Queijo, 4100-379, Porto	2009	Urbana	Serviços	2	Compacta
<b>Ed 40</b>	Edifício de habitação multifamiliar - Rua do Pinheiro Manso, 4100-052, Porto	2009	Urbana	Outro	5	Compacta
<b>Ed 41</b>	Bairro Social - Rua Alberto Sampaio, 4490-152, Póvoa de Varzim	2004	Urbana	Habitação	4	Irregular
<b>Ed 42</b>	Posto de combustível Galp - Avenida do Mar, 4490-406, Póvoa de Varzim	2003	Urbana	Comércio	3	Compacta

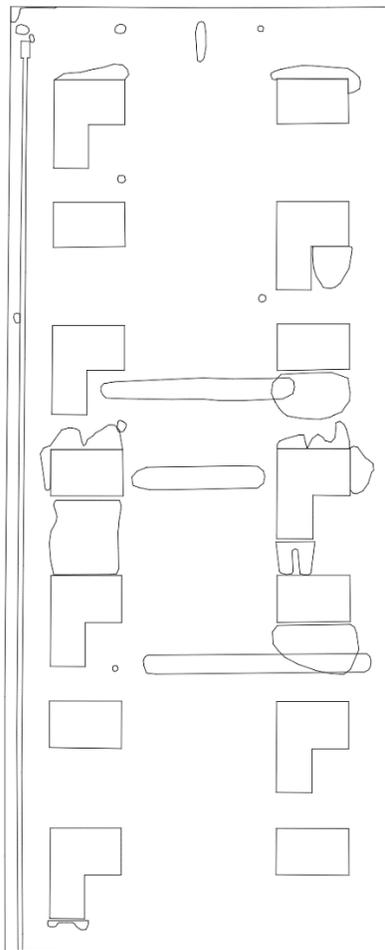
<b>Ed 43</b>	Edifício de habitação multifamiliar - Rua Aristides Sousa Mendes, 4480-732, Vila do Conde	2000	Urbana	Habitação	4	Irregular
<b>Ed 44</b>	Bairro do Farol - Avenida Cmde. Coutinho Lanhoso, 4480-759, Vila do Conde	2003	Urbana	Habitação	4	Irregular
<b>Ed 45</b>	Escola Superior de Saúde - Rua Valente Perfeito, 4400-330, Vila Nova de Gaia	2008	Urbana	Serviços	4	Compacta
<b>Ed 46</b>	Centro Social - Rua Actor Carlos Daniel, 4510-501, Fânzeres, Gondomar	2009	Urbana	Serviços	2	Compacta
<b>Ed 47</b>	Edifício na Igreja de Santa Clara - Avenida Avelino Teixeira da Mota, 1950-035, Marvila, Lisboa	2014	Urbana	Serviços	2	Compacta
<b>Ed 48</b>	Residência Universitária - Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1950-063, Chelas, Lisboa	2008	Urbana	Serviços	4	Compacta
<b>Ed 49</b>	Empreendimento Alto da Mira, Amadora	2005	Urbana	Habitação	4	Compacta
<b>Ed 50</b>	Av. D. João II, Lote 4.70.02, Residência Universitária Eng.º Duarte Pacheco, Parque das Nações Norte	1998	Urbana	Habitação	4	Compacta
<b>Ed 51</b>	R. da Moeda 32, Coimbra	2016	Urbana	Habitação	3	Compacta
<b>Ed 52</b>	Universidade Católica Portuguesa, Edifício principal, Porto	1999	Urbana	Serviços	4	Irregular
<b>Ed 53</b>	Universidade Católica Portuguesa, Edifício secundário, Porto	1992	Urbana	Serviços	2	Irregular
<b>Ed 54</b>	Hospital da Santa Casa, Vizela	2008	Urbana	Serviços	3	Irregular
<b>Ed 55</b>	Unidade de Cuidados Continuados de Guimarães	2010	Rural	Serviços	3	Compacta
<b>Ed 56</b>	Escola Secundária de Caldas das Taipas, Guimarães	2010	Urbana	Serviços	2	Irregular
<b>Ed 57</b>	Escola Secundária Carlos de Amarante, Guimarães	2010	Urbana	Serviços	3	Irregular
<b>Ed 58</b>	R. Ocidental 1392, Perafita	2012	Urbana	Habitação	2	Compacta
<b>Ed 59</b>	Unidade de Engenharia Aeronáutica do CEIIA, Matosinhos	2014	Urbana	Serviços	3	Irregular
<b>Ed 60</b>	Lar de São Martinho de Cedofeita, Porto	2011	Urbana	Serviços	6	Compacta
<b>Ed 61</b>	R. Augusto Santos 109, Vila Nova de Gaia	2015	Urbana	Habitação	4	Compacta
<b>Ed 62</b>	Edifícios Vila D'Este, Vila Nova de Gaia	2014	Urbana	Habitação	8	Compacta
<b>Ed 63</b>	Escola Secundária de Estarreja	2011	Urbana	Serviços	2	Irregular
<b>Ed 64</b>	Hospital da Luz, Coimbra	2011	Urbana	Serviços	3	Compacta
<b>Ed 65</b>	Urbanização Páteo das Flores, Aveiro	2011	Rural	Habitação	3	Compacta
<b>Ed 66</b>	R. Nova 60, Aveiro	2007	Urbana	Habitação	9	Compacta
<b>Ed 67</b>	R. Nova 60, Aveiro	2014	Urbana	Habitação	9	Compacta
<b>Ed 68</b>	Óptica Lourenço, Largo 5 de Outubro, Pombal	2010	Urbana	Habitação	4	Compacta
<b>Ed 69</b>	Unidade Residencial Moinhos da Funcheira, Amadora	2014	Urbana	Habitação	4	Compacta

<b>Ed 70</b>	Lotes 11 a 18 do Bairro da Boavista, Lisboa	2013	Urbana	Habitação	7	Irregular
<b>Ed 71</b>	Holiday Inn, Alfragide	2012	Urbana	Serviços	6	Compacta
<b>Ed 72</b>	Centro Social Paroquial de São Julião da Barra, Oeiras	2015	Urbana	Serviços	3	Irregular
<b>Ed 73</b>	Beloura Business Centre, Cascais	2009	Urbana	Serviços	2	Irregular
<b>Ed 74</b>	Residência Universitária Professor Ramôa Ribeiro, Oeiras	2014	Rural	Habitação	3	Compacta
<b>Ed 75</b>	Edifício multifamiliar, Vale de Milhaços	2015	Urbana	Habitação	5	Compacta
<b>Ed 76</b>	Quinta da Fidalga - Museu Oficina de artes Manuel Cargaleiro, Seixal	2013	Urbana	Serviços	1	Irregular
<b>Ed 77</b>	Pingo Doce de Telheiras	2015	Urbana	Comércio	1	Compacta

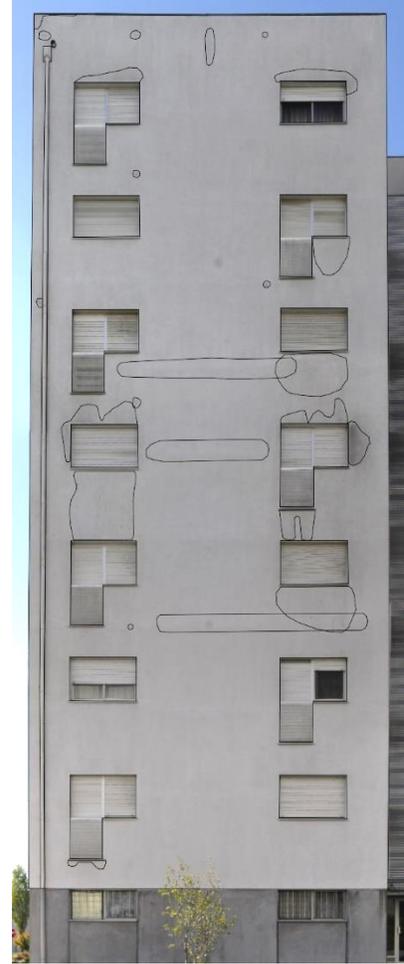
## Anexo V - Exemplo de aplicação da metodologia de análise de degradação a uma fachada com revestimento ETICS



*Totalidade da fachada, obtida por sobreposição de fotografias de várias secções da mesma, com correção de perspetiva na imagem final.*



*Desenho das anomalias identificadas durante a inspeção à fachada, respeitando a dimensão e localização das mesmas.*



*Sobreposição do desenho das anomalias à imagem da fachada, de modo a efetuar o levantamento dos valores necessários para utilizar no cálculo da degradação.*

**Anexo VI - Idade para a qual as fachadas com ETICS atingem o fim da vida útil, de acordo com os modelos definidos através da regressão logística binomial**

<b>Cenário</b>	<b>Valor do atributo</b>	<b>Idade para P("Atingir Fim VU")=50% (anos)</b>	<b>Idade para P("Atingir Fim VU")=90% (anos)</b>
<b>Base</b>	-	18,5	23,5
<b>Orientação</b>	N+NE	18	23
	E+SE	20	24
	S+SO	19,5	24
	O+NO	18	23
<b>Distância ao mar</b>	Inferior a 5 km	18	23
	Superior a 5 km	19	24
<b>Ação da chuva-vento</b>	Alta	18,5	23
	Baixa	21,5	26
<b>Exposição aos agentes poluentes</b>	Alta	16,5	21
	Baixa	20	23
<b>Tipo de revestimento</b>	Tradicional	18,5	23
	Reforçado	21	26
	Cerâmico	53	58
<b>Ação da chuva-vento + Exposição aos agentes poluentes</b>	Vento ALTA; Poluentes ALTA	16	20
	Vento ALTA; Poluentes BAIXA	20	23
	Vento BAIXA; Poluentes ALTA	20	24
	Vento BAIXA; Poluentes BAIXA	24	27

**Anexo VII - Tempo de permanência em cada estado de degradação e transições entre estados**

<b>Cenário</b>	<b>Valor do atributo</b>	<b>Nível 0</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>
<b>Base</b>	-	2,22	9,88	14,92	24,38
<b>Orientação</b>	N+NE	2,31	8,25	14,71	30,38
	E+SE	2,00	9,70	16,80	17,97
	S+SO	2,25	13,45	14,25	63,16
	O+NO	2,29	9,46	14,04	18,62
<b>Distância ao mar</b>	Inferior a 5 km	2,93	7,09	9,72	21,30
	Superior a 5 km	1,50	12,36	26,56	56,51
<b>Exposição à humidade</b>	Alta	2,86	8,83	10,67	23,54
	Baixa	0,89	12,34	31,21	31,75
<b>Ação da chuva-vento</b>	Alta	2,52	9,21	14,67	26,15
	Baixa	0,76	16,27	17,00	13,90
<b>Exposição aos agentes poluentes</b>	Alta	1,93	11,51	16,60	100,00
	Baixa	2,68	8,30	14,11	15,67
<b>Tipo de revestimento</b>	Tradicional	2,27	10,09	13,50	22,20
	Reforçado	1,11	7,55	37,62	100,00
	Cerâmico	1,58	100,00	0,36	0,36
<b>Cor do revestimento</b>	Branco	1,83	7,60	13,84	19,25
	Cores claras	2,45	8,85	12,64	58,36
	Cores escuras	2,70	21,84	100,00	0,10
<b>Textura do acabamento</b>	Liso	1,18	10,10	24,52	100,00
	Rugoso	2,34	9,90	13,60	20,37
<b>Tipo de remate inferior</b>	Perfil de arranque elevado	2,71	15,21	54,24	100,00
	Lambril	2,04	9,12	10,34	23,91
	Outro	1,63	8,51	28,07	28,47

## Anexo VIII - Erro percentual médio dos modelos de cadeias de Markov

Cenário	Valor do atributo	Erro percentual médio (%)				
		Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
<b>Base</b>	-	22,15%	9,25%	8,03%	9,18%	14,49%
<b>Orientação</b>	N+NE	1,80%	7,41%	6,98%	5,42%	10,89%
	E+SE	42,62%	10,44%	6,36%	16,90%	16,07%
	S+SO	36,60%	8,66%	12,65%	2,28%	20,55%
	O+NO	28,42%	10,01%	8,16%	11,26%	12,68%
<b>Distância ao mar</b>	Inferior a 5 km	21,73%	21,49%	21,65%	6,93%	6,46%
	Superior a 5 km	10,16%	1,94%	3,04%	2,93%	20,90%
<b>Exposição à humidade</b>	Alta	8,40%	11,57%	9,93%	10,74%	12,52%
	Baixa	N/A	4,90%	6,14%	3,93%	18,86%
<b>Ação da chuva-vento</b>	Alta	11,74%	8,85%	6,41%	8,75%	13,48%
	Baixa	N/A	5,40%	17,37%	21,11%	26,06%
<b>Exposição aos agentes poluentes</b>	Alta	3,69%	3,99%	7,09%	6,77%	N/A
	Baixa	53,67%	15,45%	6,70%	16,96%	10,41%
<b>Tipo de revestimento</b>	Tradicional	20,90%	9,38%	9,04%	8,97%	13,18%
	Reforçado	N/A	7,93%	2,52%	2,73%	N/A
	Cerâmico	N/A	7,94%	N/A	N/A	N/A
<b>Cor do revestimento</b>	Branco	52,80%	15,84%	12,00%	13,20%	12,48%
	Cores claras	7,28%	3,60%	2,63%	5,18%	9,13%
	Cores escuras	36,09%	3,21%	2,85%	N/A	N/A
<b>Textura do acabamento</b>	Liso	N/A	13,92%	17,11%	11,70%	N/A
	Rugoso	17,65%	8,38%	6,06%	12,60%	13,57%
<b>Tipo de remate inferior</b>	Perfil de arranque elevado	9,13%	2,42%	2,87%	4,49%	N/A
	Lambril	15,19%	11,34%	7,58%	8,44%	8,27%
	Outro	45,33%	10,65%	7,57%	5,53%	14,31%

**Anexo IX - Idade para a qual as fachadas com ETICS atingem o fim da vida útil, de acordo com o modelo definido através de cadeias de Markov**

<b>Cenário</b>	<b>Valor do atributo</b>	<b>Idade para P("Atingir Fim VU")=50% (anos)</b>	<b>Idade para P("Atingir Fim VU")=90% (anos)</b>
<b>Base</b>	-	23	51
<b>Orientação</b>	N+NE	22	48
	E+SE	24	55
	S+SO	26	57
	O+NO	22	49
<b>Distância ao mar</b>	Inferior a 5 km	18	37
	Superior a 5 km	34	79
<b>Exposição à humidade</b>	Alta	20	42
	Baixa	36	Superior a 80
<b>Ação da chuva-vento</b>	Alta	23	50
	Baixa	28	66
<b>Exposição aos agentes poluentes</b>	Alta	26	57
	Baixa	22	47
<b>Tipo de revestimento</b>	Tradicional	23	49
	Reforçado	36	Superior a 80
	Cerâmico	72	Superior a 80
<b>Cor do revestimento</b>	Branco	20	45
	Cores claras	21	45
	Cores escuras	Superior a 80	Superior a 80
<b>Textura do acabamento</b>	Liso	30	71
	Rugoso	23	49
<b>Tipo de remate inferior</b>	Perfil de arranque elevado	58	Superior a 80
	Lambril	19	41
	Outro	31	77